



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

METODOLOGÍA PARA LA GENERACIÓN  
DE BLANCOS DE EXPLORACIÓN: CASO  
DE ESTUDIO EN LOS YACIMIENTOS  
QUEEN ELIZABETH Y CERRO COLORADO,  
REGIÓN DE TARAPACÁ, CHILE.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

MARTIN THOMAS KOCK HECK

PROFESOR GUIA  
BRIAN KEITH TOWNLEY CALLEJAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN  
FRANCISCO BILBAO FEUEREISEN  
XAVIER EMERY

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por Codelco Tech

SANTIAGO DE CHILE

2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE:** Geólogo  
**POR:** Martin Kock  
**FECHA:** 5 de septiembre de 2018  
**PROFESOR GUÍA:** Brian Townley

**METODOLOGÍA PARA LA GENERACIÓN DE BLANCOS DE EXPLORACIÓN: CASO DE ESTUDIO EN LOS YACIMIENTOS QUEEN ELIZABETH Y CERRO COLORADO, REGIÓN DE TARAPACÁ, CHILE.**

El propósito de la exploración minera es encontrar yacimientos minerales. El objetivo principal de este trabajo es proponer una metodología para delimitar áreas con alto potencial de hallar pórfidos de cobre en el área de estudio. La zona de estudio se encuentra en el norte de Chile, entre los depósitos de cobre Sagasca y Queen Elizabeth.

En este trabajo, se utilizan modelos genéticos genéricos de depósitos de pórfidos de cobre junto con las características de los pórfidos cupríferos dentro del área de estudio para identificar criterios de exploración.

Después de definir los criterios de exploración, estos se representan en forma de mapas de predicción GIS mediante el procesamiento de datos de exploración disponibles, que incluyen geología, litogeoquímica, magnetismo aerotransportado, alteraciones y otros. Las unidades geológicas se utilizaron para indicar el potencial de cada unidad como huésped de mineralización, y las capas de estructuras geológicas como fallas y pliegues se procesaron para preparar la capa estructural. Los trabajos realizados por imágenes de satélite se utilizaron para el reconocimiento de las alteraciones. En el mapa predictivo de geoquímica, se aplicaron métodos estadísticos como la matriz de correlación y las definiciones de áreas de anomalía a partir de umbrales. Para la capa magnética, se realizó una correlación entre las unidades geológicas con el mapa de magnetometría de Reducción al Polo.

El siguiente paso fue asignar a cada valor de los mapas predictivos un peso específico entre -3 y 3, siendo -3 y 3 el valor más desfavorable y favorable, respectivamente, con respecto a la ocurrencia de pórfidos de cobre. Además, se asignaron otras ponderaciones a cada mapa predictivo de manera de catalogar la importancia relativa entre estos. Todos los pesos se asignaron en base al conocimiento experto sobre los modelos genéticos genéricos y las características de los depósitos de pórfidos de cobre en el área de estudio.

Finalmente, la integración se aplicó en los mapas de predicción en base a de superposición ponderada. Así, se obtuvo el mapa prospectivo, el cual se comparó con 35 depósitos de cobre en el área estudiada. La precisión del modelo se validó obteniendo un 88% de los pórfidos cupríferos de cobre en zonas de alto y moderado potencial que representan el 30% del área estudiada. Se demostró, por tanto, la utilidad de la metodología propuesta para generar blancos de exploración.

## **Abstract**

### **METHODOLOGY FOR EXPLORATION TARGETS GENERATION: CASE STUDY IN QUEEN ELIZABETH AND CERRO COLORADO SECTOR, TARAPACÁ REGION, CHILE.**

The purpose of mineral exploration is to find ore deposits. The main aim of this work is to propose different work phases to delimit areas with a high potential of finding porphyry copper deposits in the study area. The studied area is in the north of Chile between the copper deposits of Sagasca and Queen Elizabeth.

In this study, generic genetic models of porphyry copper deposits are used in conjunction with deposit models characteristics of Cerro Colorado, Mocha, Queen Elizabeth and other less important porphyry copper within the study area to identify exploration criteria for targeting of Cu deposits.

After defining the exploration criteria, these are represented in the form of GIS predictor maps by processing available exploration data sets, which include geology, litho-geochemistry, airborne magnetics, alterations and others. The overlying rock units were used to indicate the potential of host units predictor map, and geologic structures layers like faults and folds were used to prepare the structural, layer. Works made by satellite images were used for recognition of the alterations. In order to prepare the geochemical layer, statistical methods such as the correlation matrix and definitions of anomaly areas from thresholding were applied in the data. For the magnetic layer, a correlation was made between geologic units and the Reduction to the Pole magnetometry map in conjunction to the regional magnetics negative values correlation with porphyry copper deposits identified by Behn et al., 2001.

The next step was to assign to each value of the predictor maps a specific weight that is between -3 and 3, being -3 and 3 the most unfavorable value and most favorable, respectively, to the occurrence of porphyry copper deposits. Also, other weights were assigned to the whole predictor map to catalog the relative importance between all the predictor maps. All of these weights were assigned based on expert knowledge about the generic genetic models and characteristics of the porphyry copper deposits in the study area.

Finally, the weighted overlay integration was applied to the predictor maps. Ultimately, the mineral potential map was obtained and compared with the 35 copper deposits in the studied area. The accuracy of the model was validated upon achieving the 88% of the porphyry copper in zones cataloged as moderate and high potential area representing the 30% of the studied area and 50% of the copper deposits were in the high potential zones representing 10% of the study area.

## Agradecimientos

A los principales responsables de estar hoy terminando este trabajo y cerrar un ciclo muy importante de mi vida universitaria... Gracias familia, polola y amigos/as.

Gracias Walter, Mónica y Gladys por estar siempre allí, brindarme un apoyo constante. Los quiero un montón.

Gracias Sandra, por tu honestidad, simpleza y calma. Te amo.

A Kurt y Graptolin, por ser excelentes amigos y compañeros.

A Brian Townley, Francisco Bilbao, Sergio Pichott, Xavier Emery, y Adriana Pérez, por los excelentes consejos y guías que me brindaron durante la memoria que fueron sumamente enriquecedoras.

A Sebastián Ormeño, Gonzalo Monsalves y Alejandro Carrasco. Si no fuera por ellos, no estaría realizando esta tesis. Best Team LAS.

A Pablo Fuentes, gracias por tu alegría y paciencia.

A mis amigos/as de la FCFM, en términos generales. Porque con ustedes la universidad tuvo más sentido. Con ustedes me daban ganas de viajar a la facultad todos los días, y con ustedes la estadía en Beauchef se hizo alegre y divertida. Muchas gracias.

A los mantitos (Vitoco, Libe, Tomy, Ignana, Vane, Romy, MatyMoon, Angelik). Me voy con recuerdos maravillosos de los momentos vividos juntos como los viajes a Caburgua (Víctor Suricato) y a Los Maquis (Víctor Salazar).

Al Escuadrón (Edward, Pablo, Franco, Memo1, Memo2, PhoenixRedfield, Seanorar, Álvaro). Por los excelentes tarreos, Sección 4, Bolain y cosas.

A los warir (Kurt, Lemu, Nacho, Caldeque, Mike, César). Por cuidar a los brother que se caen.

A todas las personas que conocí en Codelco Tech (Gino, Frederick, Elizabeth, Perrutu, Lucho, Fer, Josefa, Mario, Naty, Guido, Jaime, Gino, y muchos más).

A Juan Carlos Castelli, Miguel Ángel Parada, Fernando Barra, entre otros académicos de geología, por haber sido claros en sus enseñanzas y excelentes profesores.

A mis amigos/as del colegio, que ya son más de 10 años de amistad y empatía.

# Tabla de Contenido

1. Introducción .....	9
1.1 Objetivo General .....	10
1.2 Objetivos Específicos .....	10
1.3 Hipótesis de trabajo.....	10
1.4 Zona de estudio: Ubicación y accesos .....	11
1.5 Alcances.....	12
1.6 Metodología general.....	12
1.6.1 Selección del tipo de depósito mineral a buscar .....	12
1.6.2 Colección de datos .....	14
1.6.3 Definición de las características del depósito mineral .....	14
1.6.4 Selección de criterios de exploración .....	15
1.6.5 Generación de mapas predictivos .....	16
1.6.6 Integración de mapas predictivos .....	16
1.6.7 Validación .....	17
2. Antecedentes de la zona de estudio .....	18
2.1 Unidades geológicas .....	18
2.1.1 Unidades estratificadas.....	20
2.1.2 Unidades intrusivas .....	27
2.2 Geología estructural .....	30
2.3 Marco metalogénico .....	33
2.4 Yacimientos de cobre en la zona de estudio .....	35
2.4.1 Cerro Colorado .....	35
2.4.2 Otros yacimientos de cobre en la zona de estudio .....	37
3. Características de pórfidos cupríferos en Chile y el mundo .....	40
4. Base de datos de exploración coleccionada .....	43
5. Selección de criterios de exploración y generación de mapas predictivos .....	45

5.1 Unidades geológicas como roca huésped de mineralización .....	45
5.2 Datos aeromagnéticos .....	47
5.3 Litogeoquímica regional .....	51
5.3.1 Sector franja Paleoceno – Eoceno Inferior .....	53
5.3.2 Sector franja Eoceno Medio – Oligoceno .....	56
5.3.3 Datos atípicos .....	57
5.4 Estructuras .....	59
5.4.1 Fallas .....	59
5.4.2 Pliegues .....	60
5.5 Alteración hidrotermal .....	63
5.6 Yacimiento exótico sin fuente reconocida de cobre .....	65
5.7 Cercanía a sondajes exploratorios y muestras geoquímicas .....	66
<b>6. Integración de mapas predictivos y validación del modelo .....</b>	<b>68</b>
6.1 Mapas predictivos a imágenes raster .....	68
6.2 Asignación de pesos a las clases de los mapas predictivos .....	68
6.3 Asignación de pesos relativos porcentuales a los mapas predictivos .....	71
6.4 Integración de mapas predictivos por superposición ponderada .....	71
6.5 Definición de valores de umbral para el mapa prospectivo .....	74
6.6 Validación con pórfidos cupríferos conocidos .....	76
<b>7. Discusión .....</b>	<b>77</b>
7.1 Metodología en general .....	77
7.2 Específicos del caso de estudio .....	77
7.3 Características zonas de alto potencial .....	78
7.3.1 Características zona alto potencial de exploración “Oeste” .....	80
7.3.2 Características zona alto potencial de exploración “Este” .....	80
<b>8. Conclusiones .....</b>	<b>82</b>
<b>9. Recomendaciones y consideraciones .....</b>	<b>83</b>
9.1 Sobre metodología en general .....	83
9.2 Específicos del caso de estudio .....	83
<b>10. Bibliografía .....</b>	<b>84</b>

## Índice de Figuras

Figura 1.1: Distintos mapas predictivos de diferentes variables geocientíficas son analizados e integrados para crear un mapa prospectivo de potencial de hallazgo de un depósito mineral (Modificado de Barnett & Kowalczyk, 2007).....9

Figura 1.2: Ubicación y accesos de la zona de estudio..... 11

Figura 1.3: Esquema generalizado de la metodología utilizada. .... 12

Figura 1.4: Tipos de contextos geotectónicos junto con metales, minerales o hidrocarburos asociados(Barra, 2016). .... 13

Figura 1.5: Ejemplo de metodología generalizada. Los datos geocientíficos son utilizados en conjunto con los criterios de exploración y el conocimiento experto para generar dos mapas predictivos (Distancia Fallas y Anomalías magnéticas). Luego, estos dos mapas predictivos son integrados para crear el mapa prospectivo (Modificado de Barnett & Kowalczyk, 2007). .... 14

Figura 1.6: Tres factores para definir un criterio de exploración..... 16

Figura 2.1: Mapa geológico de la zona de estudio junto a nombres geográficos y relieve DEM de Shaded Relief con inclinación 45° y azimuth 0°. Compilación de unidades y estructuras geológicas de Morandé et al., 2015; Gardeweg & Sellés, 2013; Tomlinson et al., 2015 y Selles et al., 2016. Perfiles geológicos de carta Guaviña (Morandé et al., 2015). .... 19

Figura 2.2: Depósitos minerales en puntos con sus respectivos colores representando las franjas metalogénicas del Norte de Chile. Zona de estudio enmarcada en rectángulo de borde negro (COCHILCO, 2016).....34

Figura 2.3: Sección en planta del yacimiento Cerro Colorado del nivel 2400, indicando la distribución y los tipos de alteraciones presentes (Hoffmann, 2012).....35

Figura 2.4: Sección en planta del yacimiento Cerro Colorado del nivel 2400, indicando la distribución y los tipos de mineralización presentes (Hoffmann, 2012). Verde (Óxidos): Minerales oxidados de cobre. Rojo (Sulfuros): Sulfuros secundarios de cobre. Rosado (Hipógeno): Sulfuros hipógenos de cobre. ....36

Figura 5.1: Mapa geológico con unidades geológicas compiladas y reclasificadas junto a los yacimientos de pórfidos cupríferos más relevantes de la zona de estudio. ....46

Figura 5.2: Anomalías magnéticas con reducción al polo de la zona de estudio. ....47

Figura 5.3: Mapa de anomalías del campo magnético en el norte de Chile junto a los principales pórfidos cupríferos en puntos rojos. Se muestran dos dominios: morado = anomalías negativas superiores a -130 nT; amarillo = intensidades mayores a -130 nT. Las líneas negras muestran el sistema de falla Domeyko y los triángulos, los principales centros volcánicos (Behn et al., 2001). ....48

Figura 5.4: Mapa magnético indicando la correlación entre anomalías magnéticas positivas en el sector oriental de la zona de estudio con el sector norte del Complejo Intrusivo Alantaya y a gran parte del Complejo Intrusivo Yabricoya..... 49

Figura 5.5: Mapa predictivo de magnetometría indicando zonas de anomalías magnéticas regionales negativas menores a -100nT, y anomalías magnéticas locales positivas mayores a 100nT relacionadas con los complejos intrusivos eocenos. ....50

Figura 5.6: Distribución de las muestras litogeoquímicas en la zona de estudio con análisis de Cu, Mo, As, Pb y Zn, mediante absorción atómica.....52

Figura 5.7: Valores de concentración de elementos sobre el umbral para cada franja

metalogénica.....	55
Figura 5.8: Valores atípicos de litogeoquímica para las franjas metalogénicas del Paleoceno - Eoceno inferior y Eoceno Medio - Oligoceno. Los elementos analizados son Cu, Mo, As, Pb y Zn que se muestran junto a los minerales y alteraciones teledetectadas. ....	58
Figura 5.9: Distancias desde fallas* (fallas inversas, de orientación preferencial NS±20°). ....	60
Figura 5.10: Modelo conceptual que muestra el contexto estructural de emplazamiento de pórfidos cupríferos del Norte de Chile. Arriba, semi graben extensional desarrollado sobre basamento Paleozoico. Abajo, sistema de anticlinal de inversión y, en naranja, magmas del Eoceno-Oligoceno asociados a pórfidos cupríferos que se emplazaron como filones y diques tabulares(Amilibia & Skarmeta, 2003). ....	61
Figura 5.11: Distancias desde ejes de anticlinales* (pliegues anticlinales, de orientación preferencial NS±20° que afectan a unidades geológicas de edades jurásicas a eocenas). ....	62
Figura 5.12: Alteraciones y minerales teledetectados que afectan a unidades pre-miocenas en la zona de estudio. ....	64
Figura 5.13: Mapa predictivo de distancia a yacimiento exótico sin fuente (Sagasca)...	66
Figura 5.14: Distribución de sondajes dentro de la zona de estudio destacando aquellos que presentan leyes de cobre mayores a 0.1% de cobre. ....	67
Figura 6.1 Esquema indicando un ejemplo de integración de dos mapas predictivos para asignar el valor de una celda en el mapa prospectivo final mediante superposición ponderada. El proceso es el siguiente; los pesos de las clases de los mapas predictivos (grises) de cada celda son multiplicados por el peso relativo de cada mapa predictivo (x0.8 y x0.2), este resultado (rosado) luego es sumado con los demás resultados de los mapas predictivos para obtener el resultado final (naranja). ....	72
Figura 6.2: Mapa prospectivo indicando el potencial de exploración de pórfidos cupríferos en la zona de estudio. Colores rojos indican sectores favorables para la ocurrencia de pórfidos cupríferos, en cambio, sectores azules, indican sectores desfavorables para la ocurrencia de pórfidos cupríferos. ....	73
Figura 6.3: Mapa prospectivo reclasificado según valores de umbral. ....	75
Figura 7.1: Mapa prospectivo indicando zonas de alto potencial que se encuentren relativamente lejanos a los pórfidos cupríferos más relevantes de la zona de estudio. ....	79

## Índice de Tablas

Tabla 2.1: Resumen de características de los principales pórfidos cupríferos de la zona de estudio.....	38
Tabla 3.1: Características de pórfidos cupríferos andinos y mundiales. ....	40
Tabla 4.1: Base de datos de la zona de estudio.....	44
Tabla 5.1: Estadísticas básicas de litogeoquímica de la franja metalogénica del Paleoceno - Eoceno inferior. ....	53
Tabla 5.2: Matriz de correlación de elementos de la franja metalogénica del Paleoceno - Eoceno inferior dentro de la zona de estudio. ....	54
Tabla 5.3: Valores del umbral límite de concentración de elementos para considerarlos interesantes en términos prospectivos, dentro de la franja metalogénica del Paleoceno - Eoceno inferior en la zona de estudio. ....	54
Tabla 5.4: Estadísticas básicas de litogeoquímica de la franja metalogénica del Eoceno	

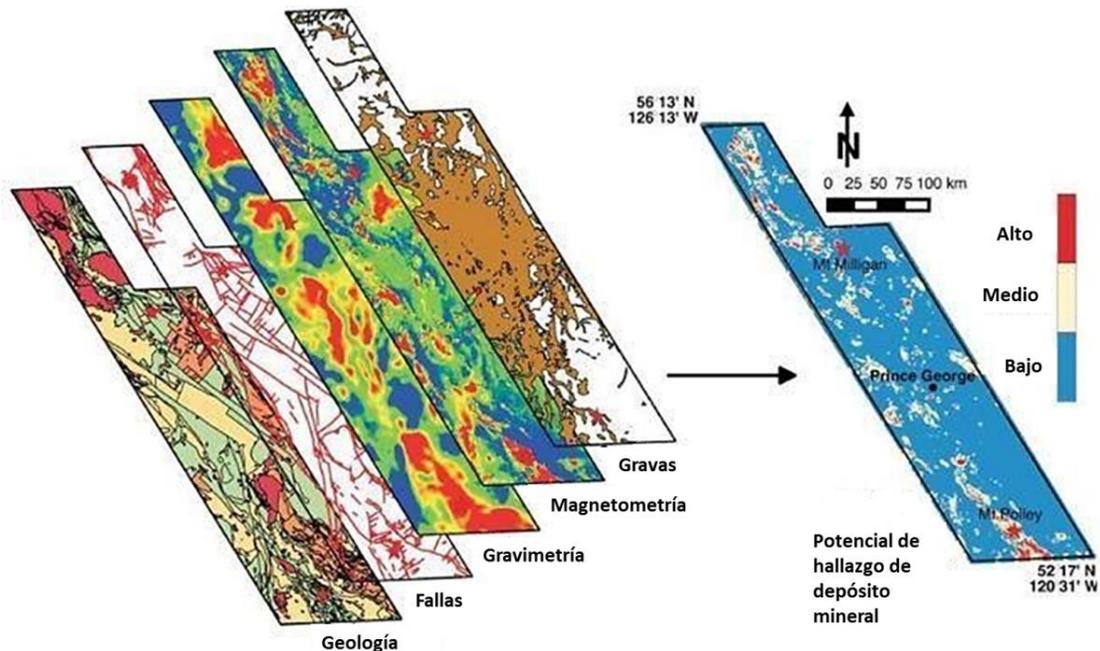
medio- Oligoceno. ....	56
Tabla 5.5: Matriz de correlación de elementos de la franja metalogénica del Eoceno medio – Oligoceno dentro de la zona de estudio. ....	56
Tabla 5.6: Valores del umbral límite de concentración de elementos para considerarlos interesantes en términos prospectivos, dentro de la franja metalogénica del Eoceno medio - Oligoceno en la zona de estudio. ....	57
Tabla 6.1: Mapas predictivos con sus respectivos pesos relativos entre ellos y pesos de sus clases.....	69
Tabla 6.2: Validación del mapa prospectivo de superposición ponderada en base a los pórfidos cupríferos conocidos de la zona de estudio.....	76

## **Índice de Gráficos**

Gráfico 6.1: Histograma del potencial de ocurrencia de pórfidos cupríferos para cada celda de la zona de estudio.....	74
---	----

# 1. Introducción

La exploración minera tiene como objetivo el hallazgo de depósitos minerales. Para conseguir esto, una etapa de la exploración minera es la integración de distintos datos geocientíficos que permite la creación de mapas prospectivos (C Barnett & Kowalczyk, 2007) que indiquen el potencial de encontrar un depósito mineral (Figura 1.1). A los distintos mapas utilizados como datos para la integración se les llama capas o mapas predictivos.



*Figura 1.1: Distintos mapas predictivos de diferentes variables geocientíficas son analizados e integrados para crear un mapa prospectivo de potencial de hallazgo de un depósito mineral (Modificado de Barnett & Kowalczyk, 2007).*

Por diferentes razones, encontrar depósitos minerales es cada día más difícil de conseguir. Actualmente, la definición de blancos de exploración requiere invertir grandes cantidades de dinero, es un proceso relativamente lento y subjetivo al criterio de los expertos.

A medida que grandes volúmenes de datos geocientíficos están siendo recolectados por la industria y gobiernos, nuevos métodos y herramientas están siendo creados para la integración y procesamiento de los datos. Estas técnicas o estrategias de integración de datos se pueden dividir en knowledge-driven o data-driven.

Las estrategias de knowledge-driven son aproximaciones que dependen de las opiniones de geocientíficos expertos para proveer pesos relativos a los distintos valores de atributos que se utilizan como inputs en el modelo. La idea principal es extraer y copiar el razonamiento cognitivo del experto en un sistema computarizado y utilizarlo como herramienta complementaria para el mismo experto. Un ejemplo de técnicas de knowledge-driven son los basados en lógica difusa (Porwal, Deb Das, Chaudhary,

Gonzalez-Alvarez, & Kreuzer, 2014), lógica booleana, superposición ponderada y procesos analíticos jerárquicos.

Por otro lado, una estrategia data-driven involucra la adquisición de conocimiento y aprendizaje mediante ejemplos, en vez de reglas explícitas en el caso de knowledge-driven. Los ejemplos utilizados para el aprendizaje son los depósitos minerales conocidos o sondajes con mineralización. En las técnicas data-driven las ocurrencias de depósitos minerales conocidos son utilizadas como puntos de entrenamiento para generar relaciones con las variables geológicas y determinar patrones que se repitan. Estas relaciones y patrones se identifican mediante distintos algoritmos de aprendizaje como, por ejemplo, Random Forest (Carranza & Laborte, 2014) o Support Vector Machine (Abedi, Norouzi, & Bahroudi, 2012).

Esta investigación muestra una metodología para determinar el potencial prospectivo dentro de la zona de estudio basada en técnicas de knowledge-driven, específicamente con el algoritmo de superposición ponderada.

## **1.1 Objetivo General**

Definir una metodología para delimitar zonas con alto potencial de exploración y aplicarla para pórfidos cupríferos dentro de la zona de estudio.

## **1.2 Objetivos Específicos**

- Recopilar datos relacionados a exploración de pórfidos cupríferos dentro de la zona de estudio.
- Definir las características de los pórfidos cupríferos más relevantes de la zona de estudio.
- Precisar las características de pórfidos cupríferos a partir de modelos teóricos.
- Definir los criterios de exploración para la ocurrencia de pórfidos cupríferos dentro de la zona de estudio.
- Generar mapas predictivos en base a los criterios de exploración.
- Integración de los mapas predictivos mediante superposición ponderada.
- Generar mapa prospectivo de la zona de estudio.
- Validación del mapa prospectivo final en base a yacimientos cupríferos conocidos de la zona de estudio.
- Describir las características de las zonas con alto potencial de exploración de pórfidos cupríferos dentro de la zona de estudio.

## **1.3 Hipótesis de trabajo**

La combinación de una serie de datos geocientíficos permiten, mediante sus características, determinar si un área geográfica tiene o no la posibilidad de albergar mineralización de cobre.

## 1.4 Zona de estudio: Ubicación y accesos

La zona de estudio seleccionada para el desarrollo del presente trabajo se ubica dentro del norte de Chile, en la región de Tarapacá, entre el sector precordillerano y occidental de la cordillera de los Andes, en la provincia de El Tamarugal. En ella, específicamente en las comunas de Huara, Pica y Pozo Almonte, se sitúa la zona de estudio (Figura 1.2).

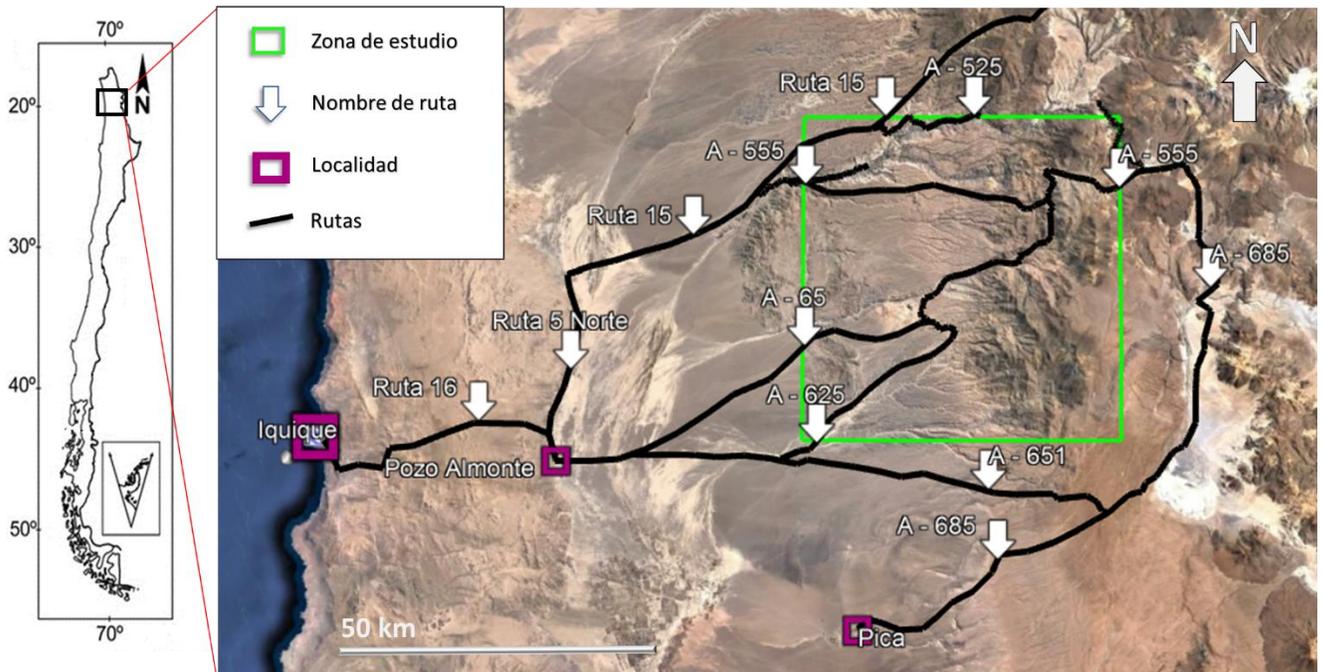


Figura 1.2: Ubicación y accesos de la zona de estudio.

La zona de estudio abarca 2450 km<sup>2</sup> (49 km x 50 km) y se encuentra limitada por las coordenadas en UTM 457,000 – 506,000 m E y 7,763,000 - 7,813,000 m N en el datum WGS 1984, equivalente aproximadamente en latitud 19°46' – 20°13' y en longitud 68°56' – 69°24'.

Se puede acceder a la zona de estudio en vehículo por seis accesos; uno desde el sur, tres desde el oeste, uno desde el norte y uno desde el este. Los accesos desde el oeste se encuentran aproximadamente a 90 km de la ciudad de Iquique y a 50 km de la localidad de Pozo Almonte. Para llegar a la zona de estudio desde Iquique se debe tomar la ruta 16 hasta la ruta 5 Norte, en donde existe la opción de seguir hacia el norte por la ruta 15 o continuar hacia el sur hasta Pozo Almonte en donde se toma la ruta A-65 hacia el oeste. El acceso desde el sur se encuentra a 100 km desde el poblado de Pica. Para llegar desde Pica, se debe tomar la ruta A-685 hacia el noreste, luego virar hacia la izquierda en ruta A-651 para finalmente seguir la ruta A-625 hacia el norte (Figura 1.2). Las rutas mencionadas se encuentran pavimentadas, no así los caminos internos como las rutas A-555 y A-525, entre otras, los que son transitables con vehículos que idealmente posean tracción en las cuatro ruedas.

## 1.5 Alcances

- Los datos y variables que se entregan como entrada al modelo se encuentran en dos dimensiones. Por lo tanto, el mapa prospectivo final va a estar basado en los datos e información de superficie.
- Dentro del mapa prospectivo, las zonas con alto potencial no indican dónde se encuentran los depósitos específicamente ni tampoco puntos para realizar un sondeo. El objetivo de los sectores con alto potencial dentro del mapa prospectivo resultante es indicar sectores en donde sea más probable de encontrar un yacimiento mineral y así disminuir el riesgo de la exploración temprana.

## 1.6 Metodología general

La metodología de generación de blancos de exploración empleada está modificada en base a una serie de aplicaciones en Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Colin Barnett & Williams, 2006; Harris, Grunsky, Behnia, & Corrigan, 2014). El proceso general se dividió en una serie de pasos (Figura 1.3), partiendo por la selección del tipo de depósito mineral a buscar y terminando con el mapa de potencial de exploración o mapa prospectivo.

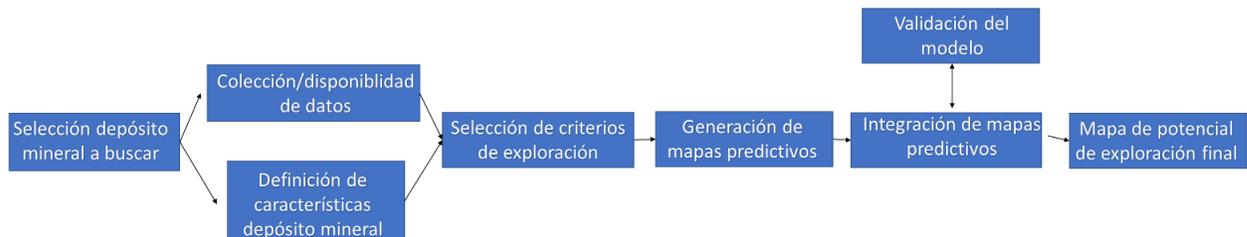


Figura 1.3: Esquema generalizado de la metodología utilizada.

### 1.6.1 Selección del tipo de depósito mineral a buscar

En primer lugar, se elige el tipo de depósito mineral que se quiere encontrar. Algunos tipos de depósitos minerales son pórfidos cupríferos, epitermales de alta sulfuración, placeres de oro, entre otros. Esta elección va a estar en función de dos factores: el contexto geotectónico de la zona de estudio y el *commodity* en que se especializa la empresa de exploración.

Los marcos geotectónicos globales presentan una relación directa con la metalogénesis (Maksaev, 2001). Esto determina la concentración de ciertos tipos de depósitos minerales y/o metales en ciertas partes de la corteza terrestre (Figura 1.4).

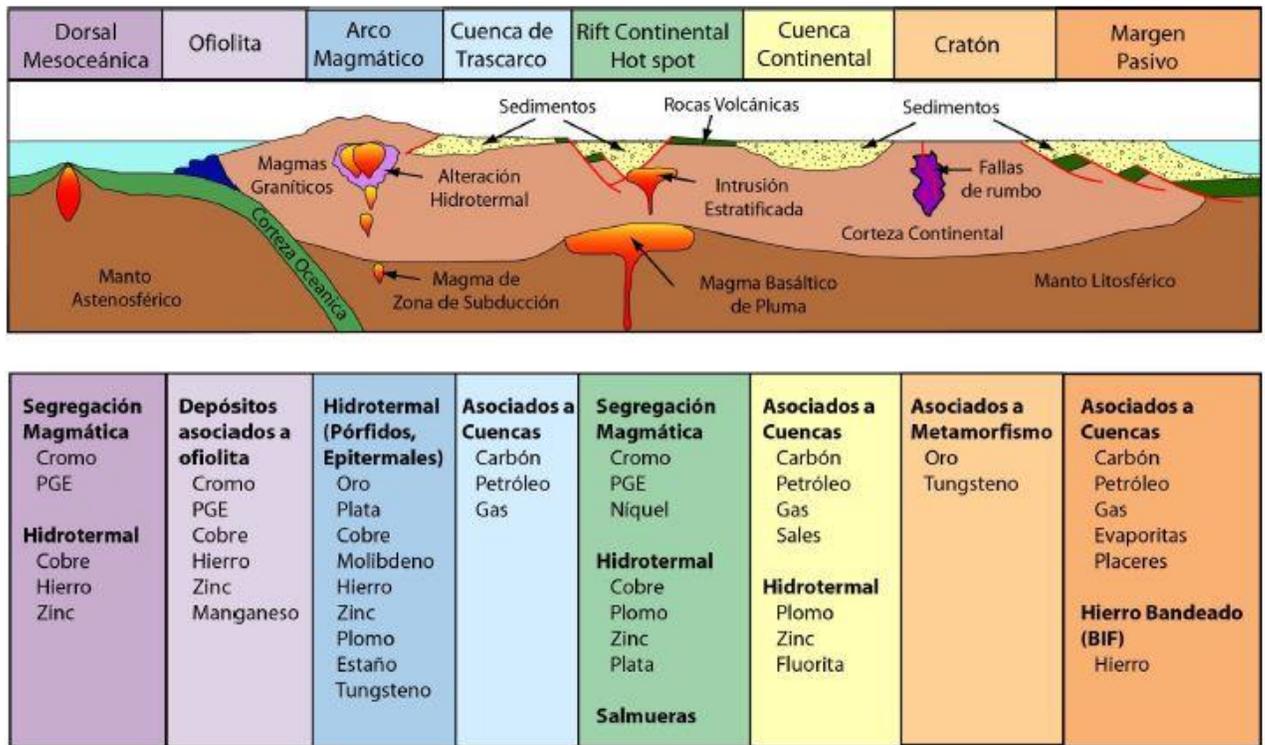


Figura 1.4: Tipos de contextos geotectónicos junto con metales, minerales o hidrocarburos asociados (Barra, 2016).

Con respecto al objetivo de la empresa de exploración, por lo general cada una de estas presenta un tipo de depósito mineral o *commodity* en el cual se especializan y concentran sus esfuerzos. Por lo tanto, la elección del depósito mineral debe estar relacionado con el conocimiento y dominio de la compañía de exploración.

En relación con el objetivo de la empresa, esta puede ser aún más especializada que un tipo de depósito mineral en particular. Existen casos de exploración minera en que se quiere encontrar un tipo de depósito mineral, pero que además presente ciertas características adicionales. Estas cualidades las deben exhibir los datos disponibles asociados a los yacimientos. Algunos ejemplos de estas características pueden ser que el yacimiento presente cierto/a:

- Rango de tonelaje (e.g. >50 Mt)
- Rango de leyes medias (e.g. >0.05 %Cu)
- Ubicación (provincia metalogénica)
- Edad (época metalogénica)
- Si predominan oxidados, sulfuros primarios, sulfuros secundarios, combinación de minerales.

En pocas palabras, si los datos de los depósitos minerales son lo suficientemente detallados, se puede filtrar la selección por características específicas que conversen con el objetivo de búsqueda de la empresa de exploración.

## 1.6.2 Colección de datos

Paralelamente a la definición de las características del depósito mineral o a la selección de los criterios de exploración, se realiza la recopilación de los datos geocientíficos disponibles (Figura 1.5).

Todo lo que se realice a continuación va a depender de los datos, por lo que verificar una buena calidad de estos es sumamente relevante para impedir resultados fraudulentos.

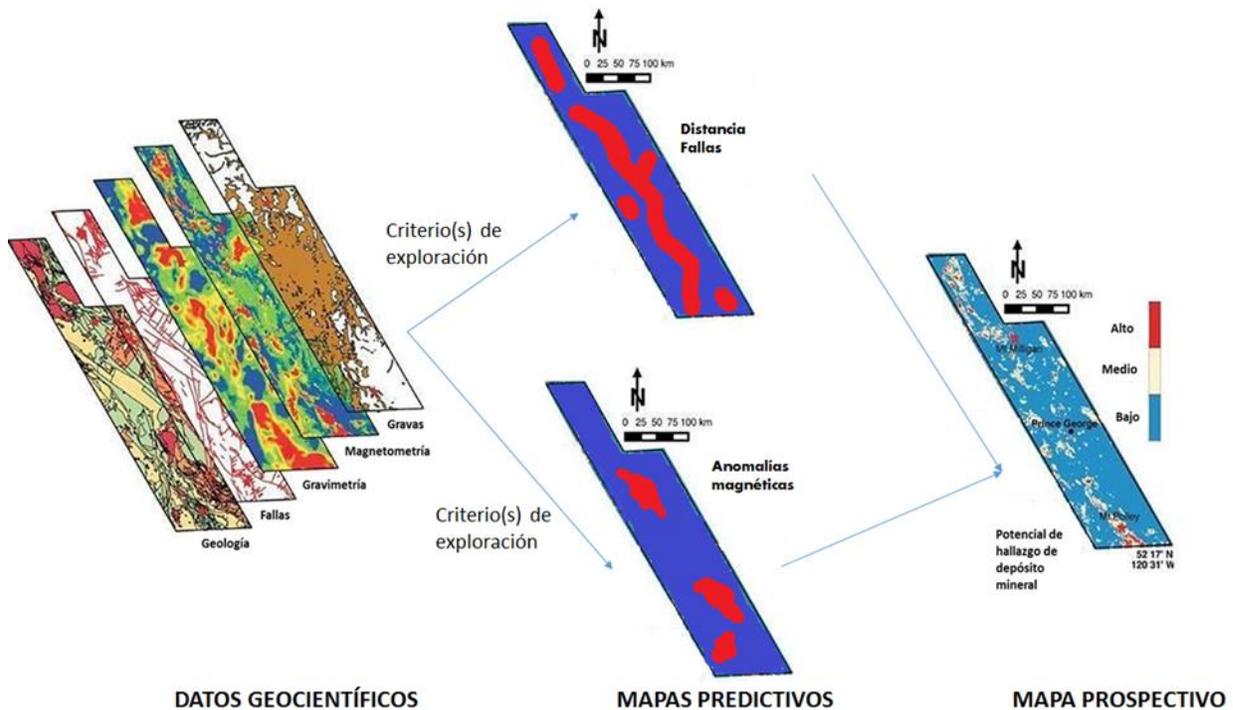


Figura 1.5: Ejemplo de metodología generalizada. Los datos geocientíficos son utilizados en conjunto con los criterios de exploración y el conocimiento experto para generar dos mapas predictivos (Distancia Fallas y Anomalías magnéticas). Luego, estos dos mapas predictivos son integrados para crear el mapa prospectivo (Modificado de Barnett & Kowalczyk, 2007).

Se recomienda en la colección y manejo de datos:

- Investigar sobre el origen (e.g. cómo fueron medidos o quiénes los midieron).
- Realizar estudios exploratorios de datos para detectar errores (e.g análisis de outliers).
- Ignorar o descartar datos poco fiables.
- Que los datos geocientíficos presenten la misma escala de muestreo o detalle.

## 1.6.3 Definición de las características del depósito mineral

El objetivo de este paso es extraer la información, patrones y características del tipo de depósito mineral seleccionado. Estas características especifican en frases o tablas los valores de los distintos atributos asociados al yacimiento. Por ejemplo, una característica puede ser “Todos los yacimientos de la zona de estudio presentan una alteración hidrotermal del tipo propilítica”.

Las características se pueden dividir en dos grupos principales: únicas y comunes.

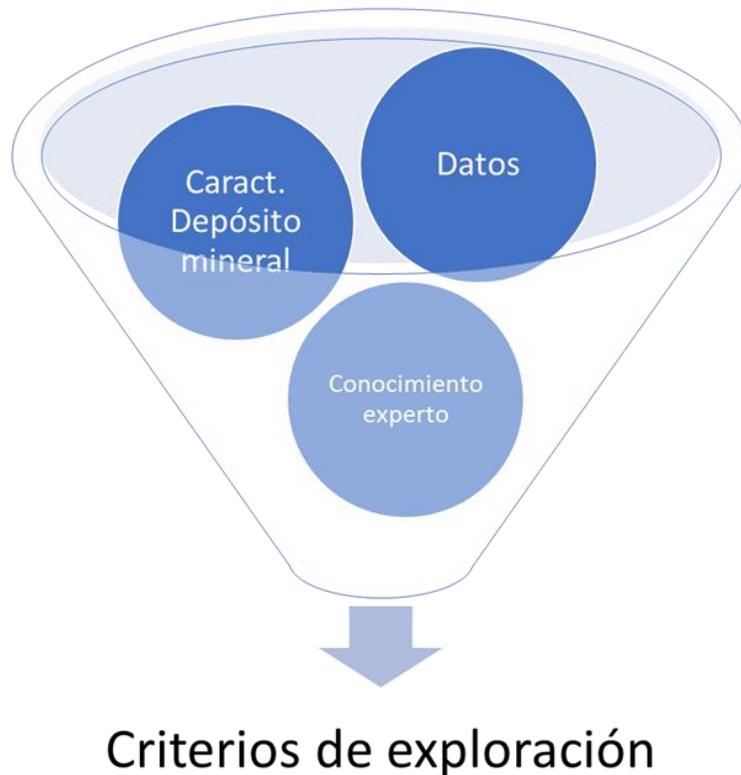
Características Únicas: También conocidos como *footprints* o huellas digitales del depósito mineral. Son aquellas que son propias de un yacimiento mineral en particular.

Características Comunes: Son aquellas cualidades del tipo de depósito mineral seleccionado que se repiten en cierto sector.

#### **1.6.4 Selección de criterios de exploración**

Un criterio de exploración es una característica que relaciona el valor o valores de algún atributo con el potencial de ocurrencia del depósito mineral seleccionado. Las características pueden ser geológicas, geoquímicas, geofísicas, entre otras. En cuanto a la relación, esta puede ser favorable, desfavorable o hasta irrelevante. Por ejemplo, un criterio de exploración es “La presencia de formación La Negra es favorable para la ocurrencia de estratoligados en la zona de estudio”. La característica en el ejemplo es “Presencia de formación La Negra”, y la relación es “favorable”.

Los criterios de exploración se definen en base a tres factores: Las características del depósito mineral, los datos disponibles y el conocimiento experto (Figura 1.6). Para la definición de las características del depósito mineral a buscar, se requiere conocimiento experto de varios procesos geológicos relevantes. Ese conocimiento permite la definición de los factores clave para seleccionar los criterios de exploración. Las características y el conocimiento del depósito mineral dentro y fuera de la zona de estudio, son los pilares fundamentales para la generación de blancos de exploración y para la selección de los datos a recolectar. Ahora bien, existen casos en que los datos y el presupuesto de las empresas exploradoras es limitado para recolectar más muestras, por lo que los criterios de exploración a seleccionar están restringidos a los datos disponibles.



*Figura 1.6: Tres factores para definir un criterio de exploración.*

### **1.6.5 Generación de mapas predictivos**

Un mapa predictivo es una capa que tiene como objetivo reflejar uno o más criterios de exploración, mediante el procesamiento de datos (Figura 1.5). Los criterios de exploración van a definir cómo se van a procesar y manejar los datos para producir los mapas predictivos. Usualmente, en la etapa de generación de mapas predictivos, las herramientas de Sistemas de Información Geográfica se hacen indispensables.

### **1.6.6 Integración de mapas predictivos**

La integración de mapas predictivos es cómo se van a combinar estas capas en una sola. El resultado de la integración es un mapa o modelo de bloques que indica el potencial de ocurrencia del depósito mineral seleccionado en la zona de estudio, llamado mapa prospectivo (Figura 1.5). Este mapa prospectivo se puede obtener mediante dos técnicas o estrategias de integración de datos que se pueden dividir en knowledge-driven o data-driven.

Tanto las estrategias knowledge-driven como data-driven presentan sus ventajas con respecto a la otra. Las estrategias de knowledge-driven incorpora el conocimiento y análisis experto en la ponderación e interpretación. En cambio, las estrategias data-driven extraen patrones de los datos que no son simplemente reconocibles por un humano. Estos patrones permiten reconocer características que se repiten de los depósitos minerales.

### 1.6.7 Validación

La manera de evaluar el rendimiento de la metodología es comparando las ubicaciones de los depósitos minerales con las zonas de potencial de ocurrencia predichas por el mapa prospectivo.

La validación varía según la técnica que se utilizó, ya sea knowledge driven o data-driven. En el caso de knowledge-driven, la validación se realiza determinando el porcentaje de los depósitos minerales que se encuentran en sectores que fueron catalogados con alto potencial de ocurrencia. Por ejemplo, si todos los yacimientos de la zona de estudio están en sectores con potencial de ocurrencia altos, se tendría un 100% de los depósitos minerales clasificados correctamente.

Por otra parte, en técnicas data-driven, se utilizan herramientas de aprendizaje de máquina y clasificación que requieren puntos tanto de depósitos minerales como de no-depósitos. Los no-depósitos son ubicaciones donde no existe un depósito mineral y se pueden ubicar en base a sondajes con bajas leyes o a mapeos en terreno de expertos que indiquen bajo potencial de ocurrencia. La validación en estos casos se realiza mediante validación cruzada de k subconjuntos o también llamada k-fold cross validation en inglés.

Cabe mencionar que para la validación en las técnicas data-driven, además de una validación numérica como lo es la validación cruzada, se recomienda de una evaluación de un profesional de exploración con experiencia para identificar predicciones que no sean coherentes con la realidad (Desharnais, Paiement, Hatfield, & Poupart, 2017).

## **2. Antecedentes de la zona de estudio**

En este capítulo se describirán las unidades geológicas, la geología estructural y los depósitos cupríferos de la zona de estudio.

### **2.1 Unidades geológicas**

En la zona de estudio afloran distintas unidades geológicas (Figura 2.1). La unidad geológica más antigua incluye a lavas y tobas de la Formación Quipisca del Carbonífero Superior, mientras que las unidades más jóvenes corresponden a depósitos no consolidados del Holoceno.

Las unidades geológicas de la zona de estudio corresponden a rocas ígneas y sedimentarias con ausencia de rocas metamórficas. Las formaciones sedimentarias son en general clásticas, asociadas a un ambiente continental con excepción de las formaciones del jurásico que presentan rocas calcáreas. Las formaciones volcánicas se componen de coladas de lavas y tobas de flujos piroclásticos que presentan composiciones ácidas a intermedias, aunque hay casos de composiciones básicas en la Formación Icanche y Secuencias volcánicas del Mioceno. Con respecto a los intrusivos, estos son de composición predominantemente ácida a intermedia de edades que aumentan hacia el oeste, siendo cretácicas en el sector occidental de la zona de estudio hasta eocenas en el sector oriental.

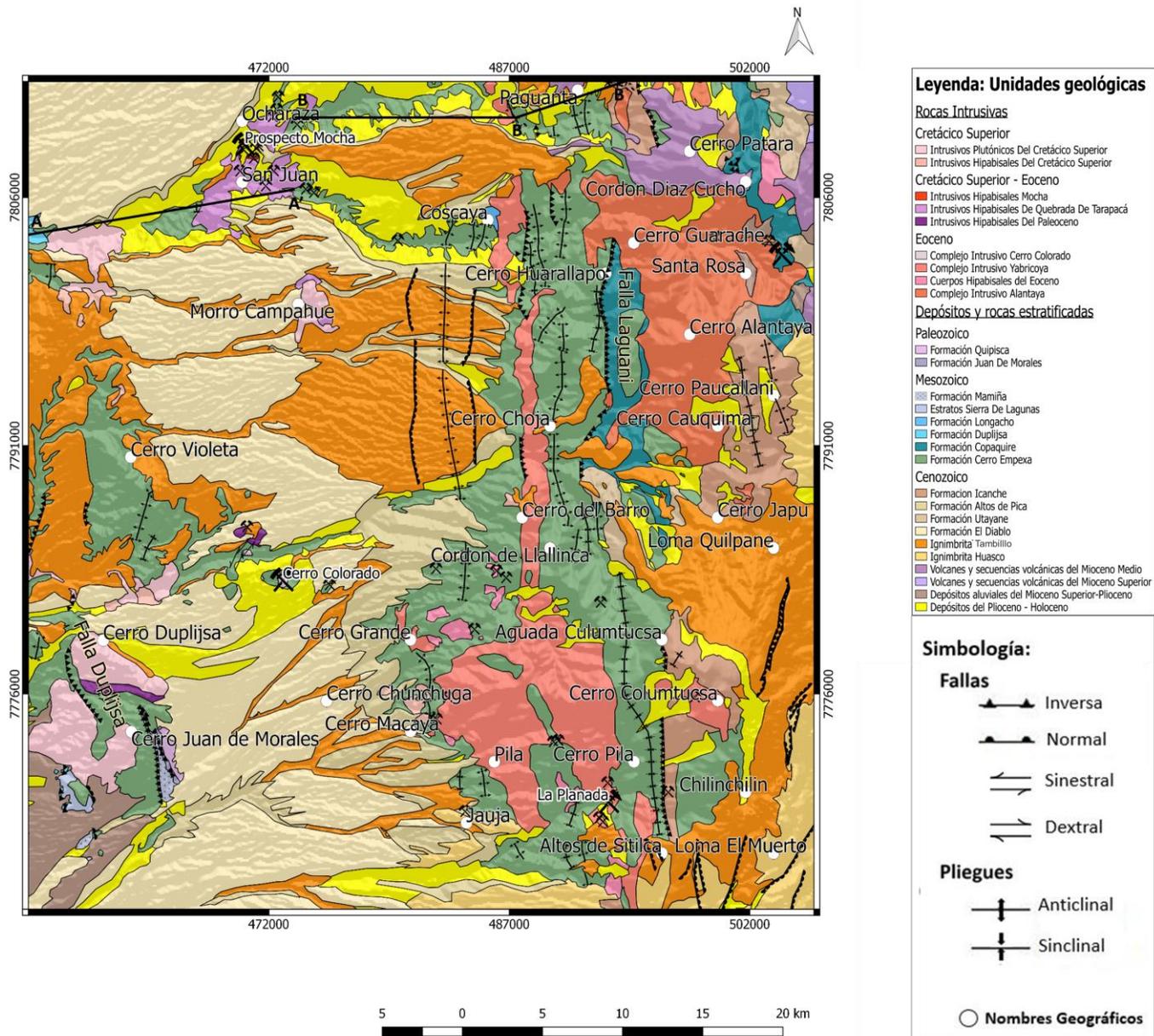


Figura 2.1: Mapa geológico de la zona de estudio junto a nombres geográficos y relieve DEM de Shaded Relief con inclinación 45° y azimuth 0°. Compilación de unidades y estructuras geológicas de Morandé et al., 2015; Gardeweg & Sellés, 2013; Tomlinson et al., 2015 y Selles et al., 2016. Perfiles geológicos de carta Guaviña (Morandé et al., 2015).

A continuación, se detallan las unidades geológicas divididas en estratificadas e intrusivas. Cada unidad geológica comienza con su nombre, seguido entre paréntesis por el autor o autores que la definieron. Luego, se detallan las características de la unidad geológica como lo son distribución dentro de la zona de estudio, tipos y unidades con la que se encuentra en contacto, su litología y edad.

### 2.1.1 Unidades estratificadas

#### Formación Quipisca (Galli, 1968)

**Distribución.** Sus afloramientos se distribuyen en el sector suroccidental de la zona de estudio, al este del cerro Juan de Morales como una franja de orientación NNO-SSE de 4 kilómetros de largo y 500 m de ancho aproximadamente.

**Contactos.** El contacto de la base no ha sido determinado. Su techo está en contacto por falla y por discordancia angular con rocas del Carbonífero superior de la Formación Juan de Morales (Galli, 1968).

**Litología.** Predominan tobas riolíticas y dacitas rojas (Galli, 1968). En menor medida se encuentran brechas monomícticas de clastos riolíticos (Blanco et al., 2012). Los afloramientos presentan, por lo general, diaclasamiento y una meteorización de óxidos de hierro, principalmente de hematita (Tomlinson, Blanco, & Ladino, 2015).

**Espesor.** Presenta un espesor mínimo de 400 m (Tomlinson et al., 2015).

**Edad.** Carbonífero Superior.

#### Formación Juan de Morales (Galli, 1968)

**Distribución.** Sus afloramientos se encuentran en el sector suroccidental de la zona de estudio, al oeste de formación Quipisca y al este del cerro Juan de Morales como una franja de orientación NNO-SSE de 4 kilómetros de largo y 100 m de ancho aproximadamente.

**Contactos.** En la base, esta unidad se encuentra en discordancia angular y tectónico sobre la Formación Quipisca. En cuanto a su techo, corresponde a la Formación Mamiña con la cual se encuentra en contacto tectónico principalmente, aunque hay sectores en concordancia (Tomlinson et al., 2015).

**Litología.** Secuencia sedimentaria de conglomerados, areniscas, calizas y lutitas con niveles fosilíferos (Galli, 1968). Los conglomerados de colores pardos presentan clastos tipo grava de tamaños medios (entre 6 a 20 milímetros). Las areniscas son de tamaño medio a fino (entre 0,063 a 0,63 milímetros) con laminación plana y en artesa (Blanco et al., 2012).

**Espesor.** Espesor mínimo es de 140 m (Hoffmann, 2012) y máximo de 320 m (Tomlinson et al., 2015).

**Edad.** Kunguriense o Pérmico Inferior alto.

#### Formación Mamiña (Tomlinson et al., 2015)

**Distribución.** Sus afloramientos se encuentran en el sector suroccidental de la zona de estudio, al oeste de formación Juan de Morales y al este del cerro Juan de Morales como una franja de orientación NNO-SSE de 5 kilómetros de largo y de ancho que aumenta hacia el sur entre 100 y 500 metros.

**Contactos.** Sobreyace con contacto tectónico o concordancia a la Formación Juan de

Morales.

La Formación Mamiña subyace a la Formación Cerro Empexa y a los Estratos de Sierra de Lagunas. Con la Formación Cerro Empexa se encuentra en contacto tectónico mediante una falla de carácter normal invertida (Tomlinson et al., 2015), aunque existen sectores en que hay discordancia angular.

El tipo de contacto con los Estratos de Sierra de Laguna es concordante.

**Litología.** Secuencia de conglomerados, areniscas, lutitas y limolitas.

Cercano a la base de la formación Mamiña predominan conglomerados con alternancias de lutitas, limolitas y areniscas gruesas. Estas areniscas se hacen más abundantes en la sección media y desaparecen los conglomerados.

Cercano al techo vuelven a aparecer conglomerados con areniscas finas que se alternan con lutitas y limolitas (Tomlinson et al., 2015).

**Espesor.** Su espesor se encuentra entre 850 a 1250 m (Tomlinson et al., 2015).

**Edad.** Triásico Superior.

#### Estratos de Sierra de Lagunas (Sepúlveda, Vásquez, & Quezada, 2014)

**Distribución.** Unidad expuesta en reducidos afloramientos al suroeste del cerro Juan de Morales con una superficie de 1,4 km<sup>2</sup>.

**Contactos.** Sobreyace concordantemente a la Formación Mamiña y subyace en contacto paraconcordante y tectónico a la Formación Duplijsa.

**Litología.** Secuencia de rocas volcanoclásticas y volcánicas, con intercalaciones de rocas sedimentarias clásticas. En términos generales, las rocas volcanoclásticas y volcánicas corresponden a brechas andesíticas, tobas dacíticas de cristales y líticas de tamaño ceniza a lapilli (Tomlinson et al., 2015). Las rocas sedimentarias presentan brechas y conglomerados de clastos volcánicos.

**Espesor.** Desde 500 a 700 metros de espesor (Tomlinson et al., 2015).

**Edad.** Triásico Superior-Jurásico Inferior bajo.

#### Formación Longacho (Galli & Dingman, 1962)

**Distribución.** Unidad expuesta el sector NE de la zona de estudio en Coscaya con una geometría aproximadamente circular con un radio de 500 metros.

**Contactos.** Su base no aflora en la zona de estudio. Presenta contacto tectónico con la Formación Cerro Empexa mediante falla inversa (Morandé, Gallardo, Muñoz, & Farías, 2015) y contacto intrusivo con los Intrusivos hipabisales del Eoceno Medio.

**Litología.** Secuencia sedimentaria clástica y calcárea compuesta por fangolitas, lutitas carbonáticas, calizas, areniscas conglomerádicas y areniscas cuarcíferas (Morandé et al., 2015).

**Espesor.** Espesor máximo de 350 metros (Morandé et al., 2015).

**Edad.** Sinemuriano.

#### Formación Duplijsa (Galli, 1968)

**Distribución.** Unidad expuesta el límite occidental de la zona de estudio en dos sectores. Por un lado, en el sector SO de la zona de estudio, 7 kilómetros al SO del cerro Juan de Morales se presentan como un grupo de cuatro pequeños afloramientos de 0.25 km<sup>2</sup> cada uno aproximadamente. Por otro lado, en el sector NO de la zona de estudio, a 10 km al este de San Juan, se presenta un afloramiento de 1 km<sup>2</sup>.

**Contactos.** Se encuentra cubierta en discordancia erosiva por la Formación Altos de Pica, mientras que con la Formación Cerro Empexa la relación de contacto varía según la zona desde paraconcordante a discordancia angular (Gallardo, 2015). En cuanto a los intrusivos, la Formación Duplijsa se encuentra en contacto intrusivo con los Granitoides del Cretácico Superior. Sobreyace en paraconcordancia a los Estratos de Sierra Laguna, cinco kilómetros al SO del Cerro Juan de Morales.

**Litología.** Secuencia calcárea fosilífera, de origen marino. Las rocas calcáreas se componen de calizas fosilíferas, calcilutitas grises oscuras y limolitas pardas (Blanco et al., 2012).

**Espesor.** Trece kilómetros al oeste de San Juan y al SO del Cerro Juan de Morales la Formación Duplijsa alcanza un espesor de entre 180 a 250 metros (Gallardo, 2015; Tomlinson et al., 2015).

**Edad.** Caloviano y Titoniano Inferior.

#### Formación Copaquire (García, 1967)

**Distribución.** La formación Copaquire aflora en el sector NE de la zona de estudio como dos franjas elongadas de orientaciones NS. Ambas franjas presentan 10 kilómetros de largo y 2 de ancho aproximadamente, estando divididas por el Complejo Intrusivo Alantaya.

**Contactos.** Su base no aflora y subyace a la Formación Cerro Empexa paraconcordantemente o en contacto tectónico por falla Laguani. Por otra parte, presenta un contacto intrusivo con el Complejo Intrusivo Alantaya.

**Litología.** Unidad clástica, carbonática y fosilífera. La secuencia está compuesta por areniscas cuarcíferas, areniscas conglomerádicas, niveles de calizas, fangolita silícea y lutitas (Gallardo, 2015; Morandé et al., 2015; Tomlinson et al., 2015).

**Espesor.** 400 metros de espesor en los afloramientos 3 kilómetros al oeste del Cerro Japu (Tomlinson et al., 2015) y 350 m como máximo 3 kilómetros al oeste del Cerro Alantaya (Morandé et al., 2015).

**Edad.** Caloviano – Kimmeridgiano.

#### Formación Cerro Empexa (Galli & Dingman, 1962)

**Distribución.** Los afloramientos de esta formación se localizan principalmente en el sector centro-oeste y este de la zona de estudio.

Por un lado, los afloramientos del sector centro-oeste de la zona de estudio se distribuyen desde el cerro Violeta hasta el cerro Juan de Morales.

Por otro lado, en el sector este de la zona de estudio la formación Cerro Empexa se expone de manera generalizada como franjas de orientación NS de 40 km de largo divididas por el Complejo Intrusivo Yabricoya.

#### **Contactos.**

La Formación Cerro Empexa presenta una diversidad de relaciones de contacto que se listan a continuación:

- Sobreyace a la Formación Copaquire en paraconcordancia y en contacto tectónico mediante la Falla Laguani.
- Sobreyace a la Formación Juan de Morales en paraconcordancia y discordancia angular.
- Subyace a la Formación Icanche en paraconcordancia y discordancia angular.
- Subyace a la Formación Altos de Pica en paraconcordancia y discordancia

angular.

- Subyace a Ignimbrita Tambillo en discordancia angular.
- Intruido por intrusivos plutónicos del Cretácico Superior, intrusivos hipabisales del Cretácico Superior, intrusivos hipabisales del Paleoceno (Morandé et al., 2015; Tomlinson et al., 2015)

**Litología.** Corresponde a una unidad con componentes volcánicos y sedimentarios. El componente volcánico son lavas andesíticas porfídicas, brechas andesíticas de con clastos de tamaño bloque (mayor a 64 milímetros), brechas dacíticas y tobas dacíticas de ceniza vítrea con cristales de magnetita (Tomlinson et al., 2015). En cambio, el componente sedimentario está constituido por areniscas, fangolitas, lutitas laminadas, limolitas calcáreas, calizas y conglomerados de clastos andesíticos y dacíticos.

**Espesor.** En un principio se sugirió un espesor mínimo de 600m para la Formación Cerro Empexa (Galli & Dingman, 1962). Sin embargo, 3 km al sur de cerro Juan de Morales, se ha estimado un espesor de 2500 m (Tomlinson et al., 2015).

**Edad.** Cretácico Superior.

#### Formación Icanche (Maksaev, 1978)

**Distribución.** La formación Icanche se distribuye en el sector este de la zona de estudio como tres franjas principales de orientación NS y otros tres afloramientos aislados en el extremo NE de la zona de estudio.

#### **Contactos.**

La Formación Icanche presenta una diversidad de relaciones de contacto que se listan a continuación:

- Subyace en discordancia angular a la Ignimbrita Tambillo.
- Subyace en discordancia angular a la Formación Utayane.
- Sobreyace en paraconcordancia y discordancia angular a la Formación Cerro Empexa.
- Intruida por Cuerpos Intrusivos Eocenos y el Complejo Plutónico Yabricoya (Gardeweg & Sellés, 2013; Tomlinson et al., 2015).

**Litología.** Brechas volcánicas de mala selección, tobas de lapilli cristalinas y lavas de composición basáltica a dacítica generalmente de textura porfídica (Morandé et al., 2015; Sellés, Gardeweg, & Garibaldi, 2016; Tomlinson et al., 2015).

**Espesor.** Entre 200 y 800 metros (Gardeweg & Sellés, 2013; Morandé et al., 2015; Tomlinson et al., 2015).

**Edad.** Eoceno Inferior - Eoceno Medio.

#### Formación Altos de Pica (Galli, 1957; Galli & Dingman, 1962)

**Distribución.** La formación Altos de Pica se distribuye principalmente en el sector central de la zona de estudio con ramificaciones hacia el oeste como franjas de orientación EO asociados a quebradas.

**Contactos.** Sobreyace en discordancia angular a las formaciones Copaquire, Duplijsa, Quipisca y Cerro Empexa. Por otro lado, subyace a través de paraconcordancia a la Ignimbrita Tambillo y la formación El Diablo (Blanco et al., 2012).

**Litología.** Se compone de areniscas, conglomerados y tobas principalmente. Las areniscas son de color blanco grisáceo y los conglomerados presentan clastos sedimentarios y volcánicos, con niveles ocasionales de fangolita. Las tobas son soldadas con variable cantidad de cristales, pómez y líticos, y su composición es mayormente

riolítica a dacítica (Gallardo, 2015).

**Espesor.** 350 metros como máximo (Morandé et al., 2015).

**Edad.** Mioceno Inferior.

#### Formación Utayane (Cortés, Cascante, & Zavala, 2014; Lahsen, 1973)

**Distribución.** La formación Utayane se distribuye como dos franjas principales y tres afloramientos aislados pequeños (menores a 3 km<sup>2</sup>) en el sector NE de la zona de estudio. Las dos franjas presentan orientación NNO-SSE de 5 kilómetros de largo 1 de ancho.

**Contactos.** Subyace concordantemente a la Ignimbrita Tambillo al SO de la zona de estudio y en discordancia angular o paraconcordancia en el sector NO de la zona de estudio. Sobreyace en discordancia angular a las formaciones Cerro Empexa, Copaquire e Icanche.

**Litología.** Corresponde a tobas de ceniza vítrea de composición dacítica a riolítica de colores que varían de pardo anaranjado a un blanco grisáceo.

**Espesor.** Varían de 80 m, aumentando hacia el sur con 300 m como máximo (Morandé et al., 2015; Tomlinson et al., 2015).

**Edad.** Oligoceno Superior – Mioceno Inferior.

#### Ignimbrita Tambillo (Blanco et al., 2012; Galli, 1968)

**Distribución.** La ignimbrita Tambillo se distribuye en tres sectores principales; al SE, al centro-norte y al centro-oeste de la zona de estudio. En el sector SE de la zona de estudio, la Ignimbrita Tambillo se ubica entre la Loma el Muerto y el cerro Japu como una franja de orientación NS que aumenta su ancho alrededor de la Loma Quilpane. Los afloramientos del sector centro-norte presentan geometrías de elipses elongados en dirección EO de 15 kilómetros de largo. Por último, el sector centro-oeste se presenta como una franja de orientación NS de 15 kilómetros desde cerro Duplijsa hacia el norte.

**Contactos.** Sobreyace por discordancia angular a la Formación Icanche y concordantemente a la Formación Utayane. A su vez, subyace por discordancia angular o paraconcordancia a la Ignimbrita Huasco y a la Formación El Diablo (Gardeweg & Sellés, 2013; Morandé et al., 2015; Tomlinson et al., 2015).

Es común que esta unidad se encuentre intercalada con la Formación Altos de Pica.

**Litología.** En términos generales la Ignimbrita Tambillo corresponde a una toba de ceniza de composición riolítica con cristales de sanidina, anfíboles y biotita.

**Espesor.** El espesor de la Ignimbrita Tambillo suele ser muy variable alcanzando 200 m en los alrededores de la Loma Quilpane.

**Edad.** Mioceno Inferior.

#### Ignimbrita Huasco (Vergara & Thomas, 1984)

**Distribución.** La ignimbrita Huasco se distribuye en el límite SE de la zona de estudio y 5 kilómetros al este del cerro Cauquima.

**Contactos.** Sobreyace en discordancia angular o paraconcordancia a la Ignimbrita Tambillo y concordantemente a la Formación Altos de Pica. También se encuentra sobre la formación El Diablo de manera concordante (Gardeweg & Sellés, 2013; Tomlinson et al., 2015).

**Litología.** Corresponde a afloramientos con un aspecto macizo de tobas de ceniza de

composición riolítica rica en cristales de cuarzo, plagioclasa, biotita y sanidina (Gardeweg & Sellés, 2013; Sellés et al., 2016).

**Espesor.** No se dispone de estimaciones de espesor de la Ignimbrita Huasco dentro de la zona de estudio. Sin embargo, fuera de la zona de estudio hacia el sur, en la Quebrada de Diablo Marca y al borde del Salar de Huasco se han medido espesores de 80 y 250 m respectivamente (Gardeweg & Sellés, 2013).

**Edad.** Mioceno Inferior.

#### Formación El Diablo (Tobar, Salas, & Kast, 1968)

**Distribución.** La formación El Diablo se distribuye en el sector oeste de la zona de estudio como geometrías de forma elipsoidales en vista en planta. Estas elipses presentan orientación EO y se encuentran divididas por quebradas. Las dimensiones de las elipses son de 12 kilómetros del largo en la dirección EO y 4 kilómetros de ancho en la dirección NS, aproximadamente. Por último, en el extremo NO de la zona de estudio se ubica una gran extensión de la formación El Diablo que continua hacia el NO fuera de la zona de estudio.

**Contactos.** Sobreyace por discordancia angular o en paraconcordancia a Formación Altos de Pica y cubre por discordancia angular a la Formación Cerro Empexa (Morandé et al., 2015). La Formación El Diablo se encuentra sobre la Ignimbrita Tambillo en paraconcordancia y bajo la Ignimbrita Huasco de manera concordante (Tomlinson et al., 2015).

**Litología.** Está compuesto en general por un miembro de areniscas en la base y otro de conglomerados en el techo. El Miembro Inferior corresponde principalmente a areniscas pardas de tamaño de clasto medio a grueso, con algunos lentes de fangolita. El Miembro Superior, está formado esencialmente por conglomerados clasto soportado con intercalaciones de areniscas gruesas a medias y tobas de ceniza (Blanco et al., 2012; Morandé et al., 2015; Tomlinson et al., 2015).

**Espesor.** Varía entre los 50 a 300 m y en general aumenta hacia el SO (Tomlinson et al., 2015).

**Edad.** Mioceno Medio – Mioceno Superior.

#### Volcanes y Secuencias Volcánicas del Mioceno Medio

**Distribución.** La unidad de Volcanes y Secuencias Volcánicas del Mioceno Medio aflora en el extremo NE de la zona de estudio principalmente en los alrededores del cerro Patara.

**Contactos.** Sobreyace en discordancia angular y de erosión a las formaciones Utayane y Cerro Empexa. A las ignimbritas Tambillo y Huasco las sobreyace en discordancia angular y se encuentra cubierto por las Secuencias Volcánicas del Mioceno Superior en discordancia de erosión.

**Litología.** Corresponden a coladas de andesitas, andesitas basálticas y dacitas principalmente de piroxeno y en algunos casos de olivino o anfíbol (Sellés et al., 2016).

**Espesor.** Los edificios volcánicos alcanzan espesores de hasta 850 m, mientras que las coladas individuales varían sus espesores entre 2 a 30 m (Morandé et al., 2015).

**Edad.** Mioceno Medio.

## Volcanes y Secuencias Volcánicas del Mioceno Superior

**Distribución.** La unidad de Volcanes y Secuencias Volcánicas del Mioceno Superior aflora en el extremo NE de la zona de estudio a dos kilómetros al NNE del cerro Patara.

**Contactos.** Sobreyace en discordancia de erosión a las Secuencias Volcánicas del Mioceno Medio y está cubierto por las unidades del Plioceno - Holoceno.

**Litología.** Son principalmente lavas basálticas y andesíticas basálticas de piroxeno y olivino. En menor medida se exponen rocas volcánicas dacíticas de biotita (Sellés et al., 2016).

**Edad.** Mioceno Superior.

## Depósitos aluviales del Mioceno Superior-Plioceno

**Distribución.** Los Depósitos aluviales del Mioceno Superior-Plioceno afloran en dos sectores de la zona de estudio; el extremo SO y en el sector NE. En el sector SO se ubican a 2 kilómetros al SO del cerro Juan de Morales abarcando un área de 5 km<sup>2</sup> aproximadamente. Por otro lado, en el sector NE afloran tres afloramientos de áreas menores a 1 km<sup>2</sup> en los alrededores de Santa Rosa.

**Contactos.** Presenta discordancia erosiva con formación El Diablo y está cubierto por los depósitos del Plioceno – Holoceno.

**Litología.** Constituida principalmente por gravas débilmente consolidadas con arenas gruesas y medias laminadas (Tomlinson et al., 2015).

En el sector NE de la zona de estudio está constituido por una secuencia de brechas mal seleccionadas generalmente matriz soportada. Los clastos son principalmente volcánicos porfídicos de composición intermedia, mientras que la matriz son arenas mal seleccionadas de líticos y cristales de cuarzo y plagioclasa (Sellés et al., 2016).

**Espesor.** El espesor es variable y en general disminuye hacia el oeste. Aproximadamente a 6 km al sur del Cerro Juan Morales el espesor está entre los 50 a 60 m (Tomlinson et al., 2015).

**Edad.** Mioceno Superior – Plioceno.

## Depósitos del Plioceno - Holoceno

Los Depósitos del Plioceno - Holoceno se ubican principalmente siguiendo quebradas en el sector centro y oeste de la zona de estudio.

Representan las unidades más jóvenes dentro de la zona de estudio y se componen en su mayoría a depósitos sedimentarios originados por distintos medios de transporte que según su origen y composición se pueden dividir en:

- Glaciales: Morrenas compuestas de gravas, arenas y arcillas mal seleccionadas.
- Aluviales: Depósitos no consolidados conformados principalmente por arenas de grano fino a grueso.
- Eólicos: Distintos tipos de dunas conformadas por arenas no consolidadas bien seleccionadas.
- Salinos: Depósitos constituidos por halita, yeso y carbonatos.
- Deslizamiento: Bloques métricos, gravas y arenas asociados a remociones en masa de laderas (Blanco et al., 2012; Morandé et al., 2015).

## 2.1.2 Unidades intrusivas

### Intrusivos Plutónicos del Cretácico Superior

**Distribución.** Los Intrusivos Plutónicos del Cretácico Superior se distribuyen en el sector oeste de la zona de estudio divididos en cinco afloramientos principales desde el cerro Juan de Morales en el sur hasta el Morro Campahue en el norte. El afloramiento de mayores dimensiones presenta un área de 25 km<sup>2</sup> aproximadamente.

**Relaciones de contacto.** Se encuentra cubierto por las formaciones Altos de Pica y El Diablo mediante no conformidad, e intruyen a las formaciones Cerro Empexa, Copaquire, Duplijsa y a los Estratos de Sierra de Lagunas. A su vez, son intruidos por los Cuerpos Hipabisales del Paleoceno.

**Litología.** Conjunto de intrusivos y stocks de composición variable de dioritas, granitos y monzodiorita con minerales máficos de piroxeno, biotita u hornblenda de tamaño de grano medio a fino (hasta 5 milímetros) (Blanco et al., 2012).

**Edad.** Cretácico Superior.

### Intrusivos hipabisales del Cretácico Superior

**Distribución.** Los Intrusivos hipabisales del Cretácico Superior se distribuyen en el sector oeste y centro de la zona de estudio divididos en cuatro afloramientos ubicados; al NO del cerro Violeta, al norte del cerro Duplijsa, al norte del cerro Macaya y al NO de cerro Del Barro. Cada afloramiento presenta un área que no superan más allá de los 4 km<sup>2</sup>.

**Relaciones de contacto.** Se encuentra bajo la Formación Altos de Pica, Formación El Diablo y la Ignimbrita Tambillo mediante no conformidad. A su vez, los Intrusivos hipabisales del Cretácico Superior intruyen a las formaciones Juan de Morales, Mamiña y Cerro Empexa.

**Litología.** Corresponden a stocks y diques de composición principalmente andesíticos y riolíticos, y en menor medida dacíticos. Los stocks andesíticos están compuestos por andesitas y andesitas basálticas con minerales máficos de anfíboles, piroxenos u olivino. Las riolitas son por lo general de piroxeno y biotita de grano fino a medio de textura porfídica con escasos fenocristales (Blanco et al., 2012; Tomlinson et al., 2015). El stock dacítico es rico en minerales de plagioclasa y en menor medida de piroxeno y cuarzo, mientras que los domos de composición riolítica presentan bandeamiento de flujo y es pobre en fenocristales de plagioclasa y piroxeno (Blanco et al., 2012).

**Edad.** Cretácico Superior.

### Intrusivos hipabisales de Quebrada de Tarapacá

**Distribución.** Los Intrusivos hipabisales de Quebrada de Tarapacá se distribuyen en el sector NE de la zona de estudio en los alrededores de la localidad de San Juan.

**Relaciones de contacto.** Intruyen a la Formación Cerro Empexa en los alrededores de San Juan y a los Cuerpos Intrusivos del Cretácico Superior en el Morro de Campahue. Se encuentran bajo la Ignimbrita Tambillo y la Formación Altos de Pica mediante no conformidad y lo intruye la unidad de los Intrusivos Hipabisales Mocha al norte de San Juan.

**Litología.** Lo constituyen intrusivos faneríticos de composición diorítica e intrusivos porfídicos de composición andesíticas a dacíticas. La diorita es de textura equigranular y holocristalina compuesta en su mayoría por plagioclasa y anfíbol. Asimismo, los

fenocristales de las andesitas y dacitas son principalmente de plagioclasas y anfíboles con una masa fundamental silicificada (Morandé et al., 2015).

**Edad.** Cretácico Superior – Paleoceno.

#### Intrusivos hipabisales del Paleoceno

**Distribución.** Los Intrusivos hipabisales del Paleoceno se distribuyen en el sector SO de la zona de estudio divididos en dos afloramientos. Uno ubicado al norte de Cerro Juan de Morales como una franja de elongación EO y el otro afloramiento 1 kilómetro al norte de la mina Cerro Colorado.

**Relaciones de contacto.** Intruye a la Formación Cerro Empexa y a los Cuerpos Intrusivos del Cretácico Superior al sur del Cerro Duplijsa.

**Litología.** Corresponde a un stock compuesto de dacitas de clinopiroxeno de textura porfídica con algunos cristales de magnetita. La masa fundamental está compuesta de cuarzo y ortoclasa, mientras que los fenocristales son de plagioclasa y en menor medida de clinopiroxeno de hasta 3 mm (Tomlinson et al., 2015) de tamaño.

**Edad.** Paleoceno

#### Intrusivos hipabisales Mocha

**Distribución.** Los Intrusivos hipabisales Mocha se distribuyen en el sector NO de la zona de estudio a 1 kilómetro al norte de San Juan como pequeños afloramientos que no superan 1 km<sup>2</sup>.

**Relaciones de contacto.** Intruye a los Intrusivos hipabisales de Quebrada de Tarapacá.

**Litología.** Lo constituyen cuerpos hipabisales de textura porfídica y generalmente obliteradas. En esta unidad abunda la presencia de vetillas y alteraciones. Las vetillas, de espesores centimétricos, están rellanas de cuarzo y sericita y las alteraciones son del tipo fílica y en menor medida, potásica y propilítica. También hay reportes de mineralización de cobre de calcopirita, calcosina, malaquita y crisocola distribuidos en un estilo de mineralización tipo enrejado de vetillas (Ordoñez & Rivera, 2004).

**Edad.** Cretácico Superior – Eoceno superior

#### Complejo Intrusivo Cerro Colorado (Moreno, Burgoa, & Escobar, 2013)

**Distribución.** El Complejo Intrusivo Cerro Colorado se ubica en el sector SO de la zona de estudio en los alrededores de la mina Cerro Colorado como tres pequeños afloramientos que presentan extensiones menores a 3 km<sup>2</sup>.

**Relaciones de contacto.** El complejo intruye a la Formación Cerro Empexa y está cubierto por la Ignimbrita Tambillo y la Formación El Diablo mediante no conformidad.

**Litología.** Corresponde a stocks o diques hipabisales porfídicos y brechas hidrotermales. Las rocas de textura porfídica están compuestas de tonalitas, granodioritas, dacitas y andesitas con minerales máficos de hornblenda o biotita (Bouzari & Clark, 2006). Las distintas unidades de este complejo asociadas al yacimiento Cerro Colorado se detallan a continuación:

- Stocks y diques de tonalitas y granodioritas de biotita con textura porfídica.
- Stocks de tonalita microgranular de biotita y hornblenda.
- Dacita de biotita con textura porfídica.
- Brechas hidrotermales polimícticas, clasto y matriz soportadas, con clastos alterados de roca ígnea.

- Diques andesítico-dacítico de hornblenda con textura porfídica.
- Monzodiorita cuarcífera.

**Edad.** Eoceno Inferior.

#### Complejo intrusivo Yabricoya (Blanco et al., 2012)

**Distribución.** El Complejo Intrusivo Yabricoya se distribuye en el sector este de la zona de estudio como una franja de orientación NS desde la localidad de Pila hasta Coscaya. Los anchos de la franja varían presentando 2 km<sup>2</sup> al norte del cordón de Llallinca y 10 km<sup>2</sup> hacia el sur del cordón de Llallinca.

**Contactos.** Intruye a las formaciones Longacho, Cerro Empexa e Icanche. Presenta relaciones de contacto de inconformidad con la Formación Altos de Pica, Formación El Diablo y las ignimbritas Tambillo y Huasco. Cinco kilómetros al NO de Cerro Huarallapo hay contacto tectónico con la Formación Cerro Empexa por la falla Pillani.

**Litología.** Conjunto de intrusivos y diques de diorita, monzodiorita, tonalitas y granitos. El tamaño de los minerales de los intrusivos varía ampliamente desde fino a grueso con minerales máficos de piroxeno, anfíbol y/o biotita (Blanco et al., 2012). Se incluyen en este complejo, brechas hidrotermales con turmalina (Tomlinson et al., 2015).

**Edad.** Eoceno.

#### Intrusivos hipabisales del Eoceno

**Distribución.** Los Intrusivos hipabisales del Eoceno se distribuyen en el sector este de la zona de estudio como tres agrupaciones de afloramientos aislados que cada uno se ubica a; 1 km al este del cordón Díaz Cucho, 4 km al oeste de Loma El Muerto y en los alrededores del cerro Catilcuma.

**Contactos.** Está cubierto por las Secuencias Volcánicas del Mioceno Medio mediante inconformidad. A su vez, es intruido por el Complejo Intrusivo Yabricoya e intruye a las formaciones Copaquire y Cerro Empexa.

**Litología.** Corresponde a stocks y diques de rocas volcánicas de composición andesítica, dacítica y riolítica.

Las andesitas de hornblenda presentan textura porfídica con fenocristales de plagioclasa y anfíbol de hasta 8mm, su masa fundamental presenta clorita y carbonatos (Sellés et al., 2016). Las dacitas son de clinopiroxeno o biotita de textura porfídicas con fenocristales de plagioclasa y clinopiroxeno de hasta 7 mm. Por último, las riolitas presentan una masa fundamental de grano fino a vítreas sin fenocristales (Tomlinson et al., 2015).

**Edad.** Eoceno.

#### Complejo Intrusivo Alantaya

**Distribución.** El Complejo Intrusivo Alantaya se distribuye en el sector NE de la zona de estudio como una franja ensanchada de orientación NS en los alrededores del Cerro Alantaya, con límites desde el cerro Cauquima desde el sur hasta el cordón Díaz Cucho en el norte.

**Relaciones de contacto.** Se encuentra bajo las Secuencias Volcánicas del Mioceno Medio mediante no conformidad e intruye a las formaciones Copaquire, Cerro Empexa e Icanche.

**Litología.** Corresponde a cuerpos plutónicos de monzogranitos, monzonitas, granodioritas y dioritas. Predominan las texturas porfídicas y faneríticos minerales

máficos principalmente de anfíboles y piroxenos. En su mayoría esta unidad está compuesta por granodiorita de hornblenda inequigranular holocristalina (Morandé et al., 2015).

**Edad.** Eoceno.

## 2.2 Geología estructural

La zona de estudio se caracteriza por una serie de estructuras geológicas como anticlinales, sinclinales y fallas con orientación N-S predominantemente. Estas estructuras evidencian eventos de deformación que afectan las unidades geológicas durante distintas épocas. Las estructuras y su distribución en la zona de estudio se muestran en la Figura 2.1 en escala 1:100.000.

Las relaciones estructurales y estratigráficas más significativas permiten dividir en cuatro los eventos de deformación según la edad (Morandé et al., 2015; Gardeweg & Sellés, 2013; Tomlinson et al., 2015 y Sellés et al., 2016):

### Jurásico Superior - Cretácico Superior

Este período de deformación está representado por fallas inversas, normales y discordancia angular.

En la falda suroccidental del Cerro Juan de Morales, se exponen tres fallas inversas de orientación NS y una falla normal al oeste de estas de orientación N20°W, todas las fallas siendo de extensiones de traza menores a 2 km. Las fallas afectan a los Estratos Sierra de Lagunas y a la Formación Duplijsa, mientras que la falla normal pone en contacto a los Estratos Sierra de Lagunas con la Formación Cerro Empexa. Las fallas inversas son de manteo moderado hacia el oeste, vergencia al este y con largos de traza que no superan el kilómetro.

En la falda suroriental del Cerro Juan de Morales se presentan fallas normales reactivadas a inversas de rumbo NS aproximadamente con manteo al oeste, que afectan a las formaciones Quipisca, Juan de Morales, Mamiña y Cerro Empexa (Tomlinson et al., 2015).

La falla mayor que pone en contacto las formaciones Mamiña y Cerro Empexa se llama Juan de Morales, que se ubica un kilómetro al este del Cerro Juan Morales en orientación NNO con 5700 metros de traza de falla. La falla Juan de Morales presenta un manteo hacia el oeste y pone en contacto a lavas de la Formación Cerro Empexa, con conglomerados y areniscas de la Formación Mamiña (Figura 2.1) (Tomlinson et al., 2015). Las lavas de la Formación Cerro Empexa se ubican en el bloque colgante hacia el oeste del plano de falla y las rocas asociadas a la Formación Mamiña están en el bloque yacente hacia el este del plano de falla (Figura 2.1) (Blanco et al., 2012).

Existen evidencias de que la falla Juan de Morales ha tenido movimientos relativos del tipo inverso dado por texturas deformadas de minerales molidos por la falla que presentan orientaciones sigmoidales (Galli, 1968). No obstante, el desplazamiento acumulativo de la falla corresponde a un desplazamiento normal debido a que instala unidades

estratigráficas jóvenes en el bloque colgante al mismo nivel que niveles estratigráficos más antiguos en el bloque yacente (Tomlinson et al., 2015).

Fallas inversas que cortan a las formaciones jurásicas de Copaquire y Longacho, se ubican en dos sectores. Por un lado, la falla inversa llamada Laguani, presenta el límite norte de la traza a un kilómetro al oeste de la cumbre del Cerro Guarache (Figura 2.1). La traza de la falla continúa hacia el sur por diez kilómetros con una orientación NS. La falla Laguani exhibe un manteo al este y coloca en contacto tectónico a la Formación Cerro Empexa en el bloque inferior con la Formación Copaquire en el bloque superior. La falla inversa que afecta a la formación Longacho se ubica en Coscaya presentando un manteo particular hacia el norte con rumbo EO.

Por otro lado, a un kilómetro al NE del Cordón Díaz Cucho se manifiestan fallas inversas que cortan a la Formación Copaquire y están cubiertas por la Formación Icanche del eoceno (Sellés et al., 2016).

En cuanto a la discordancia angular de este período, se presenta entre las formaciones Copaquire y Cerro Empexa.

### Paleoceno

Este período de deformación está representado por pliegues, la falla Imagua, la falla Duplijsa (Figura 2.1) y discordancia angular (Tomlinson et al., 2015).

El Complejo Plutónico Yabricoya divide dos estilos de deformación distintos. Al este del complejo, pliegues con limbos de 70-80° y longitudes de onda cortos (aproximadamente 1 kilómetro) afectan a la formación Cerro Empexa (Figura 2.1). Al oeste del complejo los pliegues presentan ángulos de los limbos menores a 30 grados y longitudes de onda más extensos (10 – 20 kilómetros).

La falla Imagua se ubica a 3 kilómetros al sur del Cerro Duplijsa con una orientación ONO y una traza de falla de 5 kilómetros (Figura 2.1). Presenta un manteo subvertical y limita a la formación Mamiña por el norte. A pesar de no presentar antecedentes de su actividad actual, la falla presentó un tipo de movimiento relativo de rumbo (Tomlinson et al., 2015) dado la distribución de la formación Cerro Empexa al norte de la falla se encuentra más hacia el este que la formación Cerro Empexa al sur de la falla, lo que se interpretaría como un movimiento dextral.

Dos kilómetros al oeste del Cerro Duplijsa está el límite norte de la traza de la falla Duplijsa. Su traza continúa hacia el sur por cinco kilómetros curvándose gradualmente hacia el este. La falla Duplijsa manta hacia el este poniendo en contacto en el sector sur de la traza los Cuerpos Intrusivos del Cretácico Superior en el bloque inferior con la Formación Cerro Empexa en el bloque superior.

La discordancia angular de este período se presenta entre las formaciones Cerro Empexa e Icanche.

## Eoceno – Oligoceno

Este período de deformación está representado por pliegues, la zona de falla Pillani, la falla Jellajellane y discordancia angular. Las deformaciones afectan principalmente a las formaciones Icanche y Cerro Empexa.

Los pliegues asociados a la formación Icanche presentan una orientación NNO en los alrededores del Cerro Paucallani y orientación NE en Aguada Culumtuca, con ejes de largos que no superan los cinco kilómetros.

La zona de Falla Pillani de orientación NS se expone desde el Cerro Choja hasta seis kilómetros al este del Cerro Guarache hacia el norte (Figura 2.1). Sin embargo, gran parte de su extensión hacia el sur esta sellada por la intrusión del Complejo Intrusivo Yabricoya. Este conjunto de fallas desplaza y afecta a la Formación Cerro Empexa además de estar intruido por el Complejo Intrusivo Yabricoya. Por lo tanto, la generación de estas fallas fue sincrónica o posterior a la depositación de la Formación Cerro Empexa y previo a la edad del Complejo Intrusivo Yabricoya, así la edad de formación de estas fallas puede ser menor que el eoceno – oligoceno, dado por las relaciones de contacto que presentan las fallas intersectando a unidades cretácicas, pero no eocenas.

Las fallas de Pillani son inversas y presentan vergencia hacia el oeste (Morandé et al., 2015) con manteos promedio de 50°E (Gallardo, 2015) y pone en contacto miembros antiguos de la Formación Cerro Empexa sobre miembros más jóvenes de la misma formación.

En el límite NE de la zona de estudio se ubica la falla inversa Jellajellane, específicamente dos kilómetros al NO de la cumbre del Cerro Patara está el límite sur de la traza de falla que continua siete kilómetros hacia el norte.

La edad de esta falla se asocia a un período entre el Eoceno a Mioceno medio dado que está cubierta por Volcanes y Secuencias Volcánicas del Mioceno Medio y corta a las formaciones Icanche y Cerro Empexa. La falla Jellajellane manta al este (Morandé et al., 2015) y sitúa en contacto tectónico a la Formación Cerro Empexa con la Formación Icanche.

Por último, la discordancia angular de este período se presenta entre las formaciones Icanche y Utayane.

## Mioceno Inferior – Plioceno

Este período de deformación está representado por fallas normales y un pliegue anticlinal.

En el sector SE de la zona de estudio, en los alrededores de los Altos de Sitalca se presentan fallas normales que cortan a las ignimbritas Huasco y Tambillo (Gardeweg & Sellés, 2013).

Por otro lado, a cuatro kilómetros al SO de Coscaya, comienza el eje de un anticlinal que continua hacia el sur por 13 kilómetros (Figura 2.1). Dos fallas normales a los costados

del anticlinal afectan a la Ignimbirta Tambillo de orientación NS y distribución paralela al eje del pliegue (Morandé et al., 2015).

### **2.3 Marco metalogénico**

La provincia metalogénica de los Andes centrales es conocida principalmente por la presencia de sistemas de pórfidos cupríferos caracterizados por grandes volúmenes (10-100 km<sup>3</sup>) de rocas alteradas hidrotermalmente que ocurren típicamente en márgenes de subducción en los bordes de placas tectónicas (Sillitoe, 1972). El aporte económico de estos depósitos representa cerca del 75% del aporte mundial de cobre, la mitad del molibdeno, aproximadamente un 20% del oro, la mayoría del renio y cantidades menores de otros metales como plata, selenio, bismuto, zinc y plomo (Sillitoe, 2010).

Un gran número de pórfidos cupríferos se han descubierto en las franjas metalogénicas al norte de Chile. Alguno de los yacimientos con sus tonelajes y leyes son; Cerro Colorado (228 Mt, 1% CuT), Ujina (190 Mt, 1.5% CuT), Radomiro Tomic (1000 Mt, 0.7% CuT), Chuquicamata (2700 Mt, 1.4% CuT), Zaldívar (1600 Mt, 1% CuT) (Sillitoe, 2005). Estos yacimientos están genéticamente relacionados a la subducción la placa tectónica Nazca bajo la placa tectónica Sudamericana y su evolución geodinámica en el margen activo chileno (Camus, 2005).

La provincia metalogénica de los Andes centrales se distribuye desde el sur del Perú hasta el centro de Chile, y se puede subdividir en franjas metalogénicas. Cada franja metalogénica corresponde a agrupaciones de depósitos minerales dispuestos en cinturones longitudinales formados durante períodos discretos (COCHILCO, 2016).

La zona de estudio se encuentra dentro de las franjas metalogénicas del Paleoceno – Eoceno Temprano y Eoceno Medio – Oligoceno (Figura 2.2), con pórfidos de cobre y sus zonas de enriquecimiento secundario generadas durante el Oligoceno-Mioceno Medio (Bouzari & Clark, 2006; Tomlinson et al., 2015).

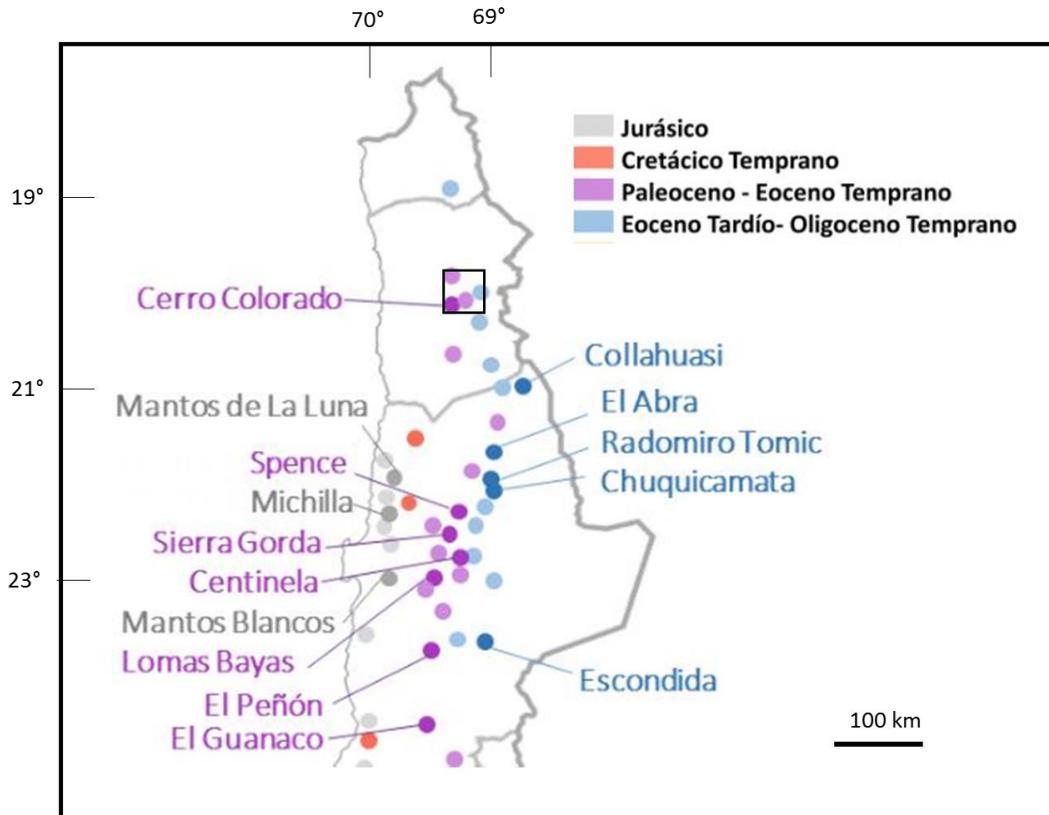


Figura 2.2: Depósitos minerales en puntos con sus respectivos colores representando las franjas metalogénicas del Norte de Chile. Zona de estudio enmarcada en rectángulo de borde negro (COCHILCO, 2016).

Ambas franjas metalogénicas se extienden por más de 1000 kilómetros en dirección NS y 20 kilómetros de ancho aproximadamente. Rocas plutónicas del Paleoceno y Eoceno, que se encuentran relacionadas espacialmente a depósitos de cada franja, son el resultado de complejos magmáticos multifásicos incluyendo composiciones variables de granodiorita, tonalita, monzonita y cuarzo monzonita (Camus, 2005).

Uno de los metalotectos más relevantes para los pórfidos cupríferos asociados a la franja del Eoceno Inferior- Oligoceno están relacionados al sistema de Falla Domeyko (Anexo A) (Maksaev, 2001). Las estructuras de la cordillera de Domeyko están definidas por fallas inversas de alto ángulo con orientación principalmente NS y vergencias variables al este y oeste (Amilibia & Skarmeta, 2003) que afloran desde los 20° hasta los 28°S. Sin embargo, existen interpretaciones que sugieren que las estructuras siguen más al norte de los 20°, pero que las fallas no se observan en superficie dado que se encontrarían cubiertas por unidades miocenas a cuaternarias (Gardeweg & Sellés, 2013).

En el norte de Chile, las fallas extensionales del Triásico/Jurásico Superior/Cretácico Inferior fueron reactivadas en modo inverso generando anticlinales de inversión. El emplazamiento de pórfidos paleoceno-eocenos y eocenos-oligocenos están relacionados espacial y temporalmente con la inversión contraccional de las fallas de extensión de basamento durante las fases tectónicas Andinas (Amilibia & Skarmeta, 2003).

## 2.4 Yacimientos de cobre en la zona de estudio

Los depósitos minerales conocidos en la zona de estudio son principalmente pórfidos de cobre asociados a procesos magmático-hidrotermales (Ordoñez & Rivera, 2004). Existen 35 (Anexo B) yacimientos de cobre en la zona de estudio en su mayoría asociados a pórfidos de cobre, siendo Cerro Colorado el más relevante en términos económicos. Las características de Cerro Colorado y otros pórfidos cupríferos fueron revisadas para definir los criterios de reconocimiento para la integración de los datos regionales y la generación de áreas con alto potencial para encontrar pórfidos de cobre.

### 2.4.1 Cerro Colorado

Cerro Colorado es el pórfido cuprífero y mina más relevante de la zona de estudio en cuanto a tamaño y producción, presentando un tonelaje de 280Mt y una ley promedio de 1 % de Cobre Total (Sillitoe, 2005). Moscovita afectada por alteración hidrotermal fue analizada por medio de Ar-Ar obteniendo  $51,8 \pm 0,6$  Ma (Bouzari & Clark, 2006) indicando la edad de la mineralización hipógena. Otras edades determinadas por el método Ar-Ar en minerales oxidados de cobre demuestran una actividad supérgena del yacimiento entre un lapso dentro de 35-15 Ma (Eoceno Superior a Mioceno Medio) (Bouzari & Clark, 2002).

Las rocas más antiguas expuestas alrededor del yacimiento Cerro Colorado corresponden a lavas andesíticas y tobas de la formación Cerro Empexa del Cretácico Superior. Las rocas de la formación Cerro Empexa son intruidas por el Complejo Intrusivo Cerro Colorado, el cual está compuesto por brechas hidrotermales, diques andesíticos y stocks ácidos a intermedios de tonalitas, granodioritas y monzodioritas (Tomlinson et al., 2015). La principal alteración de Cerro Colorado corresponde a la asociación mineral compuesta de Illita/Moscovita asociado a la alteración fílica, siendo relevantes también las alteraciones propílica, argílica y zonas de silicificación (Figura 2.3).

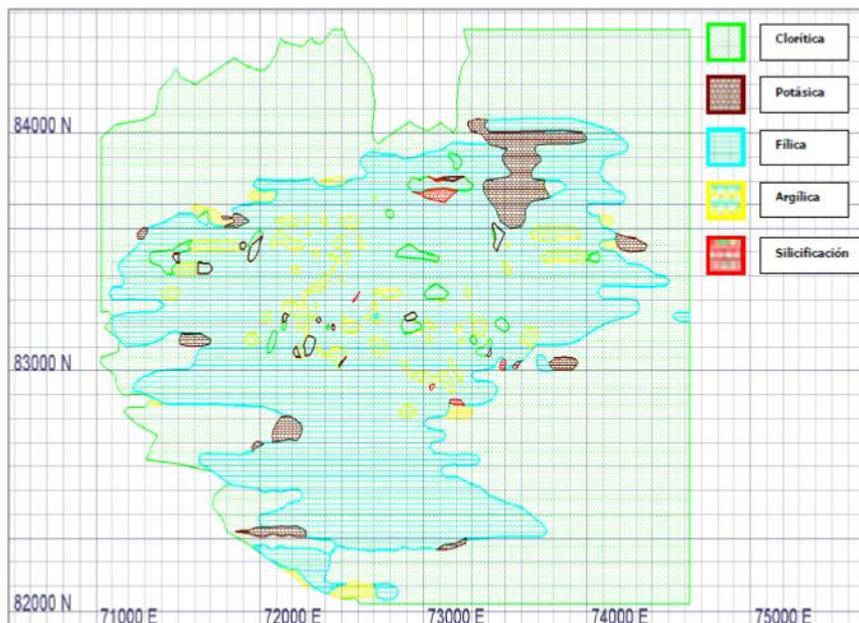
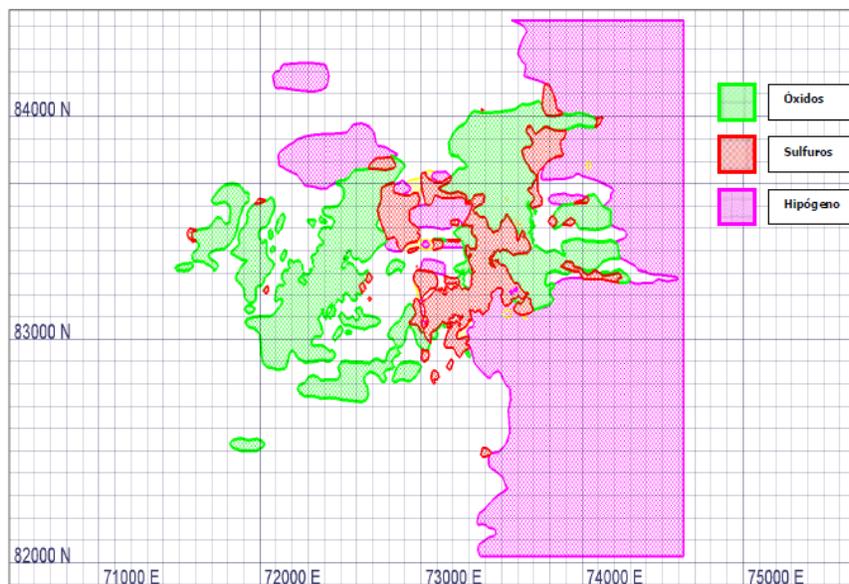


Figura 2.3: Sección en planta del yacimiento Cerro Colorado del nivel 2400, indicando la distribución y los tipos de alteraciones presentes (Hoffmann, 2012).

La mayor parte de la mineralización de Cerro Colorado se encuentra hospedada en los pórfidos tonalíticos-granodioríticos de biotita y los pórfidos microtonalíticos de biotita y hornblenda del Complejo Intrusivo Cerro Colorado en forma de enrejados de vetillas (Bouzari & Clark, 2006).

Si bien la mina Cerro Colorado no presenta un modelo estructural, existen esencialmente tres patrones de orientación de fracturas, vetas y fallas; un patrón NE (N40°E aproximadamente), un segundo sistema con tendencia NW (N60°W aproximadamente), y el último NS (Hoffmann, 2012).

El sistema de alteración de Cerro Colorado cubre un área de 8 km<sup>2</sup> y el de mineralización económica (óxidos y sulfuros secundarios) está confinada como máximo en 2 km<sup>2</sup> (Figura 2.3 y Figura 2.4).



*Figura 2.4: Sección en planta del yacimiento Cerro Colorado del nivel 2400, indicando la distribución y los tipos de mineralización presentes (Hoffmann, 2012). Verde (Óxidos): Minerales oxidados de cobre. Rojo (Sulfuros): Sulfuros secundarios de cobre. Rosado (Hipógeno): Sulfuros hipógenos de cobre.*

El yacimiento Cerro Colorado presenta distintos eventos de mineralización hipógena y alteración hidrotermal siendo la más importante en términos de volumen y leyes de mineralización, la argílica avanzada e intermedia que presenta una zonación vertical compuesta por distintas asociaciones minerales que se traslapan entre ellas compuestas de vetas de cuarzo-albita, illita-clorita-arcillas, cuarzo-illita-arcillas y andalucita-pirofillita (Bouzari & Clark, 2006).

La crisocola es el mineral dominante en cuanto a mineralización supérgena, aunque también se puede encontrar brocantita, libethenita, malaquita, pseudo-malaquita, paraatacamita, cuprita, y tenorita. Existen también sulfuros secundarios representados principalmente por calcosina y en mucho menor grado por covelina que reemplazan completamente, u ocurren como revestimientos de la pirita, calcopirita y bornita (Bouzari

& Clark, 2002).

La mineralización hipógena está representada por piritita, acompañada por calcopirita, bornita, y molibdenita. Los sulfuros hipógenos y secundarios se depositaron en las rocas intrusivas alteradas de manera disseminada, y asimismo en vetas junto a minerales de cuarzo, feldespatos potásicos y biotita. Como mineralogía de ganga característica del yacimiento Cerro Colorado se encuentran minerales como la alunita, kaolinita y óxidos de hierro (Bouzari & Clark, 2006).

#### **2.4.2 Otros yacimientos de cobre en la zona de estudio**

Existen otros depósitos minerales asociados a pórfidos de cobre en la zona de estudio como lo son Mocha, Queen Elizabeth y La Planada entre otros (Anexo B). Además, existe un yacimiento exótico en explotación llamado mina Sagasca. Las características de cada uno se detallan a continuación.

##### **Mocha**

El prospecto Mocha, hospedado por los intrusivos hipabisales Mocha y la formación Cerro Empexa, se encuentra en el sector NO de la zona de estudio, a 2 km al norte de la localidad de San Juan (Figura 2.1). Mocha está asociado a una zona alterada con relictos de sulfuros primarios, fuerte fracturamiento y un área de enriquecimiento secundario restringida con reservas cuantificadas de 50 Mt y 0.7% de Cu (Ordoñez & Rivera, 2004). El estilo de mineralización es de tipo stockwork con minerales de mena de calcopirita, calcosina, crisocola y malaquita. En los alrededores a Mocha predomina la alteración fílica y en menor medida argílica avanzada con óxidos de hierro. El sector de Mocha muestra anomalías magnéticas negativas entre -90 a -483 nT.

##### **Queen Elizabeth**

El pórfido cuprífero Queen Elizabeth se ubica en el extremo NE de la zona de estudio, al NE de los afloramientos del Complejo Intrusivo Alantaya. Está asociado a plutones granodioríticos y tonalíticos del Complejo Intrusivo Alantaya de edad Eocena. La granodiorita en superficie presenta limolitas asociadas a una alteración argílica avanzada, mientras que en profundidad, la presencia de clorita e illita estarían indicando una posible zona de transición entre propilítica y fílica (Sellés et al., 2016).

La mineralización primaria ha mostrado predominancia en piritita, sin volúmenes importantes de sulfuros primarios como calcopirita o bornita. A su vez, hay registros de mineralización secundaria de crisocola, malaquita y azurita (Pacci, Cáceres, & Sayes, 1980). Con respecto a la magnetometría, el sector alrededor de Queen Elizabeth se caracteriza por presentar una leve anomalía magnética positiva entre 0 a +90 nT.

Las características de los pórfidos de cobre más relevantes en términos económicos y tamaño dentro de la zona de estudio se muestran en la Tabla 2.1.

*Tabla 2.1: Resumen de características de los principales pórfidos cupríferos de la zona de estudio.*

<b>Depósito mineral y referencias</b>	<b>Cerro Colorado (Bouzari &amp; Clark, 2002, 2006; Tomlinson et al., 2015)</b>	<b>Mocha (Morandé et al., 2015)</b>	<b>Queen Elizabeth (Sellés et al., 2016)</b>
<b>Mineralización de oxidados de cobre</b>	Crisocola, brocantita, libethenita, malaquita, pseudo-malaquita, para-atacamita, cuprita, y tenorita	Malaquita, crisocola y chalcantita	Crisocola, malaquita y azurita
<b>Mineralización de sulfuros supergenos de cobre</b>	Calcosina y covelina	Calcosina	Sin información
<b>Mineralización de sulfuros hipógenos</b>	Pirita, calcopirita, bornita, y molibdenita.	Calcopirita,	Pirita
<b>Minerales o tipos de alteración</b>	Sericita-Clorita-Arcillas, Cuarzo-Sericita-Arcillas, Andalucita-Pirofilita	Fílica (cuarzo – sericita) y menor medida potásica (biotita-feldespato potásico-cuarzo) y propilítica (cuarzo-clorita-epidota)	Argílica, propilítica y fílica
<b>Estilo de mineralización hipógena</b>	Enrejado de vetillas y diseminado	Enrejado de vetillas	Vetas
<b>Unidad geológica huésped de mineralización</b>	Formación Cerro Empexa y Complejo Intrusivo Cerro Colorado	Andesitas de formación Cerro Empexa e intrusivos hipabisales Mocha	Formación Copaquire y granodioritas de Complejo intrusivo Alantaya
<b>Intrusivo genéticamente relacionado</b>	Complejo Intrusivo Cerro Colorado	Intrusivos hipabisales Mocha y de Quebrada de Tarapacá	Complejo Intrusivo Alantaya
<b>Composición del Intrusivo asociado</b>	Ácida a intermedia	Ácido a básico	Ácida
<b>Edad del intrusivo asociado</b>	Eoceno inferior	Paleoceno – Eoceno inferior	Eoceno Medio
<b>Edad mineralización supérgena</b>	35-15 Ma	-	-

<b>Dimensiones en planta de zona mineralizada</b>	2 km <sup>2</sup>	Sin información	400 m x 200 m
---	-------------------	-----------------	---------------

### **Distrito Yabricoya/La Planada**

En este trabajo, se utiliza el nombre Distrito Yabricoya para las manifestaciones de mineralización cuprífera relacionadas al Complejo Plutónico Yabricoya. En las minas asociadas a este complejo, se han explotado vetas de Cu y/o Au, brechas de turmalina mineralizadas con cobre y stocks con mineralización diseminada en stockwork, tipo pórfido de Cu-Mo (Ordoñez & Rivera, 2004; Thomas, 1967; Tomlinson et al., 2015).

Uno de los focos de mineralización con mayor potencial, se asocia al tipo de depósito mineral de pórfido de cobre de Cu-Mo correspondiente al yacimiento La Planada (Ordoñez & Rivera, 2004; Thomas, 1967; Tomlinson et al., 2015).

El yacimiento La Planada se encuentra hospedado en el Complejo Intrusivo Yabricoya presentando alteración fílica y argílica con mineralización diseminada y en stockwork de calcosina, calcopirita, molibdenita, pirita, covelina, cuprita, crisocola, malaquita, copper wad y galena (Ordoñez & Rivera, 2004; Thomas, 1967; Tomlinson et al., 2015). Según dataciones mediante <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar, la alteración fílica en el sector de la mina La Planada indica una edad de 37,5±0,1 Ma para sericita diseminada en la roca de caja granodiorítica (Tomlinson et al., 2015).

### **Yacimiento exótico Sagasca**

El yacimiento Sagasca, conocido también como La Cascada, aflora a 10 km al SSE del cerro Duplijsa, y corresponde a un depósito exótico de cobre que se hospeda en conglomerados de la Formación Altos de Pica (Galli, 1968; Munchmeyer, 1996)

Una vista en planta del cuerpo mineralizado muestra una longitud de cerca de 4 km en la dirección NE-SO, y un ancho de 400 m, mientras que en perfil exhibe la forma de un manto lenticular, cuyo espesor promedio es de 40 m (Tomlinson et al., 2015). La ubicación y forma del cuerpo mineralizado está controlada por el eje de un paleocanal, de orientación NE-SO (Munchmeyer, 1996; Tomlinson et al., 2015).

La mineralización de cobre consiste principalmente en crisocola con copper wad subordinado y, en menores cantidades, atacamita, antlerita y brocantita, mientras que la ganga incluye zeolitas, yeso, calcita, sílice y arcillas (Tomlinson et al., 2015).

### 3. Características de pórfidos cupríferos en Chile y el mundo

Los modelos de depósitos minerales son usualmente utilizados para definir los criterios de reconocimiento para la exploración regional (Porwal et al., 2014). Los sistemas minerales predominantes dentro de la zona de estudio corresponden a los pórfidos de cobre, chimeneas de brecha y vetas. Existen también depósitos del tipo estratoligados de cobre y fallas mineralizadas de oro y plata (Ordoñez & Rivera, 2004).

Para identificar los criterios o variables relevantes para la exploración regional de pórfidos de cobre, se compararon las características geológicas claves asociadas a los pórfidos cupríferos más relevantes en la zona de estudio (Tabla 2.1) junto con los rasgos de los pórfidos de cobre de modelos genéticos generalizados (Tabla 3.1).

*Tabla 3.1: Características de pórfidos cupríferos andinos y mundiales.*

Variable	Subdivisiones de variable	Valores favorables para la ocurrencia de pórfidos cupríferos
<b>Litología asociada (John et al., 2010)</b>	Rocas ígneas	Granitos, Tonalitas, Monzodiorita, Dioritas, Monzonita, Riolita, Andesitas, Dacitas, Tobas, Brecha freatomagmática, Brecha magmática-hidrotermal, Cuarzo monzonita, Cuarzo diorita y hornfels
<b>Litogeoquímica en rocas con alteración potásica, fílica o argílica (Halley, Dilles, &amp; Tosdal, 2015)</b>	Cobre (Cu) [ppm]	Mayor a 50 ppm
	Molibdeno (Mo) [ppm]	Entre 0,5 a 20 ppm
	Arsénico (As) [ppm]	Entre 10 a 1000 ppm
	Plomo (Pb) [ppm]	Entre 10 a 1000 ppm
	Zinc (Zn) [ppm]	Entre 10 a 1000 ppm
<b>Magnetometría (Behn, Camus, &amp; Carrasco, 2001; Gunn &amp; Dentith, 1997)</b>	Escala Local	Caso pórfido magnético (altas concentraciones de magnetita en alteración potásica): Anomalía positiva en el centro del depósito y anomalías negativas en los bordes.  Caso pórfido NO magnético: Anomalía negativa en el centro del depósito.
	Escala Regional	Anomalías magnéticas negativas menores a -100nT asociadas

<b>Estructuras (Amilibia &amp; Skarmeta, 2003; Sillitoe, 2010)</b>	Fallas y Pliegues	Cercanía a antiformes o anticlinales que se hayan formado entre el Paleoceno y el Oligoceno.  Cercanía a fallas extensionales del Triásico/Jurásico superior/Cretácico inferior que fueron reactivadas en modo inverso entre el paleoceno al oligoceno
	Fallas y Lineamientos	Cercanía a intersección de lineamientos continentales con el sistema de fallas Domeyko
<b>Dimensión vertical (Seedorff et al., 2005)</b>	Profundidad de zona mineralizada	Superficial hasta 10 km bajo la superficie
	Extensión vertical de zona mineralizada	No supera los 2 kilómetros
<b>Dimensión en planta basado en el promedio de 180 pórfidos de cobre [km<sup>2</sup>] (Singer, Berger, &amp; Moring, 2008)</b>	Área zona mineralizada (Promedio) [km <sup>2</sup> ]	1.25
	Área zona sulfuros (Promedio)[km <sup>2</sup> ]	7.4
	Área zona de alteración (Promedio) [km <sup>2</sup> ]	8.9
<b>Minerales (John et al., 2010)</b>	Oxidados de Cu	Malaquita, azurita, cuprita, atacamita, brocantita, antlerita, chalcantita, crisocola, copper pitch, copper wad
	Sulfuros de Cu	Calcopirita, bornita, covelina, calcosina, pirita, enargita, tennantita, digenita
	De alteración	Hematita, Caolinita, Illita, Montmorillonita, Pirofilita, Anhidrita, Biotita, Feldespato Potásico, Magnetita, Sericita, Jarosita, Cuarzo, Alunita  Actinolita, Calcita, Clorita, Epidota (pueden indicar proximidad al núcleo del depósito)
<b>Edad mineralización hipógena (Camus, 2005)</b>	Franja Paleoceno - Eoceno Temprano (62 - 51 Ma) y franja Eoceno Medio - Oligoceno (42 - 32 Ma)	
<b>Edad mineralización supérgena (Sillitoe, 2005)</b>	Entre los 20-27° de Chile la duración de los procesos supergenos ocurrió entre los 45 a los 13 Ma	

<p><b>Contexto tectónico y magmatismo (Camus, 2005)</b></p>	<p>Arco magmático asociado a subducción de placa tectónicas y generación de magmas calcoalcalinos.</p> <p>La mayoría de los depósitos están asociados a regímenes tectónicos compresivos con ausencia de volcanismo.</p>
---	--

## 4. Base de datos de exploración coleccionada

Se recopiló una base de datos en GIS vinculados a la exploración de depósitos minerales de la zona de estudio, incluyendo unidades geológicas, estructuras, alteraciones teledetectadas, litogeoquímica de superficie, leyes de cobre de sondajes y magnetometría.

Los datos disponibles se componen de:

- Cuatro imágenes de mapas geológicos a escala 1:100.000 de las cartas Mamiña, Guaviña, Pampa-Lirima Cancosa y Collacagua-Rinconada del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN), realizados entre los años 2013 a 2016. Asimismo, las ocurrencias de los depósitos minerales de la zona de estudio fueron obtenidas desde las imágenes y textos de las cartas geológicas.
- Archivo shape indicando las asociaciones minerales a escala 1:100.000 basado en la interpretación de bandas de imágenes LANDSAT con resolución espacial de 30 metros de 7 bandas multiespectral realizado por el Ingeniero Jaime Backitt como consultor para la empresa Exploraciones Mineras Andinas S.A. (EMSA).
- Archivo CSV de datos litogeoquímicos que fueron entregados por la empresa Exploraciones Mineras Andinas S.A. de 1189 muestras colectadas y analizadas por Cu, Mo, As, Pb y Zn mediante Absorción Atómica (AA). Las campañas geoquímicas fueron realizadas durante los años 2005 a 2014 en el contexto de exploración básica de la gerencia de exploraciones de Codelco dentro del proyecto pórfidos norte.
- Los datos aeromagnéticos a escala regional de la zona de estudio fueron entregados por la empresa Exploraciones Mineras Andinas S.A. en formato de imagen raster de tres bandas RGB y con filtrado de reducción al polo (RTP).
- Las ubicaciones de los collares de sondajes con sus respectivas leyes de cobre fueron entregadas por la empresa Exploraciones Mineras Andinas S.A. en formato CSV de 350 sondajes. Los distintos sondajes fueron perforados mediante aire reverso o diamantina para diversas empresas tales como Codelco, Teck Royal Silver, Asarco Inc., Conoco, entre otras. Los análisis químicos se realizaron mediante absorción atómica a 83 sondajes por cobre, 44 por molibdeno y a 12 sondajes por Ag, As, Au, Pb, Sb y Zn.

Todos los sets de datos fueron proyectados a un sistema de referencia de coordenadas UTM y datum WGS 1984. Los datos disponibles están resumidos en la Tabla 4.1.

*Tabla 4.1: Base de datos de la zona de estudio.*

<b>Set de datos</b>	<b>Descripción</b>	<b>Fuente</b>
Unidades geológicas	Cuatro mapas a escala 1:100.000	SERNAGEOMIN
Estructuras geológicas	Cuatro mapas a escala 1:100.000	SERNAGEOMIN y EMSA
Litogeoquímica	1189 muestras de roca superficial analizadas mediante Atomic Absortion para el Cu, Mo, As, Pb, Zn	EMSA
Alteraciones teledetectadas	Procesamiento de imágenes LANDSAT multiespectral de 7 bandas a escala 1:100.000	EMSA
Magnetometría aérea regional	Reducida al polo, cubriendo toda la zona de estudio	EMSA
Depósitos minerales	35 ocurrencias de yacimientos de cobre	SERNAGEOMIN
Sondajes	83 sondajes con leyes de cobre	EMSA

## **5. Selección de criterios de exploración y generación de mapas predictivos**

La base de datos de exploración se cruzó con las características de pórfidos mundiales y de la zona de estudio para ser utilizadas conjuntamente para reconocer los criterios de exploración de pórfidos cupríferos. Los criterios de exploración son:

1. Unidades de intrusivos del Paleoceno y Eoceno, junto a la formación Cerro Empexa y en menor medida la formación Copaquire actúan como las principales rocas huéspedes de mineralización de cobre.
2. Unidades geológicas post-oligocenas no actúan como rocas huéspedes de mineralización de pórfidos cupríferos en la zona de estudio.
3. Presencia de alteraciones hidrotermales argílica avanzada, argílica intermedia, silícea y fílica gradando a alteración propilítica distal.
4. Presencia de minerales como alunita, caolinita y óxidos de hierro asociados a procesos supergenos.
5. Cercanía a fallas inversas y dextrales de orientación NS.
6. Proximidad a anticlinales que afectan unidades del cretácico y paleoceno.
7. Anomalías positivas de concentraciones litogeoquímicas de Cu, Mo, As, Pb o Zn.
8. Cercanía a Sagasca (exótico con fuente de cobre desconocida).
9. Anomalías magnéticas regionales negativas.
10. Anomalías magnéticas locales positivas relacionadas con intrusivos eocenos.
11. Cercanía a sondajes con leyes mayores a 0.1% de cobre total.

### **5.1 Unidades geológicas como roca huésped de mineralización**

Para reconocer los criterios diagnósticos de mineralización de cobre en la zona de estudio, cuatro imágenes de mapas geológicos a escala 1:100.000 fueron compiladas, de las cuales fueron reclasificadas y digitalizadas 26 unidades geológicas (Figura 5.1) para obtener las unidades favorables para hospedar pórfidos de cobre.

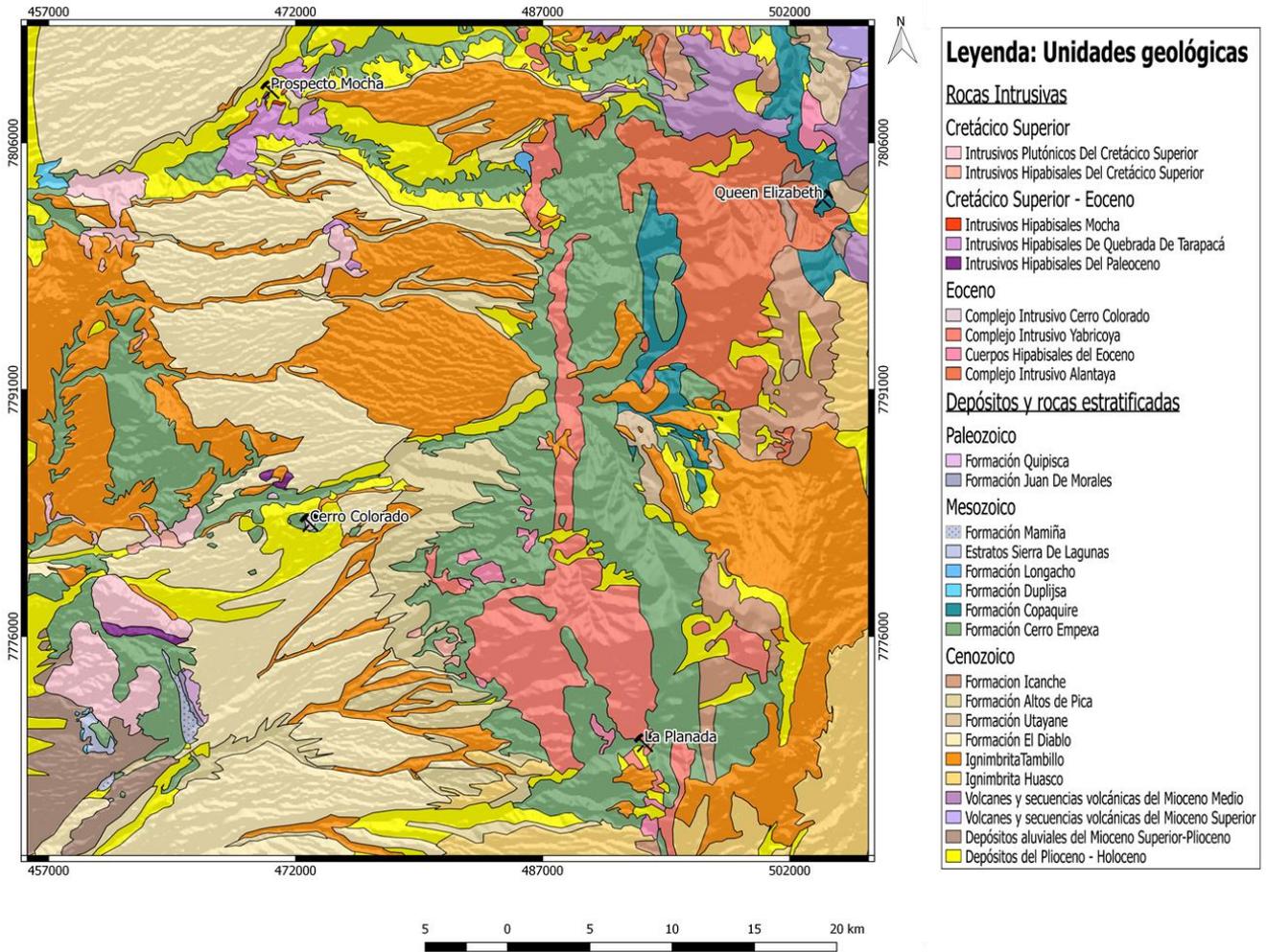


Figura 5.1: Mapa geológico con unidades geológicas compiladas y reclasificadas junto a los yacimientos de pórfidos cupríferos más relevantes de la zona de estudio.

De las 26 unidades geológicas, 17 son estratificadas y 9 son intrusivas. Las principales unidades huéspedes de mineralización de cobre en la zona de estudio son los intrusivos del Paleoceno y Eoceno (Intrusivos hipabisales de Quebrada de Tarapacá, Intrusivos hipabisales Mocha, Intrusivos hipabisales del Paleoceno, Complejo Intrusivo Cerro Colorado, Complejo Intrusivo Yabricoya, Cuerpos hipabisales del Eoceno y Complejo Intrusivo Alantaya) junto a la formación Cerro Empexa y Copaquire.

La mineralización hipógena de cobre de la zona de estudio está asociada a edades Paleocenas a Oligocenas con mineralización supérgena de edad miocena (Bouzari & Clark, 2002, 2006; Ordoñez & Rivera, 2004). Las unidades geológicas de edades post-oligocenas no son hospedantes de mineralización de cobre hipógena, mientras que las unidades geológicas de edades post-miocenas no presentan potencial de hospedar pórfidos cupríferos en el área de estudio.

## 5.2 Datos aeromagnéticos

Los datos aeromagnéticos de la zona de estudio se midieron a escala regional como parte del Proyecto Pórfidos Norte de Codelco (PPN) y fueron obtenidos como imagen raster de 3 bandas en RGB por la empresa Exploraciones Mineras Andinas S.A. La Figura 5.2 muestra las anomalías magnéticas RTP de la zona de estudio.

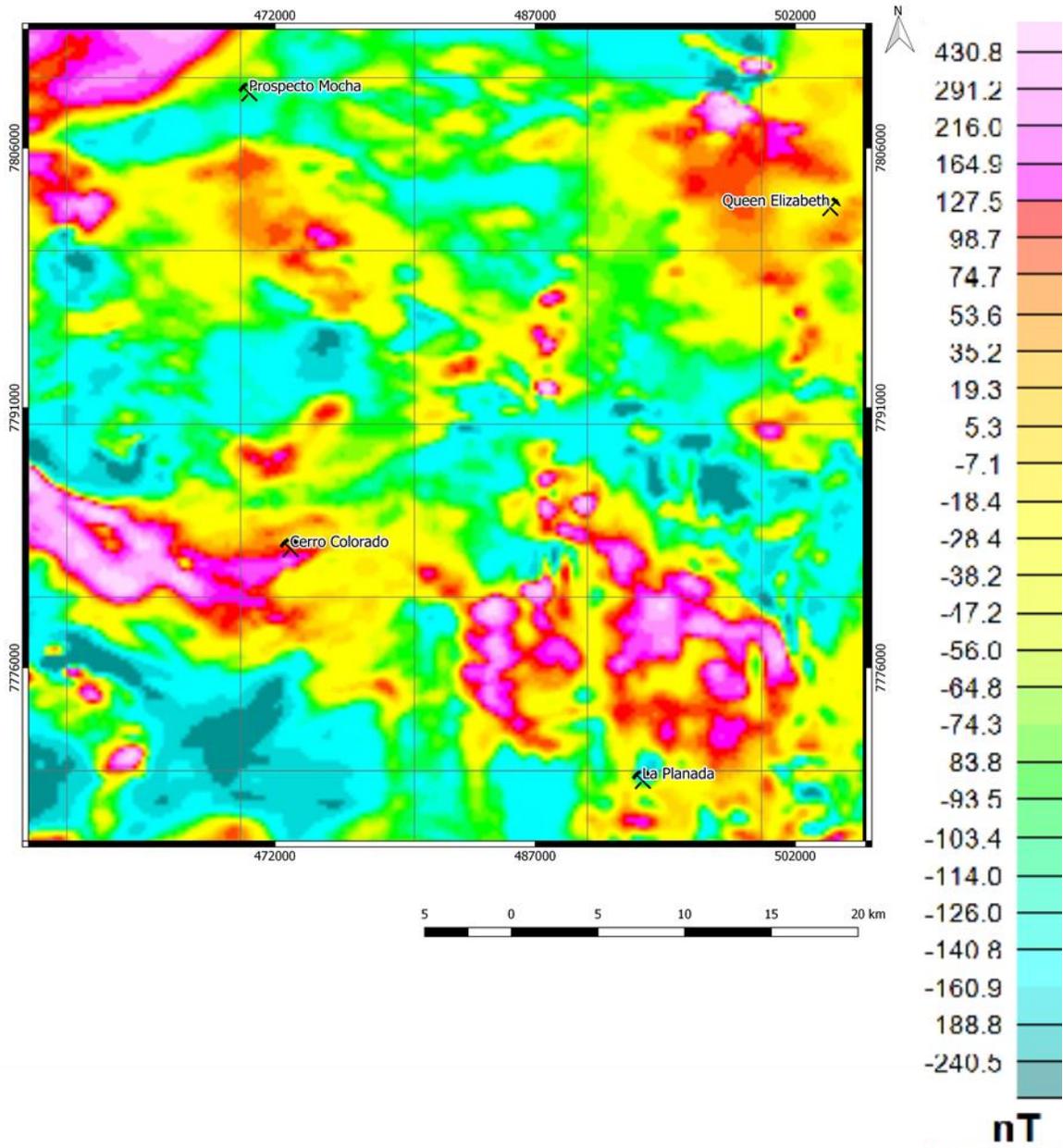
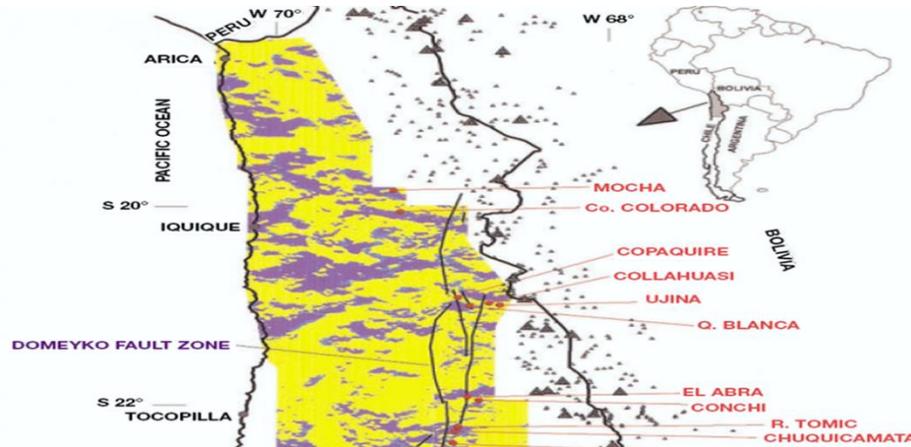


Figura 5.2: Anomalías magnéticas con reducción al polo de la zona de estudio.

El método de filtrado RTP es una de las técnicas utilizadas más comunes para la interpretación de datos magnéticos para remover los efectos de inclinación del campo magnético terrestre. Este filtro transfiere los datos magnéticos como si estuvieran ubicados en el polo magnético permitiendo que las anomalías magnéticas resultantes reflejen directamente los cuerpos magnéticos de subsuperficie (Gunn & Dentith, 1997).

En el mapa aeromagnético de la zona de estudio, los valores del campo magnético varían entre -240 a 430 nT.

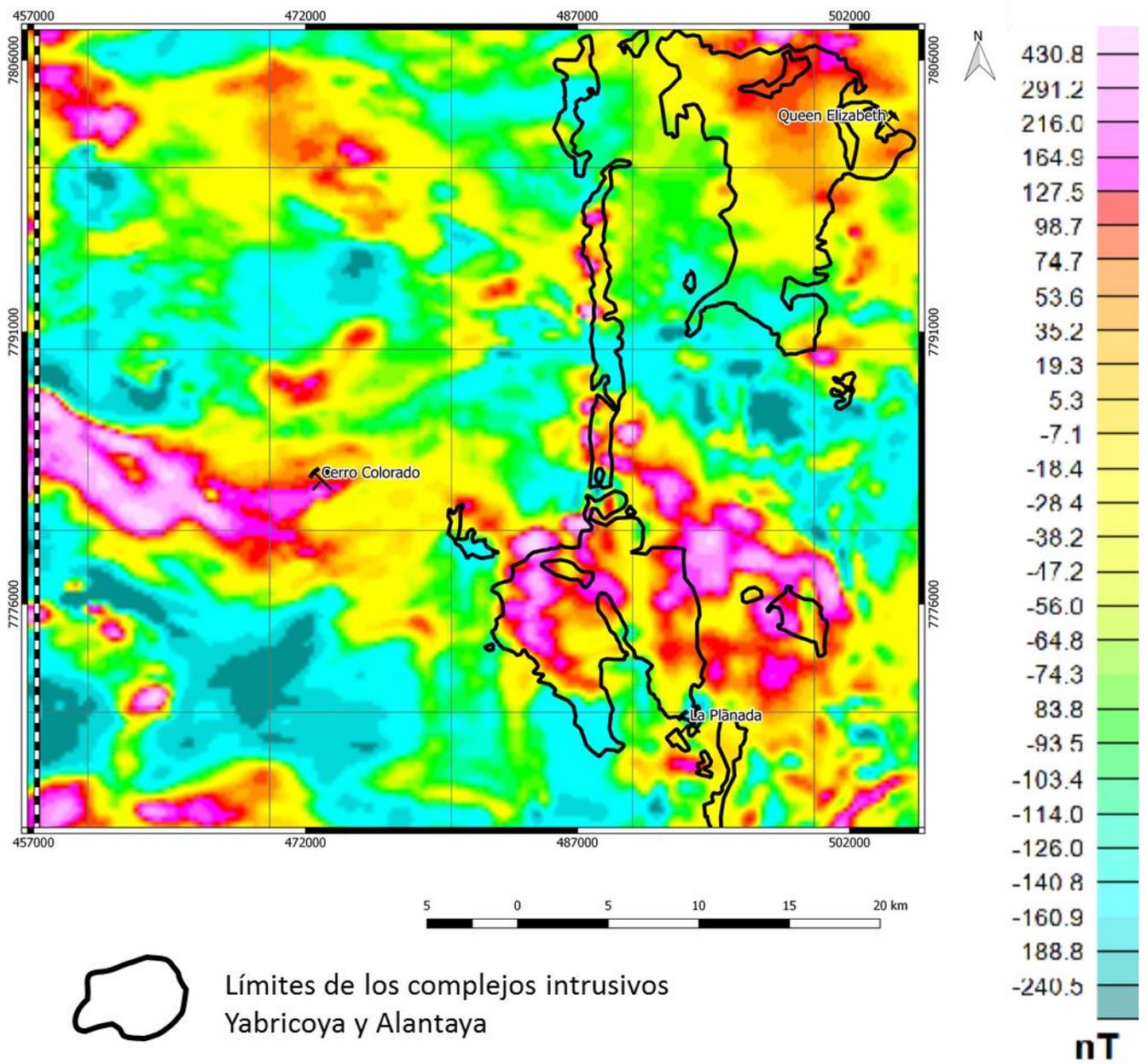
En el norte de Chile entre 19 ° 45 'S y 27 ° 15' S existe un patrón de anomalías magnéticas regionales asociadas a yacimientos tipo pórfido cuprífero. Estas anomalías ocurren generalmente como franjas de orientación este-oeste de intensidad magnética relativa negativa, menores a -100 nanoteslas (nT) (Behn et al., 2001). Las extensiones de estas anomalías en orientación este-oeste son de decenas de kilómetros y de unos 5 a 10 km en dirección norte-sur (Figura 5.3). Estas anomalías se interpretan como zonas de emplazamiento de intrusivos de tamaño batolítico (Behn et al., 2001).



*Figura 5.3: Mapa de anomalías del campo magnético en el norte de Chile junto a los principales pórfidos cupríferos en puntos rojos. Se muestran dos dominios: morado = anomalías negativas superiores a -130 nT; amarillo = intensidades mayores a -130 nT. Las líneas negras muestran el sistema de falla Domeyko y los triángulos, los principales centros volcánicos (Behn et al., 2001).*

Los depósitos conocidos de pórfidos de cobre de la zona de estudio se encuentran espacialmente relacionados con estas anomalías transversales magnéticas (Behn et al., 2001).

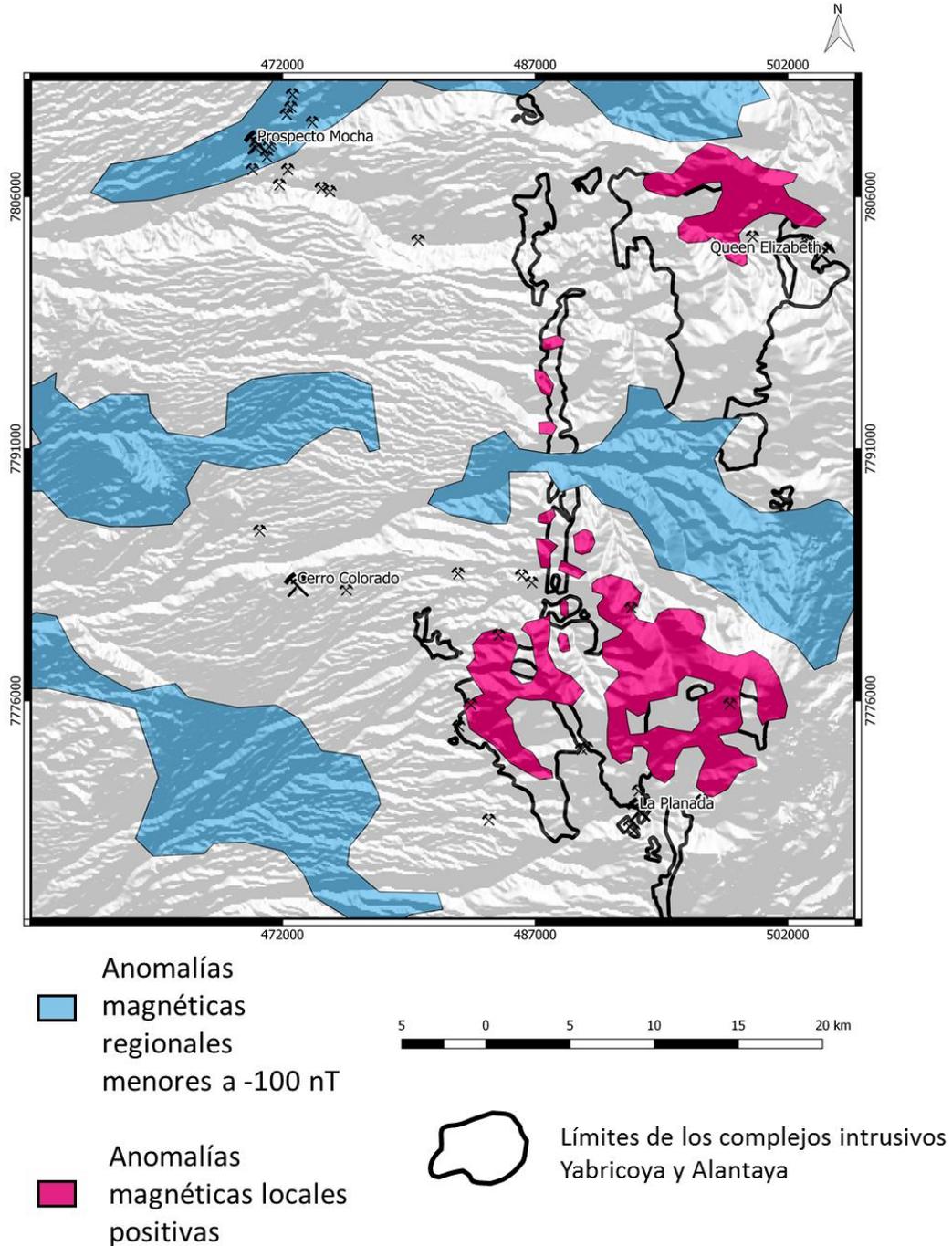
Por otra parte, una superposición entre el mapa aeromagnético y el mapa geológico indican anomalías magnéticas positivas en el sector oriental de la zona de estudio asociado al sector norte del Complejo Intrusivo Alantaya y a gran parte del Complejo Intrusivo Yabricoya (Figura 5.4).



*Figura 5.4: Mapa magnético indicando la correlación entre anomalías magnéticas positivas en el sector oriental de la zona de estudio con el sector norte del Complejo Intrusivo Alantaya y a gran parte del Complejo Intrusivo Yabricoya.*

Los complejos intrusivos Yabricoya y Alantaya están relacionados a la génesis de la mineralización hipógena de cobre en La Planada y Queen Elizabeth, entre otros yacimientos cupríferos de la zona de estudio (Sellés et al., 2016; Tomlinson et al., 2015) de manera que una correlación de valores magnéticos con estas unidades representarían zonas interesantes en términos prospectivos.

Para generar el mapa predictivo se digitalizaron franjas regionales de anomalías magnéticas negativas menores a  $-100$  nT de dimensiones mayores a  $10$  km en dirección EO y mayores a  $5$  km en dirección NS. Por último, las anomalías positivas mayores a  $100$  nT asociadas a los complejos intrusivos eocenos se digitalizaron localmente en las cercanías a los complejos intrusivos Yabricoya y Alantaya (Figura 5.5).



*Figura 5.5: Mapa predictivo de magnetometría indicando zonas de anomalías magnéticas regionales negativas menores a  $-100$ nT, y anomalías magnéticas locales positivas mayores a  $100$ nT relacionadas con los complejos intrusivos eocenos.*

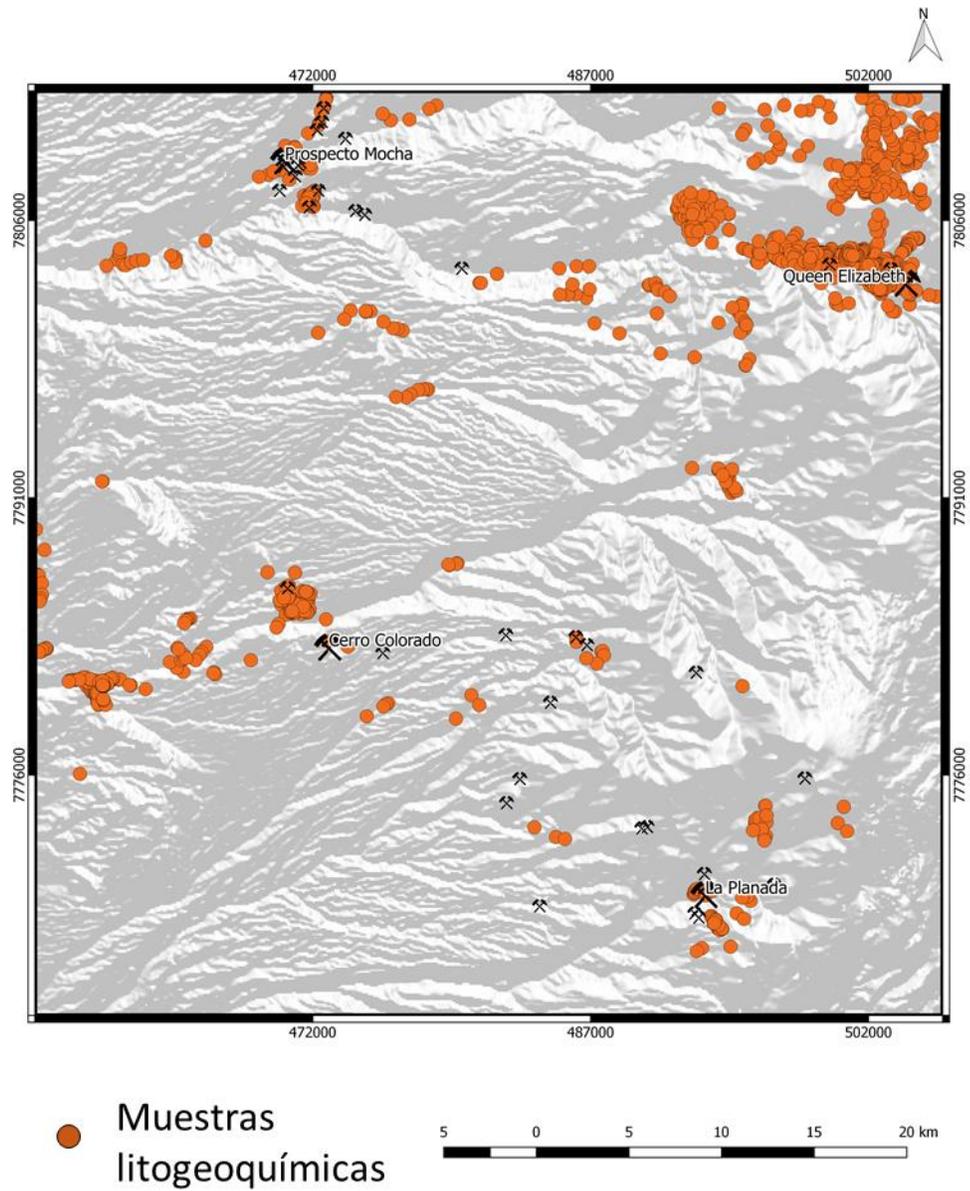
### 5.3 Litogeoquímica regional

La prospección geoquímica, es una herramienta útil durante la exploración minera, pues su aplicación permite cubrir grandes superficies de terreno en tiempos relativamente cortos y sin mucho costo (Rodríguez, 2012).

La exploración geoquímica se basa en que los depósitos minerales son concentraciones “anómalas” de uno o más metales donde existe una dispersión de elementos en torno a cuerpos mineralizados. Como la dispersión es más amplia que el cuerpo mineralizado mismo, la geoquímica permite definir blancos de exploración. Dentro de los elementos indicadores o pathfinders asociados a depósitos de pórfidos cupríferos se encuentran los siguientes: Ag, As, Au, Cu, Hg, Mo, Pb, Re, Sb, Te, Zn (Maksaev, comunicación escrita, 2016).

Los datos litogeoquímicos fueron obtenidos por parte de la empresa Exploraciones Mineras Andinas S.A. en formato CSV de 1189 muestras colectadas de roca superficial y analizadas por Cu, Mo, As, Pb y Zn mediante Absorción Atómica (AA). Las campañas geoquímicas fueron realizadas durante los años 2005 a 2014 en el contexto de exploración básica de la gerencia de exploraciones de Codelco dentro del proyecto pórfidos norte.

La distribución de los datos litogeoquímicos se muestran en la Figura 5.6, donde se observan agrupaciones de datos cercanos a los yacimientos de pórfidos cupríferos más relevantes de la zona de estudio.



*Figura 5.6: Distribución de las muestras litogeoquímicas en la zona de estudio con análisis de Cu, Mo, As, Pb y Zn, mediante absorción atómica.*

En el desarrollo de este trabajo, se manejaron los datos geoquímicos en dos zonas por separado, dividiéndose en: Franja Paleoceno -Eoceno Inferior y Franja Eoceno Medio - Superior.

La zona correspondiente al área de la Franja metalogénica del Paleoceno -Eoceno Inferior en la mitad oeste de la zona de estudio y la segunda zona corresponde a la Franja Eoceno Medio - Superior, al este de la zona de estudio, se encuentran divididos por la coordenada UTM 480000E. Estas dos zonas se pudieron englobar en una sola área, pero para los fines de análisis se trabajaron por separado, debido a que los valores de fondo geoquímicos, a nivel regional, son distintos para cada franja metalogénica (Townley, comunicación oral, 2018).

### 5.3.1 Sector franja Paleoceno – Eoceno Inferior

#### Estadísticas básicas

De las muestras mostradas en Figura 5.6, se realizó el análisis estadístico para conocer las posibles anomalías de concentración de elementos de 332 muestras entre las coordenadas en formato UTM 457000 Este, 7763000 Norte y las coordenadas 480000 Este, 7813000 Norte. Los parámetros estadísticos básicos como media, desviación estándar, valor máximo y mínimo se determinaron sobre la distribución de valores, utilizando las concentraciones en partes por millón de cobre, molibdeno, arsénico, plomo y zinc (Tabla 5.1).

*Tabla 5.1: Estadísticas básicas de litogeoquímica de la franja metalogénica del Paleoceno - Eoceno inferior.*

	<i>Cu [ppm]</i>	<i>Mo [ppm]</i>	<i>As [ppm]</i>	<i>Pb [ppm]</i>	<i>Zn [ppm]</i>
<b>Promedio</b>	221	6	51	164	57
<b>Mediana</b>	36	4	40	8	40
<b>Moda</b>	15	3	3	7	10
<b>Desviación Estándar</b>	1487	7	46	2553	110
<b>Mínimo</b>	0.5	0.5	2.5	0.5	2.0
<b>Máximo</b>	25527	54	354	46517	1702
<b>Nº de muestras</b>	332	332	332	332	332

#### Correlación entre elementos

Uno de los coeficientes de correlación más usado es el coeficiente de correlación lineal, que mide el grado en que los valores de dos variables son proporcionales entre ellos.

El coeficiente toma valores en el intervalo [-1; 1], correspondiendo +1 a una correlación lineal perfecta con pendiente positiva, - 1 a una correlación lineal perfecta con pendiente negativa y 0 indica la ausencia total de correlación lineal. Valores del coeficiente de correlación lineal entre [-1; -0.7] y [0.7; 1] indican correlaciones significativas negativas y positivas, respectivamente. Una de las ventajas de este coeficiente es que el valor del coeficiente no depende de las unidades de medidas.

Para la correlación de los elementos del sector occidental de la zona de estudio (franja Paleoceno-Eoceno Superior), basado en las variables Cu, Mo, As, Pb y Zn, se utilizó como herramienta simple el software de Excel.

El siguiente paso fue el análisis de datos para sacar el coeficiente de correlación de los elementos y determinar qué elementos son correlacionables entre sí, resumido en la matriz de correlación (Tabla 5.2).

*Tabla 5.2: Matriz de correlación de elementos de la franja metalogénica del Paleoceno - Eoceno inferior dentro de la zona de estudio.*

	<b><i>Cu</i></b>	<b><i>Mo</i></b>	<b><i>As</i></b>	<b><i>Pb</i></b>	<b><i>Zn</i></b>
<b><i>Cu</i></b>	1				
<b><i>Mo</i></b>	0.033	1			
<b><i>As</i></b>	0.004	0.352	1		
<b><i>Pb</i></b>	0.011	0.290	0.368	1	
<b><i>Zn</i></b>	0.061	-0.022	0.213	0.299	1

La matriz de correlación no presenta valores que sobrepasen el 0.4, obteniendo como valor máximo, en términos de valor absoluto, el 0.368 en el caso del Pb-As. Lo anterior indica que no hay una correlación significativa entre los elementos analizados.

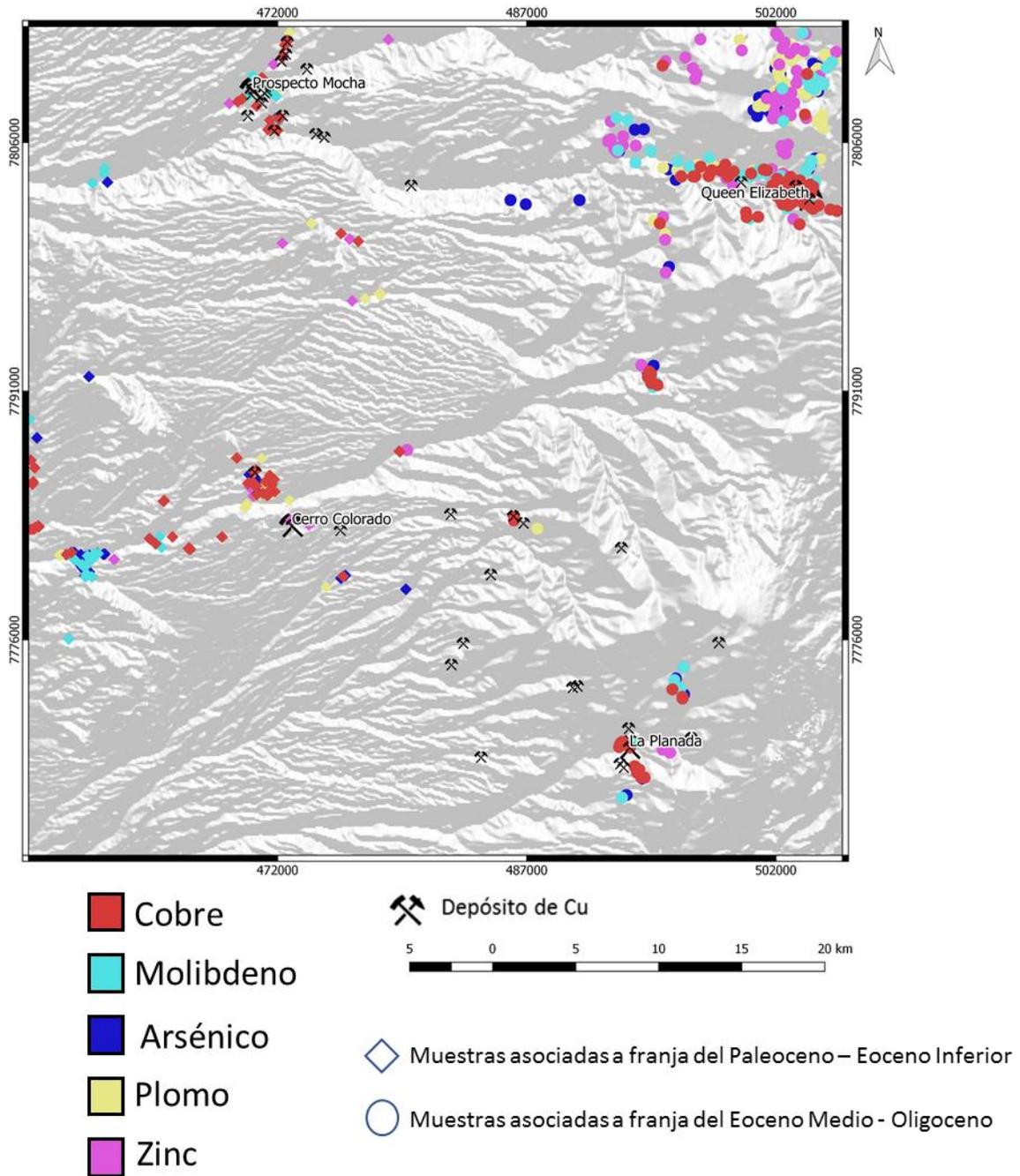
### **Definición de zonas anómalas**

Las zonas geoquímicas con anomalías positivas se definieron como los valores del 20% superior de la población de concentraciones para cada elemento (Tabla 5.3).

*Tabla 5.3: Valores del umbral límite de concentración de elementos para considerarlos interesantes en términos prospectivos, dentro de la franja metalogénica del Paleoceno - Eoceno inferior en la zona de estudio.*

	<b><i>Cu [ppm]</i></b>	<b><i>Mo [ppm]</i></b>	<b><i>As [ppm]</i></b>	<b><i>Pb [ppm]</i></b>	<b><i>Zn [ppm]</i></b>
<b>Valor que separa el cuarto del quinto quintil superior (Percentil 80)</b>	91	9	81	20	74

La distribución de las anomalías geoquímicas positivas para ambas franjas se muestra en la Figura 5.7.



*Figura 5.7: Valores de concentración de elementos sobre el umbral para cada franja metalogénica.*

Dada la distribución fuertemente agrupada de las muestras geoquímicas de la zona de estudio (Figura 5.6) se procedió a desagrupar los datos. Para esto, se dividió el sector de la franja Paleoceno – Eoceno Inferior en celdas o píxeles de 100m x 100m, de manera que el valor de cada celda sea el promedio de los elementos de todos los puntos dentro de la celda. Las celdas que no presenten muestras en su interior se le asignaron pesos nulos para efectos del análisis prospectivo.

### 5.3.2 Sector franja Eoceno Medio – Oligoceno

#### Estadísticas básicas

De las muestras de la Figura 5.6 se realizó el análisis estadístico para conocer la distribución y posibles anomalías de concentración de elementos de 857 muestras entre las coordenadas en formato UTM 480000 Este, 7763000 Norte y las coordenadas 506000 Este, 7813000 Norte. Los parámetros estadísticos básicos como media, desviación estándar, valor máximo y mínimo se determinaron sobre la distribución de valores, utilizando las concentraciones en partes por millón de cobre, molibdeno, arsénico, plomo y zinc (Tabla 5.4).

*Tabla 5.4: Estadísticas básicas de litogeoquímica de la franja metalogénica del Eoceno medio- Oligoceno.*

	<i>Cu [ppm]</i>	<i>Mo [ppm]</i>	<i>As [ppm]</i>	<i>Pb [ppm]</i>	<i>Zn [ppm]</i>
<b>Promedio</b>	642	15	39	30	74
<b>Mediana</b>	52	5	20	9	41
<b>Moda</b>	24	5	5	5	5
<b>Desviación Estándar</b>	3911	45	68	101	153
<b>Mínimo</b>	1	0.5	0.25	0.5	1
<b>Máximo</b>	81636	750	755	1672	2287
<b>Nº de muestras</b>	857	857	857	857	857

#### Correlación entre elementos

Para la correlación de los elementos del sector oriental de la zona de estudio (franja Eoceno Medio - Oligoceno), basado en las variables Cu, Mo, As, Pb y Zn, se utilizó como herramienta simple el software de Excel.

El siguiente paso fue el análisis de datos para sacar el coeficiente de correlación de los elementos y determinar qué elementos son correlacionables entre sí resumido en la matriz de correlación (Tabla 5.5).

*Tabla 5.5: Matriz de correlación de elementos de la franja metalogénica del Eoceno medio – Oligoceno dentro de la zona de estudio.*

	<i>Cu</i>	<i>Mo</i>	<i>As</i>	<i>Pb</i>	<i>Zn</i>
<i>Cu</i>	1				
<i>Mo</i>	0.108	1			
<i>As</i>	0.028	0.164	1		
<i>Pb</i>	0.272	0.052	0.324	1	
<i>Zn</i>	0.150	-0.009	0.232	0.332	1

La matriz de correlación no presenta valores que sobrepasen el 0.4, obteniendo como valor máximo, en términos de valor absoluto, el 0.324 en el caso del Pb-As y el 0.332 para el Pb-Zn. Lo anterior indica que no hay una correlación significativa entre los

elementos analizados.

### **Definición de zonas anómalas**

Las zonas geoquímicas con anomalías positivas se definieron como los valores del 20% superior para cada elemento (Tabla 5.6).

*Tabla 5.6: Valores del umbral límite de concentración de elementos para considerarlos interesantes en términos prospectivos, dentro de la franja metalogénica del Eoceno medio - Oligoceno en la zona de estudio.*

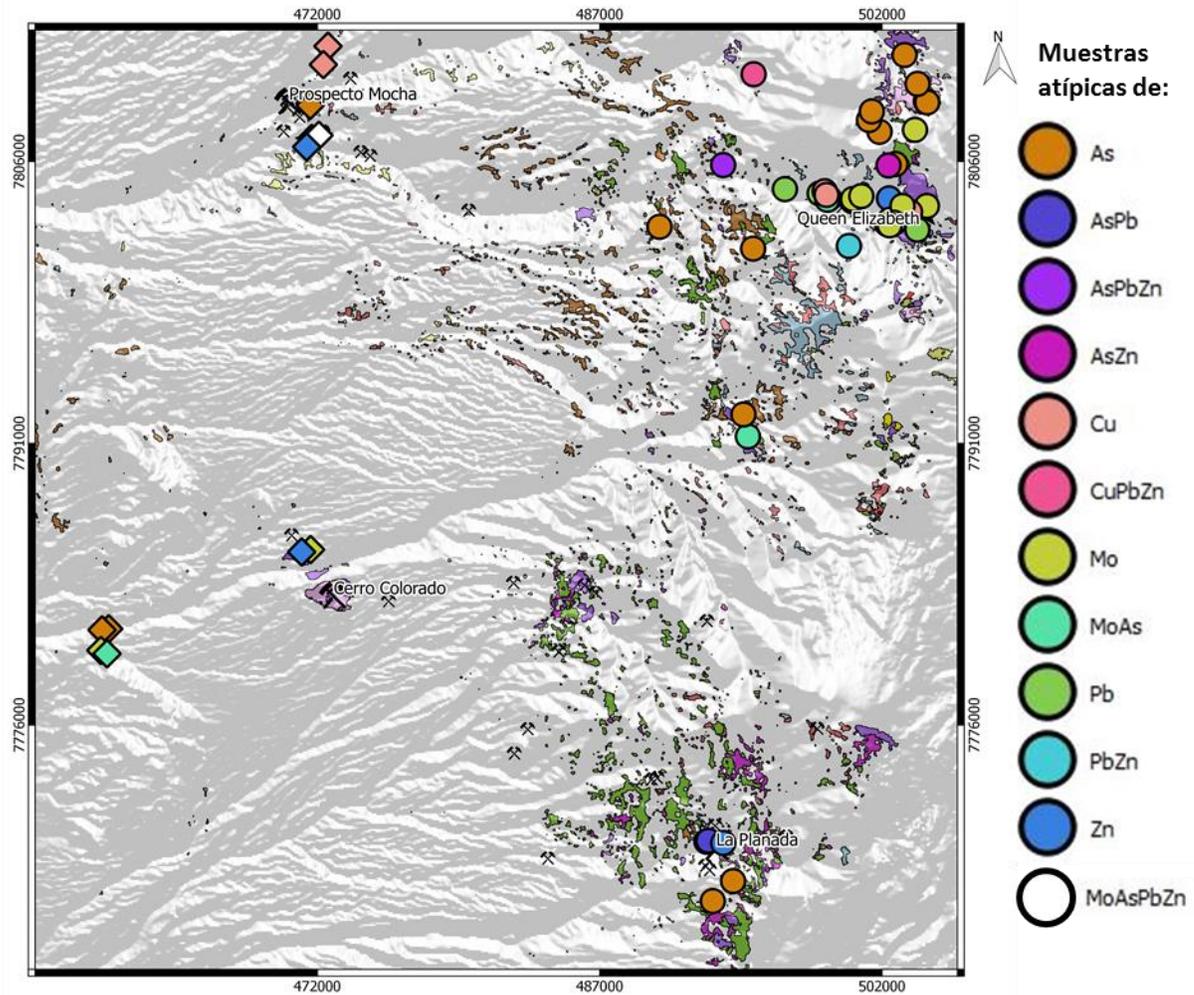
	<i>Cu [ppm]</i>	<i>Mo [ppm]</i>	<i>As [ppm]</i>	<i>Pb [ppm]</i>	<i>Zn [ppm]</i>
<b>Valor que separa el cuarto del quinto quintil superior (Percentil 80)</b>	247	11	54	28	85

La distribución de las anomalías geoquímicas positivas se muestran en la Figura 5.7.

Dada la distribución fuertemente agrupada de las muestras geoquímicas de la zona de estudio (Figura 5.6) se procedió a desagrupar los datos. Para esto, se dividió el sector de la franja Eoceno medio - Oligoceno en celdas o pixeles de 100m x 100m, de manera que el valor de cada celda sea el promedio de los elementos de todos los puntos dentro de la celda. Las celdas que no presenten muestras en su interior se le asignaron pesos nulos para efectos del análisis prospectivo.

### **5.3.3 Datos atípicos**

Los valores atípicos (outliers) son aquellos valores alejados de la población normal en base a los demás elementos. Para cada elemento se determinaron como valores outliers aquellos valores que estuvieran bajo o sobre la media  $\pm 3.5$ \*Desviación Estándar para cada elemento de cada franja por separado. Los datos atípicos que presentaron valores lejanos a la distribución de la población son el Cu, Mo, As, Pb y Zn, en donde los puntos de valores atípicos obtenidos de estos elementos fueron representados junto a los minerales y alteraciones teledetectadas como se observa en la Figura 5.8.



**Alteraciones y minerales teledetectados:**



- Muestras asociadas a franja del Paleoceno – Eoceno Inferior
- Muestras asociadas a franja del Eoceno Medio - Oligoceno

Figura 5.8: Valores atípicos de litogeoquímica para las franjas metalogénicas del Paleoceno - Eoceno inferior y Eoceno Medio - Oligoceno. Los elementos analizados son Cu, Mo, As, Pb y Zn que se muestran junto a los minerales y alteraciones teledetectadas.

Los datos atípicos de la zona de estudio se ubican en las cercanías de los yacimientos de pórfidos cupríferos de Mocha, Cerro Colorado, Queen Elizabeth y La Planada. Las muestras catalogadas como outliers cercanas a los yacimientos de la zona de estudio están asociadas a la cercanía de mineralización de cobre junto a asociaciones minerales y alteraciones alrededor de pórfidos cupríferos.

Los valores outliers pueden representar valores asociados a errores de medición o muestreo que no representan el valor real de la muestra. Sin embargo, existen casos que los valores de concentraciones geoquímicas se realizan en rocas mineralizadas y que perfectamente podrían indicar valores altos atípicos estadísticamente pero no geológicamente.

En la zona de estudio, los valores atípicos no se eliminaron por dos razones, una geológica y otra estadística:

- La razón geológica es que los valores atípicos de la zona de estudio pueden estar representando rocas mineralizadas tanto por minerales de cobre (antlerita, malaquita, calcopirita, bornita, etc..) como otros minerales de Mo, As, Pb o Zn como molibdenita, enargita, galena y esfalerita.
- El fundamento estadístico se basa en el cálculo de las matrices de correlación y los valores de los percentiles 80 sin considerar los valores atípicos, que fueron comparados con las matrices de correlación y los percentiles 80 considerando estos mismos valores atípicos. Los resultados de esto (Anexos C a J) indican que la correlación entre elementos sigue siendo irrelevante (menor a 0.4) y que los valores de umbral o los percentiles 80 no varían de manera significativa.

## **5.4 Estructuras**

### **5.4.1 Fallas**

Las fallas y fracturas actúan como canales de transporte de fluidos mineralizadores y generan espacios en donde los minerales pueden precipitar.

Los yacimientos de la zona de estudio se relacionan a estructuras de orientación predominantemente NS, activas en diferentes períodos, pero con la principal característica de corresponder a fallas mayores de alto ángulo y en algunos casos relacionadas con inversión de fallas normales mesozoicas, las cuales habrían favorecido el emplazamiento de cuerpos intrusivos desde los cuales provendría la mineralización primaria o exótica (Morandé et al., 2015).

Los prospectos Queen Elizabeth y La Planada de la franja del Eoceno Medio – Oligoceno se estima que se encuentran cercanos (menor a 6 kilómetros) o dentro de una prolongación septentrional del sistema de fallas Domeyko (Gardeweg & Sellés, 2013). Este sistema de fallas está caracterizado por fallas de orientación NS dextrales e inversas, siendo estas últimas de alto ángulo y vergencias alternantes este y oeste (Amilibia & Skarmeta, 2003).

Por lo tanto, para la creación del mapa predictivo de fallas se seleccionaron fallas inversas de orientación  $NS \pm 20^\circ$ . Se escogieron solo fallas inversas debido a que, dentro de la zona de estudio, la única falla con movimiento relativo del tipo dextral es la falla Imagua que

presenta una orientación ONO. Tres zonas de distancia buffer de 2, 4 y 6 km fueron añadidos a las fallas seleccionadas (Figura 5.9) de manera de definir zonas estructurales favorables para la ocurrencia de pórfidos cupríferos.

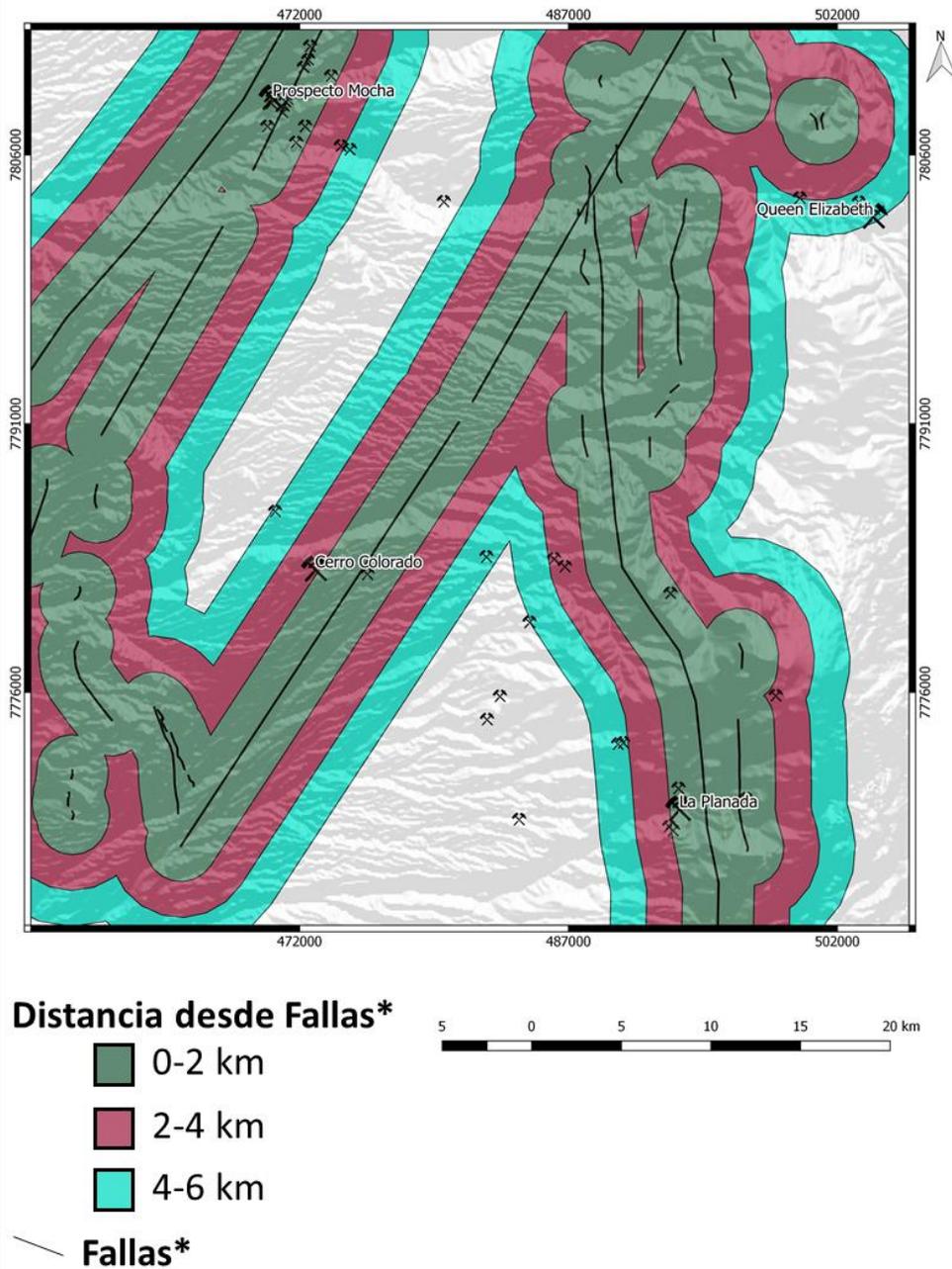
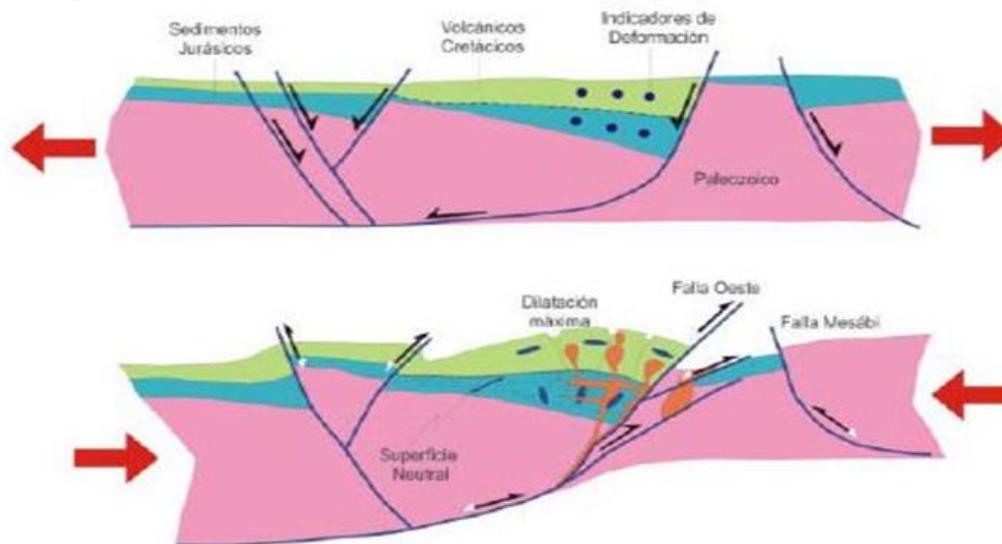


Figura 5.9: Distancias desde fallas\* (fallas inversas, de orientación preferencial  $NS\pm 20^\circ$ ).

### 5.4.2 Pliegues

En el Norte de Chile el emplazamiento de magmas asociados a pórfidos cupríferos de la franja Eoceno Medio – Oligoceno está vinculada con fallas inversas de alto ángulo de la Cordillera de Domeyko. Estas fallas de carácter extensional durante el Triásico/Jurásico

Superior/Cretácico Inferior fueron reactivadas en modo inverso generando anticlinales de inversión (Figura 5.10) (Amilibia & Skarmeta, 2003).

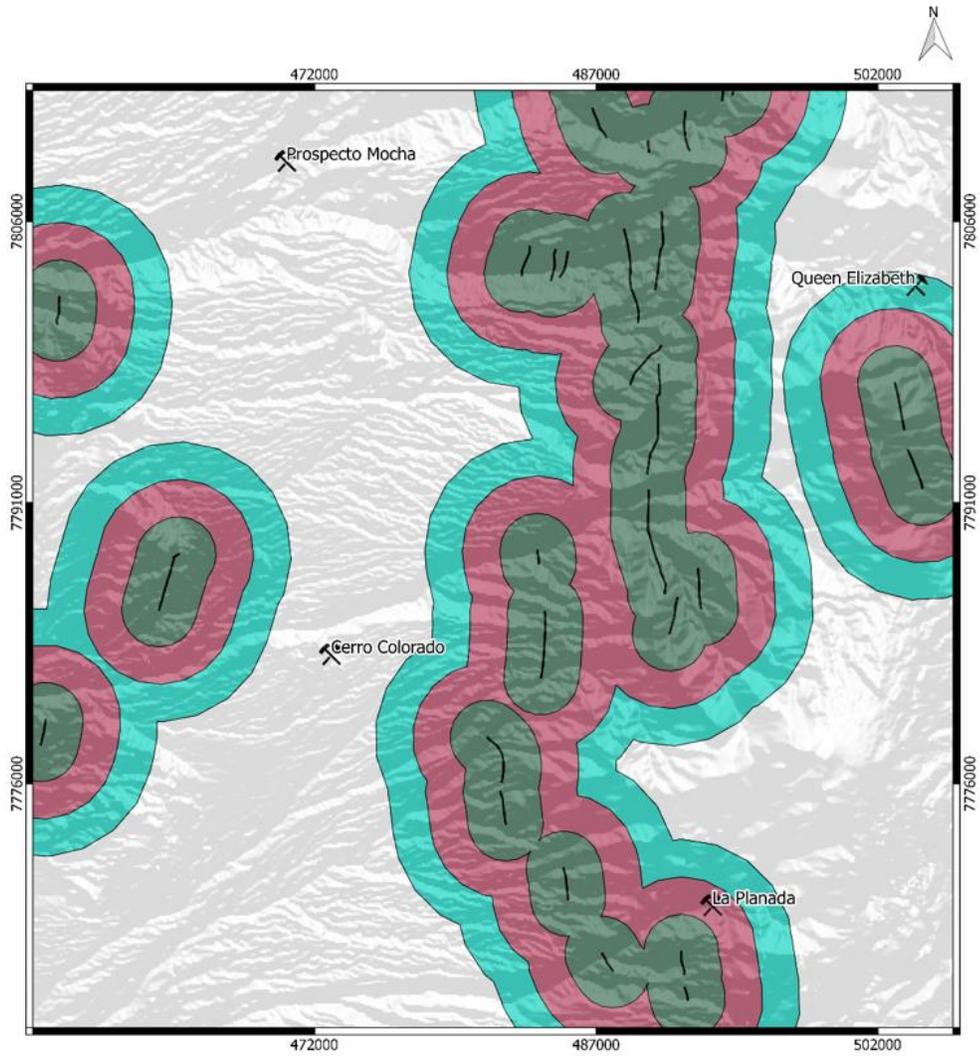


*Figura 5.10: Modelo conceptual que muestra el contexto estructural de emplazamiento de pórfidos cupríferos del Norte de Chile. Arriba, semi graben extensional desarrollado sobre basamento Paleozoico. Abajo, sistema de anticlinal de inversión y, en naranja, magmas del Eoceno-Oligoceno asociados a pórfidos cupríferos que se emplazaron como filones y diques tabulares (Amilibia & Skarmeta, 2003).*

En base al modelo de la Figura 5.10, los anticlinales de inversión asociados al emplazamiento de pórfidos cupríferos del Eoceno Medio -Oligoceno se habrían generado posterior al cretácico, entre el paleoceno a oligoceno.

Los prospectos Queen Elizabeth y La Planada se encuentran cercanos (menor a 6 kilómetros) a ejes de anticlinales que afectan únicamente a unidades jurásicas, cretácicas y paleocenas.

Para reflejar los pliegues anticlinales de inversión asociados espacialmente a los pórfidos cupríferos de la franja del Eoceno Medio -Oligoceno, se seleccionaron anticlinales que afectan a unidades jurásicas a eocenas. En consecuencia, la creación del mapa predictivo se crearon tres zonas de distancia (buffer) de 2, 4 y 6 km hacia los pliegues seleccionados (Figura 5.11) de manera de definir zonas estructurales favorables para la ocurrencia de pórfidos cupríferos.



**Distancia desde Anticlinales\***

0-2 km

2-4 km

4-6 km

Anticlinales\*



Figura 5.11: Distancias desde ejes de anticlinales\* (pliegues anticlinales, de orientación preferencial NS±20° que afectan a unidades geológicas de edades jurásicas a eocenas).

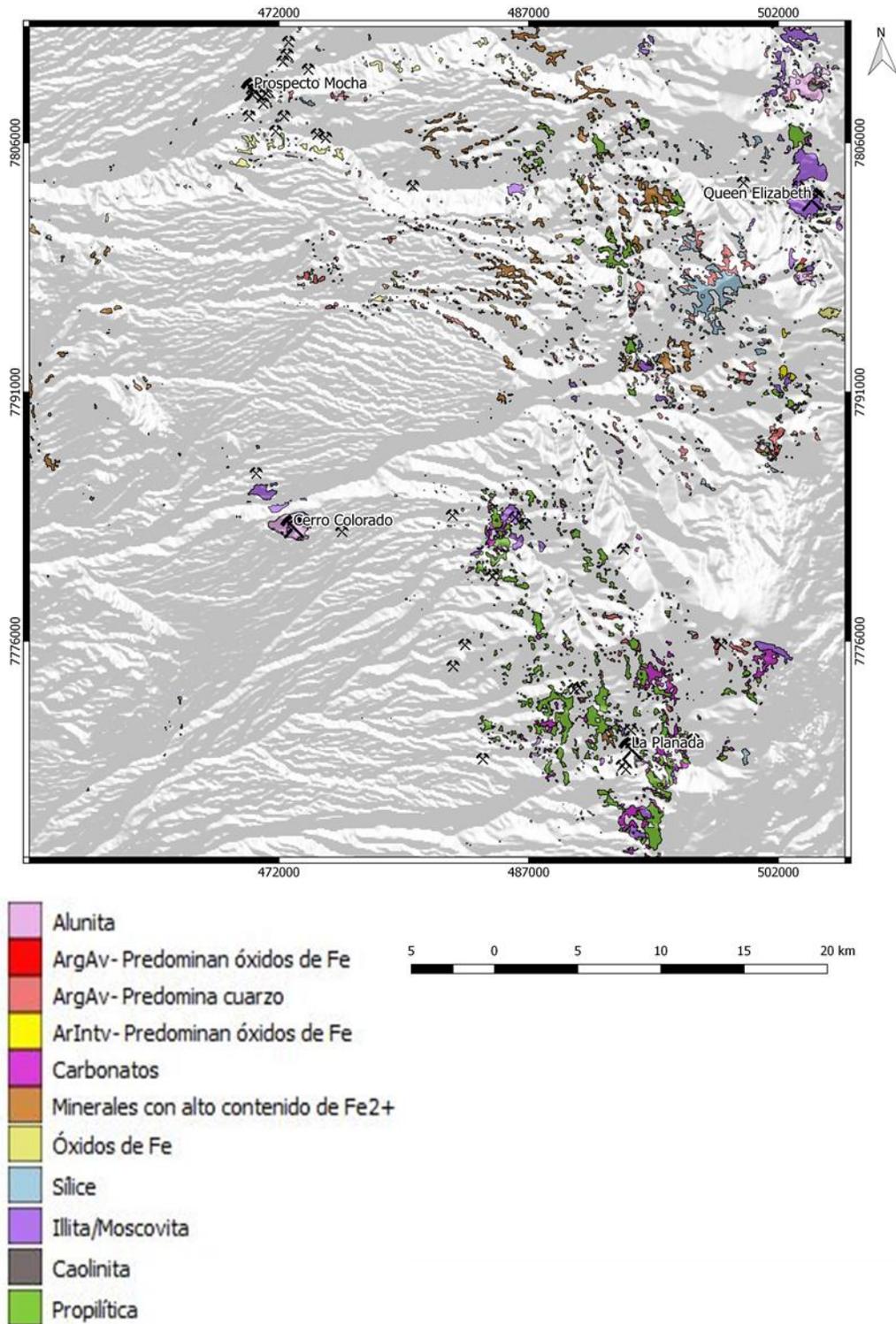
## 5.5 Alteración hidrotermal

Dada la extensa y variadas alteraciones hidrotermales asociadas con Cerro Colorado y otros yacimientos de cobre de la zona de estudio, es importante identificar las alteraciones hidrotermales diagnósticas para el modelamiento y la integración de datos. La principal alteración hidrotermal asociada con los yacimientos Cerro Colorado, Mocha y Queen Elizabeth son las filica, argílica avanzada y argílica intermedia. La alteración propilítica también ocurre en estos depósitos minerales, pero es más bien distal. Presencia de minerales como alunita y óxidos de hierro son otros componentes fuertemente asociados a estos yacimientos.

Las alteraciones hidrotermales dentro de la zona de estudio fueron obtenidas por el Ingeniero Jaime Backitt como consultor para la empresa Exploraciones Andinas S.A mediante el procesamiento de imágenes satelitales. La metodología se basó en trabajos de Alvaro Crosta (Crosta & Moore, 1989) aplicándola a imágenes LANDSAT para localizar alteraciones y minerales de la zona de estudio. En el trabajo de Jaime Beckitt se utilizaron 7 bandas multiespectrales con resolución espacial de 30 metros (equivalente a escala 1:100.000) (Lattus, comunicación escrita, 2018) dentro de gran parte del Norte de Chile, desde Arica hasta Atacama.

Las edades de las alteraciones asociadas a mineralizaciones hipógenas de los pórfidos cupríferos en la zona de estudio son Paleocenas a Oligocenas (Bouzari & Clark, 2006; Tomlinson et al., 2015). A su vez, existen procesos supergenos posteriores a los eventos de alteración hipógenos del Paleoceno a Oligoceno que generan oxidados de cobre y alteración argílica junto a minerales tales como alunita y óxidos de hierro (Bouzari & Clark, 2002).

Dado lo anterior, para la creación del mapa predictivo (Figura 5.12), no se consideraron las alteraciones y minerales teledetectados que afectan a unidades geológicas post-oligocenas.



*Figura 5.12: Alteraciones y minerales teledetectados que afectan a unidades pre-miocenas en la zona de estudio.*

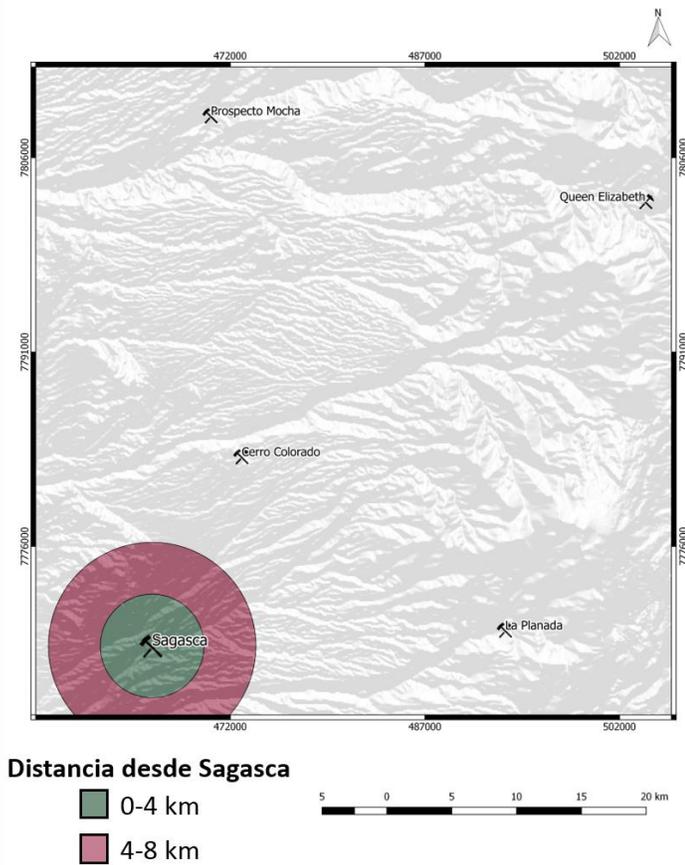
## 5.6 Yacimiento exótico sin fuente reconocida de cobre

El yacimiento cuprífero Sagasca, ubicado a 10 km al SSE del Cerro Duplijsa, corresponde a un depósito exótico de cobre hospedado en los conglomerados de la Formación Altos de Pica.

Los depósitos exóticos se forman por la oxidación de sulfuros de un yacimiento de pórfido de cobre y el transporte lateral de los fluidos ácidos, enriquecidos en Cu (Sillitoe, 2005). Los fluidos reaccionan con los sedimentos y rocas, consumiendo el ácido hasta que precipitan los minerales de cobre. Aunque varían las distancias sobre las cuales este proceso actúa, observaciones empíricas de ejemplos donde la fuente se conoce, indican que los depósitos exóticos no exceden una distancia de 8 km desde su pórfido madre (Munchmeyer, 1996; Tomlinson et al., 2015).

El único pórfido de cobre conocido en la zona con un tamaño suficiente para ser la fuente de Sagasca, corresponde al yacimiento Cerro Colorado. Sin embargo, el yacimiento Cerro Colorado está ubicado a 15 km del yacimiento Sagasca, por lo cual, basado en ejemplos empíricos, no podría ser su fuente (Tomlinson et al., 2015).

Para generar la capa predictiva asociada al yacimiento exótico Sagasca se crearon dos polígonos de 4 y 8 km de distancia desde el yacimiento (Figura 5.13).



*Figura 5.13: Mapa predictivo de distancia a yacimiento exótico sin fuente (Sagasca).*

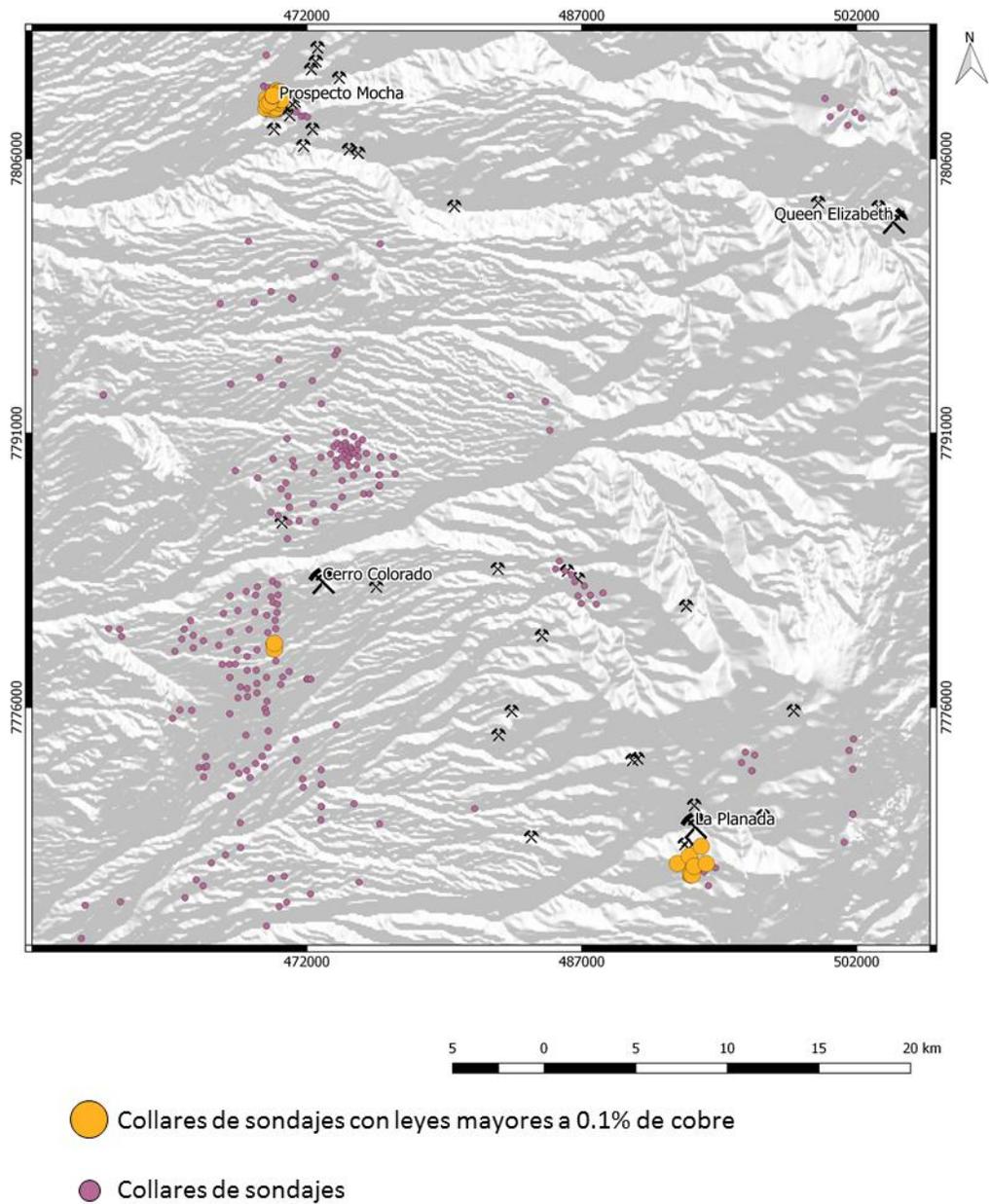
## 5.7 Cercanía a sondajes exploratorios y muestras geoquímicas

Las ubicaciones de los collares de sondajes con sus respectivas leyes de cobre fueron facilitadas por la empresa Exploraciones Mineras Andinas S.A. de 350 sondajes. Los distintos sondajes fueron perforados mediante aire reverso o diamantina para diversas empresas tales como Codelco, Teck Royal Silver, Asarco Inc., Conoco, entre otras.

Los sondajes exploratorios son perforaciones que requieren de grandes cantidades de capital para realizarse. Estos sondajes se realizan en sectores donde se espera encontrar un yacimiento mineral o delimitarlo, por lo que los sectores donde se han realizado sondajes se efectúan análisis previos que han mostrado ser interesantes en términos prospectivos.

En base a lo anterior e integrando las leyes de cobre de cada sondaje, se seleccionaron los sondajes que presenten porcentajes mayores a 0.1% de cobre. Luego, se generaron zonas de distancia de 2000 metros hacia los collares de los sondajes con altas leyes para delimitar zonas favorables en términos prospectivos. Cabe mencionar que, entre los 350 sondajes disponibles, solo 83 presentan análisis de cobre y 55 presentan leyes de cobre

sobre el 0.1% (Figura 5.14).



*Figura 5.14: Distribución de sondajes dentro de la zona de estudio destacando aquellos que presentan leyes de cobre mayores a 0.1% de cobre.*

## **6. Integración de mapas predictivos y validación del modelo**

El mapa prospectivo final se realizó combinando mapas predictivos usando una función que caracteriza la interacción y las relaciones entre el mapa predictivo y los procesos que controlan el sistema de mineralización. Mapas prospectivos preparados con métodos basados en el conocimiento (knowledge – driven) como la lógica booleana, la superposición ponderada y lógica difusa, se generan ponderando, combinando y analizando los mapas del predictor y sus clases de acuerdo con la opinión de expertos. Estas opiniones están basadas en las características del depósito mineral buscado y criterios de identificación determinados de acuerdo con el modelo conceptual (Carranza & Laborte, 2014).

En el presente trabajo, la asignación de valores de peso a los mapas de predicción y sus clases se llevaron a cabo de acuerdo con las características de los pórfidos cupríferos comunes en la zona de estudio y el mundo.

Los mapas predictivos de cobre en el área de estudio se combinaron y analizaron utilizando el método de superposición ponderada de enfoque basado en el conocimiento y se generó el mapa prospectivo de la zona de estudio.

La técnica de superposición ponderada, utilizada para delinear las áreas favorables de mineralizaciones asociados a pórfidos de cobre en el área de estudio fue construido en base a los siguientes pasos:

1. Transformación de mapas predictivos a imágenes raster
2. Asignación de pesos a las clases de los mapas predictivos
3. Asignación de pesos relativos porcentuales a los mapas predictivos
4. Integración de los mapas predictivos por superposición ponderada
5. Definición de valores de umbral para el mapa prospectivo
6. Validación con pórfidos cupríferos conocidos

### **6.1 Mapas predictivos a imágenes raster**

En primer lugar, los criterios de exploración fueron convertidos en imágenes tipo raster de clases múltiples, con una extensión y tamaño de celda comunes para la integración de datos. La extensión corresponde a los límites de la zona de estudio y el tamaño de celda es de 100 m x 100 m. De esta manera, la zona de estudio de extensión EO de 49 km y NS de 50 km, se dividió en 24500 celdas.

### **6.2 Asignación de pesos a las clases de los mapas predictivos**

En el segundo paso, los criterios de exploración para la zona de estudio fueron utilizados en base a conocimiento geológico experto para asignar pesos a las clases de los mapas predictivos en intervalos enteros de -3 a 3. El -3 y el 3 representan los pesos menos y más favorables, respectivamente, para la ocurrencia de pórfidos cupríferos (Tabla 6.1).

Tabla 6.1: Mapas predictivos con sus respectivos pesos relativos entre ellos y pesos de sus clases.

Mapa predictivo y clase	Peso de la clase	Peso del mapa
Mapa predictivo unidades geológicas		0.2
Formación Quipisca	1	
Formación Juan de Morales	1	
Formación Mamiña	1	
Estratos Sierra de Lagunas	1	
Formación Longacho	2	
Formación Duplijsa	2	
Formación Copaquire	2	
Formación Cerro Empexa	3	
Intrusivos Plutónicos del Cretácico Superior	1	
Intrusivos hipabisales del Cretácico Superior	1	
Intrusivos hipabisales de Quebrada de Tarapacá	3	
Intrusivos hipabisales Mocha	3	
Intrusivos hipabisales del Paleoceno	3	
Complejo Intrusivo Cerro Colorado	3	
Complejo Intrusivo Yabricoya	3	
Cuerpos hipabisales del Eoceno	3	
Formación Icanche	2	
Complejo Intrusivo Alantaya	3	
Formación Altos de Pica	2	
Formación Utayane	2	
Ignimbrita Tambillo	-3	
Ignimbrita Huasco	-3	
Formación El Diablo	-3	
Volcanes y secuencias volcánicas del Mioceno Medio	-3	
Volcanes y secuencias volcánicas del Mioceno Superior	-3	
Mapa predictivo alteraciones teledetectadas		0.2
Slicificación	2	
Argílica Avanzada - Predominan óxidos de Fe	3	
Caolinita	2	
Illita/Moscovita	3	
Argílica Avanzada - Predomina cuarzo	3	
Propilítica	2	
Óxidos de Fe	2	
Alunita	3	
Carbonatos	-1	
Minerales con alto contenido de Fe <sup>2+</sup> (ferroso)	2	
Argílica intermedia - Predominan óxidos de Fe	3	
Pliegues afectan a unidades jurásicas a paleocenas		0.05
Proximidad al eje de anticlinal (0-2 km)	3	

Proximidad al eje de anticlinal (2-4 km)	2	
Proximidad al eje de anticlinal (4-6 km)	1	
Proximidad al eje de anticlinal (>6 km)	-2	
Fallas inversas de orientación NS		0.15
Proximidad a la traza de falla (0-2 km)	3	
Proximidad a la traza de falla (2-4 km)	2	
Proximidad a la traza de falla (4-6 km)	1	
Proximidad a la traza de falla (>6 km)	-2	
Proximidad exóticos sin fuentes (Sagasca)		0.1
Proximidad a Sagasca (0-4 km)	3	
Proximidad a Sagasca (4-8 km)	2	
Magnetometría		0.05
Anomalías magnéticas negativas	2	
Anomalías magnéticas positivas	2	
Litogeoquímica		0.15
Anomalías positivas de Cu	3	
Anomalías positivas de Mo, As, Pb o Zn	2	
Proximidad collares de sondajes		0.1
Proximidad a collar de sondaje con leyes altas de Cu (<500m)	3	

Los pesos asignados a cada clase fueron basados en los criterios de exploración. Si el criterio de exploración considera que la clase es favorable para la ocurrencia de pórfidos cupríferos, significa que el peso asignado es positivo. Si el criterio de exploración considera que la clase es desfavorable para la ocurrencia de pórfidos cupríferos, significa que el peso asignado es negativo. Por último, si el criterio de exploración considera que la clase es irrelevante o no hay datos en el punto, significa que el peso asignado es nulo o cero.

Para decidir qué tan positivo o qué tan negativo es la asignación de pesos, se utilizó un razonamiento estadístico y el conocimiento experto. Un ejemplo para el razonamiento estadístico para las unidades geológicas es si la mayoría de los pórfidos cupríferos están hospedados por intrusivos eocenos y otros pocos por la formación Copaquiere, entonces la asignación de pesos será mayor para los intrusivos eocenos que para la formación Copaquiere. En el caso de las alteraciones, aplicando conocimiento experto simple, los pórfidos cupríferos tienden a presentar alteración propilítica con poca mineralización en los alrededores del núcleo del yacimiento, mientras que las alteraciones potásica y fílica presentan la mayor parte de la mineralización hipógena ubicándose en el centro del yacimiento. Por lo tanto, la propilítica se le asignaría un menor peso que a las alteraciones potásica y fílica.

### **6.3 Asignación de pesos relativos porcentuales a los mapas predictivos**

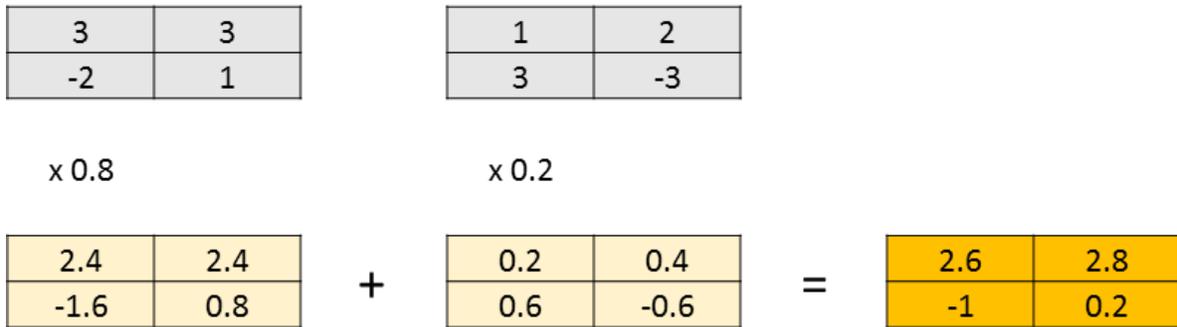
Los valores de peso porcentual se asignan de acuerdo con su importancia relativa para cada mapa predictivo (Tabla 6.1). De acuerdo con esto, el mayor valor de peso porcentual (20%) se asignó a los mapas predictivos de unidades geológicas, estructuras (pliegues y fallas) y alteraciones teledetectadas. Un 15% para el mapa predictivo de litogeoquímica y un 10% para la proximidad a collares de sondajes exploratorios y yacimiento Sagasca. Por último, un 5% para el mapa predictivo de magnetometría. La suma de los porcentajes de peso de todos los mapas predictivos es igual a 100 como un requisito del método de superposición ponderada.

Los pesos relativos de cada mapa predictivo se asignaron en base a la qué tan directa es la relación del mapa predictivo con respecto a la génesis de los pórfidos cupríferos. Esto queda mejor plasmado en un ejemplo: Se deben asignar pesos relativos a los mapas predictivos de alteraciones hidrotermales, geoquímica y magnetometría. Los pórfidos cupríferos presentan alteración hidrotermal y anomalías geoquímica de cobre dado que están genéticamente definidos con estas variables. Ahora, no todos los pórfidos cupríferos presentan valores magnetométricos similares. La magnetometría se utiliza como herramienta auxiliar en la exploración dado que no son datos directos, esta herramienta se utiliza para interpretar posibles unidades geológica, minerales o alteraciones en base a los valores del mapa magnetométrico. Por lo tanto, los mapas predictivos de alteración hidrotermal y geoquímica se le asigna un mayor peso relativo a que al de magnetometría.

### **6.4 Integración de mapas predictivos por superposición ponderada**

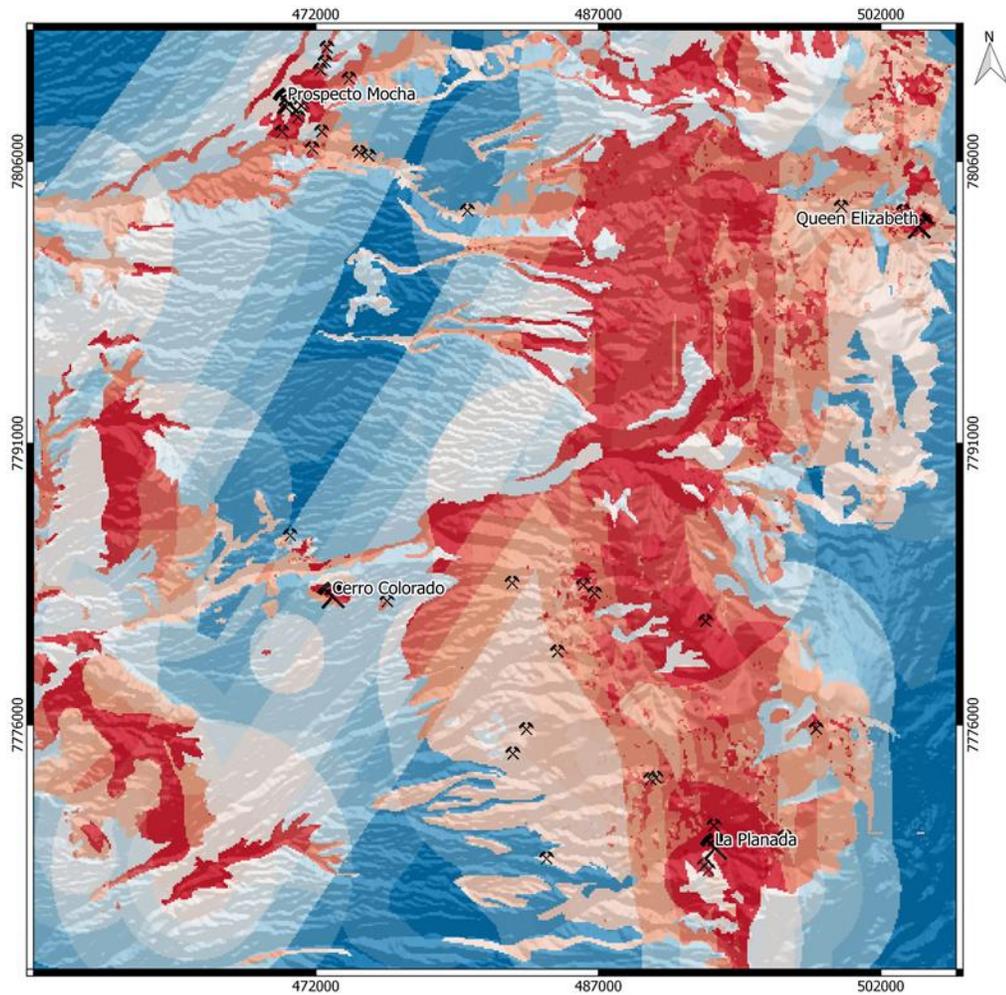
El mapa prospectivo generado en esta etapa es un componente funcional de todos los mapas predictivos. El rango de valores se encuentra entre -1 a 2.08, por lo tanto, entre más cercano sea el valor a 2.08 de una celda en el mapa prospectivo, más favorable será el sector para la ocurrencia de pórfidos cupríferos.

Para la integración de datos, cada celda resultante del mapa prospectivo por superposición ponderada es: “La sumatoria de la multiplicación de los pesos de las clases con los pesos relativos de los mapas predictivos”. En la Figura 6.1 se ilustra un ejemplo de cómo se asignan los valores a cada celda para el mapa prospectivo final.



*Figura 6.1 Esquema indicando un ejemplo de integración de dos mapas predictivos para asignar el valor de una celda en el mapa prospectivo final mediante superposición ponderada. El proceso es el siguiente; los pesos de las clases de los mapas predictivos (grises) de cada celda son multiplicados por el peso relativo de cada mapa predictivo (x0.8 y x0.2), este resultado (rosado) luego es sumado con los demás resultados de los mapas predictivos para obtener el resultado final (naranja).*

Los mapas predictivos ponderados por porcentaje se combinaron usando el método de superposición ponderada y se generó el mapa de potencial de exploración para pórfidos cupríferos en la zona de estudio (Figura 6.2).



Potencial de exploración



⚒ Yacimiento de cobre

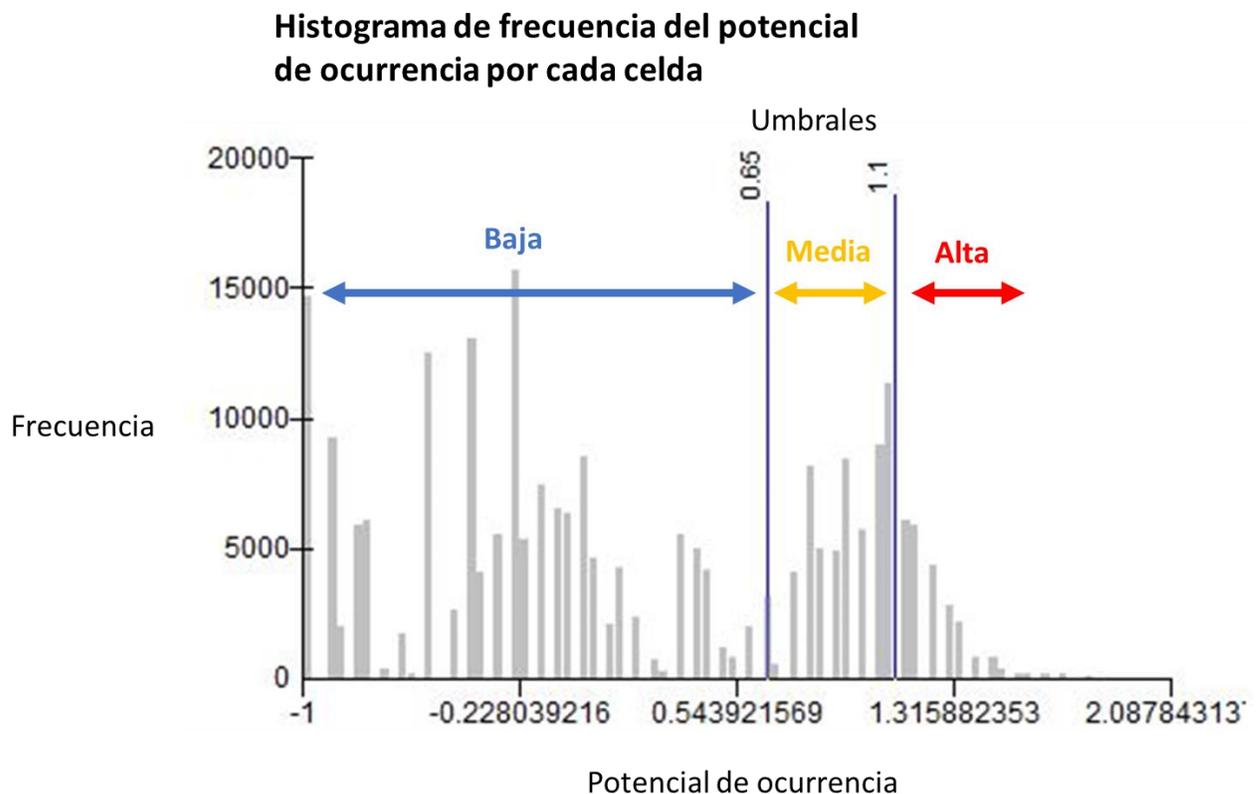
Figura 6.2: Mapa prospectivo indicando el potencial de exploración de pórfidos cupríferos en la zona de estudio. Colores rojos indican sectores favorables para la ocurrencia de pórfidos cupríferos, en cambio, sectores azules, indican sectores desfavorables para la ocurrencia de pórfidos cupríferos.

## 6.5 Definición de valores de umbral para el mapa prospectivo

Se definieron rangos de umbral para producir un mapa prospectivo que puede evaluarse de manera más efectiva. Para esto, se separaron los valores de la distribución del potencial de ocurrencia por cada celda en:

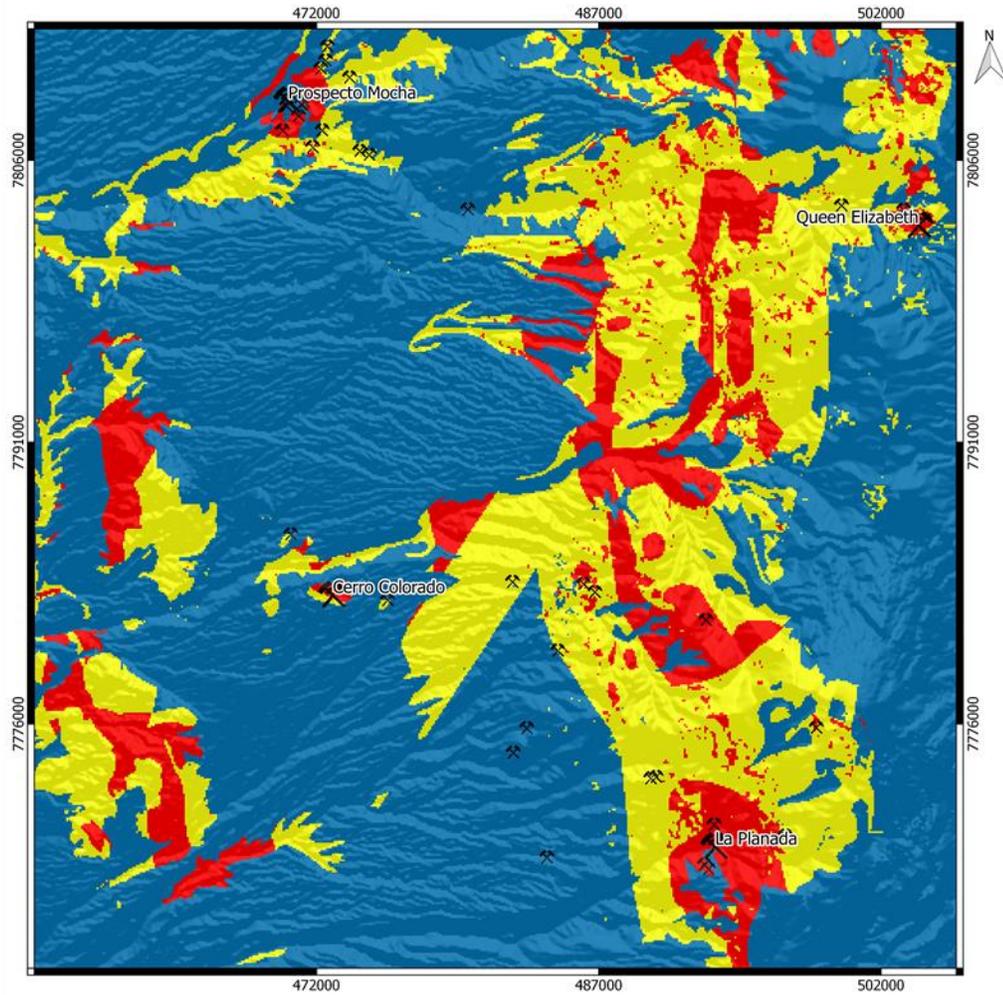
- Decil 10: Alto potencial de exploración
- Deciles 8 y 9: Moderado potencial de exploración
- Deciles 1 a 7: Bajo potencial de exploración

Los valores 0,65 y 1,1 corresponden a los valores que separan los deciles 7 con 8 y 9 con 10, respectivamente. Estos valores se utilizaron para dividir los valores del potencial de ocurrencia en valores nominales; alta, moderada y baja (Gráfico 6.1).



*Gráfico 6.1: Histograma del potencial de ocurrencia de pórfidos cupríferos para cada celda de la zona de estudio.*

Como resultado de este modelo predictivo, las áreas favorables para la exploración incorporando los umbrales se muestran en la Figura 6.3.



Potencial de ocurrencia

- Alta
- Moderada
- Baja



Yacimiento de cobre

*Figura 6.3: Mapa prospectivo reclasificado según valores de umbral.*

## 6.6 Validación con pórfidos cupríferos conocidos

El mapa prospectivo de la Figura 6.3 fue validado utilizando la ubicación de 35 yacimientos de cobre asociados a pórfidos cupríferos (Anexo B) de pequeña a gran escala que fueron obtenidos en base a literatura publicada y estudios geológicos dentro de la zona de estudio (Ordoñez & Rivera, 2004; Thomas 1967; Tomlinson et al., 2015; Morandé et al., 2015; Sellés et al., 2016). Cabe destacar que no se utilizaron yacimientos de tipo exótico dado que no representan los procesos de formación in-situ de un pórfido cuprífero.

Los resultados muestran que las zonas de potenciales altos y modelados cubren el 30% de la zona de estudio conteniendo el 88% de los pórfidos cupríferos de la zona de estudio (Tabla 6.2).

*Tabla 6.2: Validación del mapa prospectivo de superposición ponderada en base a los pórfidos cupríferos conocidos de la zona de estudio.*

<b>Zona de favorabilidad</b>	<b>Porcentaje de la zona de estudio (%)</b>	<b>Número de depósitos cupríferos</b>
<b>Alta</b>	10	17
<b>Moderada</b>	20	14
<b>Baja</b>	70	4

## 7. Discusión

### 7.1 Metodología en general

Algunas desventajas de la metodología son el sesgo y el sobreajuste (overfitting). Los resultados de la metodología son afectados por el sesgo de los datos ya sea porque existen datos faltantes, por muestreo preferenciales o considerar geología superficial en vez de la geología sólida (3D).

También, los modelos basados en esta metodología pueden tender a sobreajustarse hacia yacimientos minerales conocidos entregando resultados de validaciones altísimos (sobre un 90%). Este sobreajuste genera la dificultad en establecer la capacidad predictiva real con respecto a los yacimientos sin descubrir, la cual podría ser una de las razones de escepticismo de adoptar este tipo de metodologías por la industria minera.

Los resultados de los mapas prospectivos dependerán de distintos factores, entre ellos:

- La calidad y la disponibilidad de datos en la zona de estudio.
- La selección de los criterios de exploración que van a estar en función del modelo genético del tipo de depósito mineral y las características del mismo tipo de depósito mineral en la zona de estudio.
- El procesamiento de los criterios de exploración para producir los mapas predictivos.
- La metodología utilizada para asignar los pesos a las clases de los mapas predictivos.
- Técnica de integración de datos que puede ser en base a data-driven o knowledge-driven.

### 7.2 Específicos del caso de estudio

En este trabajo se realizó una caracterización geológica de la mineralización en la zona de estudio para ser utilizada en conjunto con el modelo genético de pórfidos cupríferos para identificar criterios de exploración. Los criterios de exploración seleccionados reflejan los procesos geológicos favorables para la ocurrencia de yacimientos en la zona de estudio, considerando incluso, la variable temporal en el caso de unidades geológicas, alteraciones teledetectadas y pliegues. Estos criterios fueron representados en mapas predictivos que se utilizarán como entrada para la generación de blancos de exploración.

Los mapas predictivos se integraron utilizando superposición ponderada para delinear zonas interesantes en términos prospectivos. La superposición ponderada permitió asignar pesos nulos a las clases de datos faltantes, lo que resultó ser extremadamente útil en comparación con otras técnicas de integración.

Por otro lado, la superposición ponderada asume que la intercalación entre las capas es lineal, es decir, el resultado del mapa prospectivo es la suma o resta es una combinación lineal de los mapas predictivos. Esta aproximación lineal puede ser en extremo simplista dado que los procesos geológicos que dan lugar a la formación de yacimientos pueden reflejar factores sumamente complejos que no son posibles modelarlos mediante álgebra

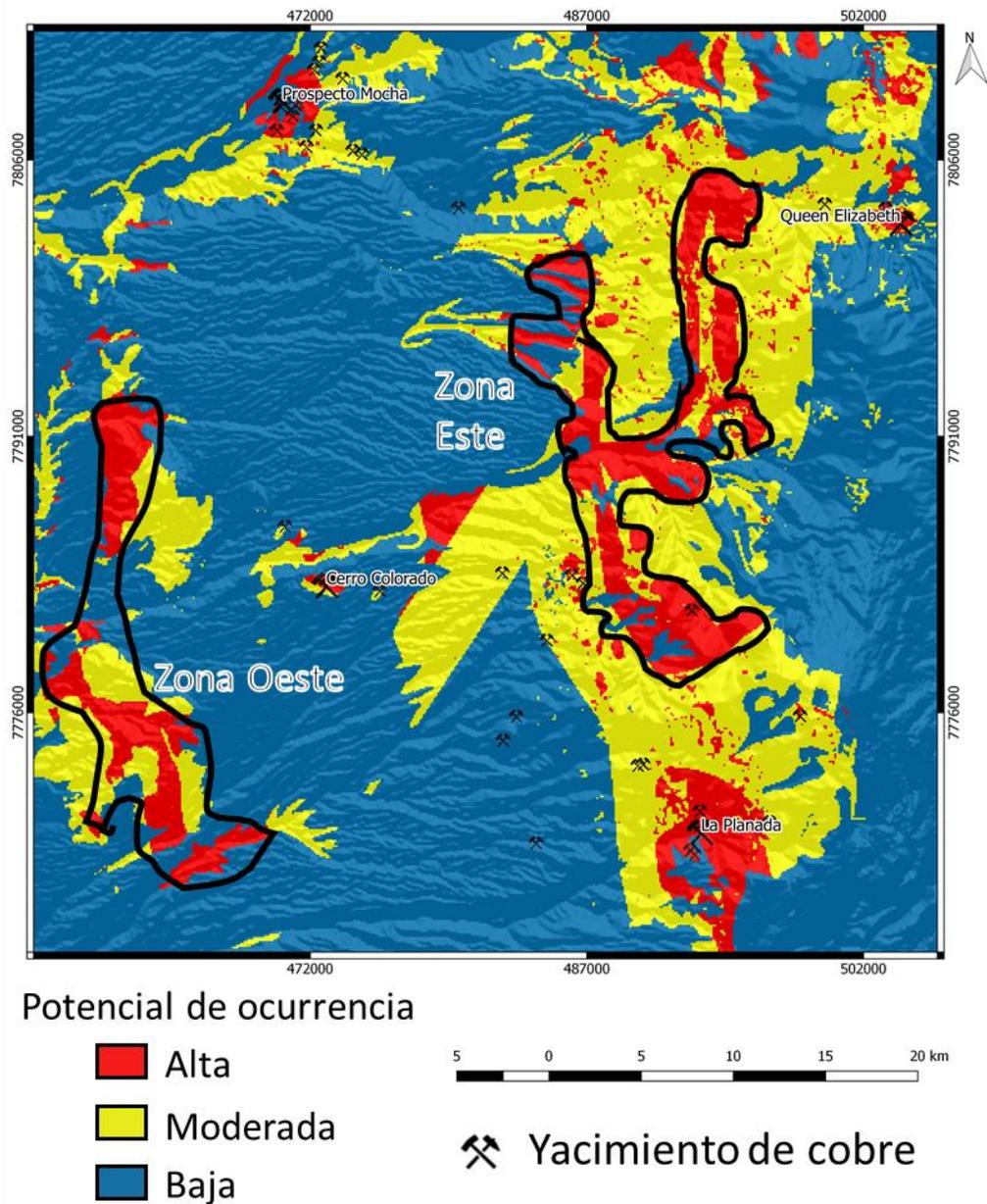
lineal, sino que se acercarán más a relaciones no lineales.

Por último, cabe mencionar que, dentro del criterio de exploración de unidades geológicas, aquellas que se formaron posterior al mioceno se le asignó un bajo potencial para hospedar pórfidos cupríferos asociados a las franjas metalogénicas del Paloceno – Eoceno Inferior y Eoceno medio – Oligoceno. Sin embargo, al establecerles un peso negativo, se podría sesgar el potencial que presentan estas coberturas de poseer mineralización en profundidad.

### **7.3 Características zonas de alto potencial**

Una vez obtenidos los resultados del mapa prospectivo, se deben visitar las ubicaciones identificadas como altos potenciales de exploración de manera de verificar que lo que cree que existe, realmente existe. Igualmente, es conveniente realizarse la siguiente pregunta: ¿Las zonas con alto potencial cumplen razonablemente con los criterios de exploración?

Las características de los yacimientos como Mocha, Cerro Colorado y Queen Elizabeth ya son zonas conocidas por su potencial prospectivo. Por ello, que el mapa prospectivo destaque como zonas de alto potencial los yacimientos mencionados anteriormente no aporta valor en términos de exploración, pero si en términos de validación del modelo. Por lo tanto, los sectores notables para la exploración *greenfield* serán aquellos que se destaquen como zonas de alto potencial, y que al mismo tiempo se encuentren lejanos a los pórfidos cupríferos más relevantes de la zona de estudio. Las características de estos sectores se dividen en dos (Zona Este y zona Oeste) (Figura 7.1).



*Figura 7.1: Mapa prospectivo indicando zonas de alto potencial que se encuentran relativamente lejanos a los pórfidos cupríferos más relevantes de la zona de estudio.*

Las características de cada una de estas zonas de alto potencial se detallan a continuación.

### **7.3.1 Características zona alto potencial de exploración “Oeste”**

Esta zona de alto potencial de exploración “Oeste” se ubica entre Sagasca y cerro Violeta y se divide en dos; un sector al norte y otro al sur. El sector norte se ubica al este de cerro Violeta como una franja de orientación NS de 8 km de largo y 1 km de ancho. En cambio, el sector sur se encuentra en los alrededores de cerro Juan de Morales como una franja de orientación NW-SE de 11 km de largo y 2 de ancho. Esta franja, en su extremo sur, se curva en dirección NE-SW hacia el NE de Sagasca. Las características de este sector se detallan a continuación:

- En esta región afloran principalmente rocas volcánicas y sedimentarias cretácicas compuestas de andesitas, tobas y areniscas de la formación Cerro Empexa junto a rocas intrusivas hiapabisales del Paleoceno compuestas de dacitas de clinopiroxeno.
- En el extremo sur del sector de alto potencial “Oeste” se ubica el yacimiento exótico Sagasca, el cual genera un radio de interés prospectivo a su alrededor como posibles sectores donde se encontraría la fuente de cobre. Estos sectores destacados cercanos a Sagsca en el mapa prospectivo están asociados a la formación Cerro Empexa al norte del exótico y a la formación Altos de Pica al este del exótico, siendo esta última formación, la que hospeda la mineralización de Sagasca.
- Dos kilómetros al norte del cerro Duplijsa, se encuentran 108 muestreos geoquímicos de las cuales 72 presentan anomalías positivas de Cu, Mo, As, Pb y Zn.
- Zonas de anomalías magnéticas negativas menores a -100 nT relacionadas con formación Cerro Empexa.
- Cercanía a fallas mayores Duplijsa y Juan de Morales.

### **7.3.2 Características zona alto potencial de exploración “Este”**

La zona de alto potencial de exploración “Este” se distribuye como una franja en forma de “Y” en el sector oriental de la zona de estudio. La franja de 3 km de ancho aproximadamente comienza en su extremo sur en Aguada Culumtucsa pasando por cerro del Barro hasta cerro Choja, donde se divide en dos franjas hacia el norte que terminan en cerro Guarache por el este y 3 km más al sur de Cosaca por el oeste. Las características de este sector se detallan a continuación:

- Las unidades geológicas predominantes en el sector se componen de granodioritas, dioritas y tonalitas de los Complejos Intrusivos Yabricoya y Alantaya, junto a andesitas y areniscas de formación Cerro Empexa y a calizas y lutitas de formación Copaquire.

- Presencia de alteraciones propilítica, Illita/Moscovita asociada a fílica y argílica avanzada.
- Anomalías magnéticas positivas y negativas. Las anomalías positivas están asociadas a el Complejo Intrusivo Yabricoya y las negativas a ninguna unidad geológica en especial.
- Cinco kilómetros al este del cerro Choja, 50 muestras de litogeoquímica superficial presentan anomalías positivas en cuanto a concentración de Cu, Mo, As, Pb y Zn. Lo mismo sucede 1 km al norte de cerro Guarache con 19 muestras de litogeoquímica superficial.
- El factor estructural en la zona de alto potencial prospectivo “Este” juega un papel importante dada la alta densidad de fallas inversas de orientación NS y de pliegues anticlinales. Adicionalmente, en los alrededores a la zona de alto potencial prospectivo “Este” se encuentran 9 fallas inversas de orientación NS incluyendo a la falla Laguani. En cuanto a los anticlinales, 14 ejes afectan a la zona de alto potencial prospectivo “Este” de un total de 31 en la zona de estudio.

## 8. Conclusiones

En este trabajo se identificaron los criterios de exploración de pórfidos cupríferos para integrar distintos mapas predictivos y, de esta forma, poder delimitar sectores de alto potencial de ocurrencia de estos yacimientos cupríferos en la zona de estudio.

Los criterios de exploración definen los rasgos favorables para la ocurrencia de depósitos minerales van a ser los factores claves para delinear sectores interesantes a nivel prospectivo. Los criterios de exploración se detallan a continuación:

1. Unidades de intrusivos del Paleoceno y Eoceno, junto a la formación Cerro Empexa y en menor medida la formación Copaquire actúan como las principales rocas huéspedes de mineralización de cobre.
2. Unidades geológicas post-oligocenas no actúan como rocas huéspedes de mineralización de pórfidos cupríferos en la zona de estudio.
3. Presencia de alteraciones hidrotermales argílica avanzada, argílica intermedia, silíceo y filica gradando a alteración propilítica distal.
4. Presencia de minerales como alunita, caolinita y óxidos de hierro asociados a procesos supergenos.
5. Cercanía a fallas inversas y dextrales de orientación NS.
6. Proximidad a anticlinales que afectan unidades del cretácico y paleoceno.
7. Anomalías positivas de concentraciones litogeoquímicas de Cu, Mo, As, Pb o Zn.
8. Cercanía a Sagasca (exótico con fuente de cobre desconocida).
9. Anomalías magnéticas regionales negativas.
10. Anomalías magnéticas locales positivas relacionadas con intrusivos eocenos.
11. Cercanía a sondajes con leyes mayores a 0.1% de cobre total.

La integración de mapas predictivos mediante superposición ponderada mostró ser una técnica de integración de gran utilidad dada la gran cantidad de valores faltantes en los datos de exploración.

Los resultados de la integración de mapas predictivos indica que las zonas interesantes en términos prospectivos son a, grandes rasgos:

- Sectores cercanos (menor a 4 km) a los yacimientos Cerro Colorado, Mocha, Yabricoya y Queen Elizabeth.
- Zona de alto potencial de exploración "Oeste" que se distribuye como una franja de orientación NS entre Sagasca y cerro Violeta.
- Zona de alto potencial de exploración "Este" se distribuye como una franja en forma de "Y" de orientación NS en el sector oriental de la zona de estudio entre Coscaya y Aguada Culumtucsa.

La precisión del modelo fue validada logrando que un 88% de los pórfidos cupríferos de la zona de estudio se encuentren dentro de los sectores de potenciales altos y moderados para exploración. De esta manera, la alta eficiencia de la metodología propuesta se confirmó para sugerir sectores de interés prospectivo en superficie.

## **9. Recomendaciones y consideraciones**

### **9.1 Sobre metodología en general**

- El mapa prospectivo final no indica el punto exacto donde hacer un sondaje, sino que destacan los sectores que superficialmente se asemejan a los pórfidos cupríferos de la zona de estudio y que presenten características similares a los modelos teóricos de depósitos minerales (e.g. pórfidos cupríferos).
- Es importante destacar que el rol de los expertos en la selección y preparación de los datos es clave para el éxito. La metodología propuesta funcionaría como complemento a la toma de decisiones del equipo de exploraciones.
- Los depósitos minerales son cuerpos tridimensionales. Por lo tanto, la necesidad de generar modelos geológicos en tres dimensiones para este tipo de metodologías de exploración se debe preferir en comparación a métodos que solo consideren datos superficiales.
- Se recomienda aplicar la misma metodología a modelos de bloques en 3D, en vez de celdas en dos dimensiones. Esto permitiría obtener, para cada bloque, una probabilidad o potencial de ocurrencia de un depósito mineral (e.g. pórfidos cupríferos). Según la escala y detalle del modelo de bloques, se podrían identificar los sectores en profundidad más adecuados para ser perforados con sondajes.
- Para un mismo sector no existe una técnica de integración de datos perfecta o 100% correcta. Por consiguiente, se recomienda realizar varias metodologías de integración de datos para la misma zona de estudio que pueden ser tanto knowledge- driven (e.g. lógica difusa, superposición ponderada, lógica booleana, etc..) como data – driven (e.g. redes neuronales, random forest, support vector machines, etc..). Luego, seleccionar los mapas prospectivos de las distintas técnicas de integración que presenten resultados de validación sobre un 85%. De estos últimos mapas prospectivos, intersectar todas las zonas de alto potencial de exploración para obtener un mapa prospectivo final.

### **9.2 Específicos del caso de estudio**

- Las unidades geológicas formadas posterior al oligoceno, presentan un bajo potencial para hospedar pórfidos cupríferos asociados a las franjas metalogénicas del Paleoceno – Eoceno Inferior y Eoceno medio – Oligoceno. Sin embargo, al asignarle un peso negativo a las unidades post-miocenas se podría estar sesgando el potencial que presentan estas coberturas de poseer mineralización en profundidad. Para evitar este problema, se recomienda realizar un modelamiento de la superficie cubierta utilizando datos de sondajes mapeados por litologías junto con superficies de basamento expuesto, para determinar las unidades geológicas bajo la cobertura post-oligocena. Luego interpolar las unidades de manera de poseer las unidades geológicas de basamento.
- Es recomendable utilizar alteraciones mapeadas directamente en terreno que alteraciones teledetectadas mediante el procesamiento de imágenes satelitales.

## 10. Bibliografía

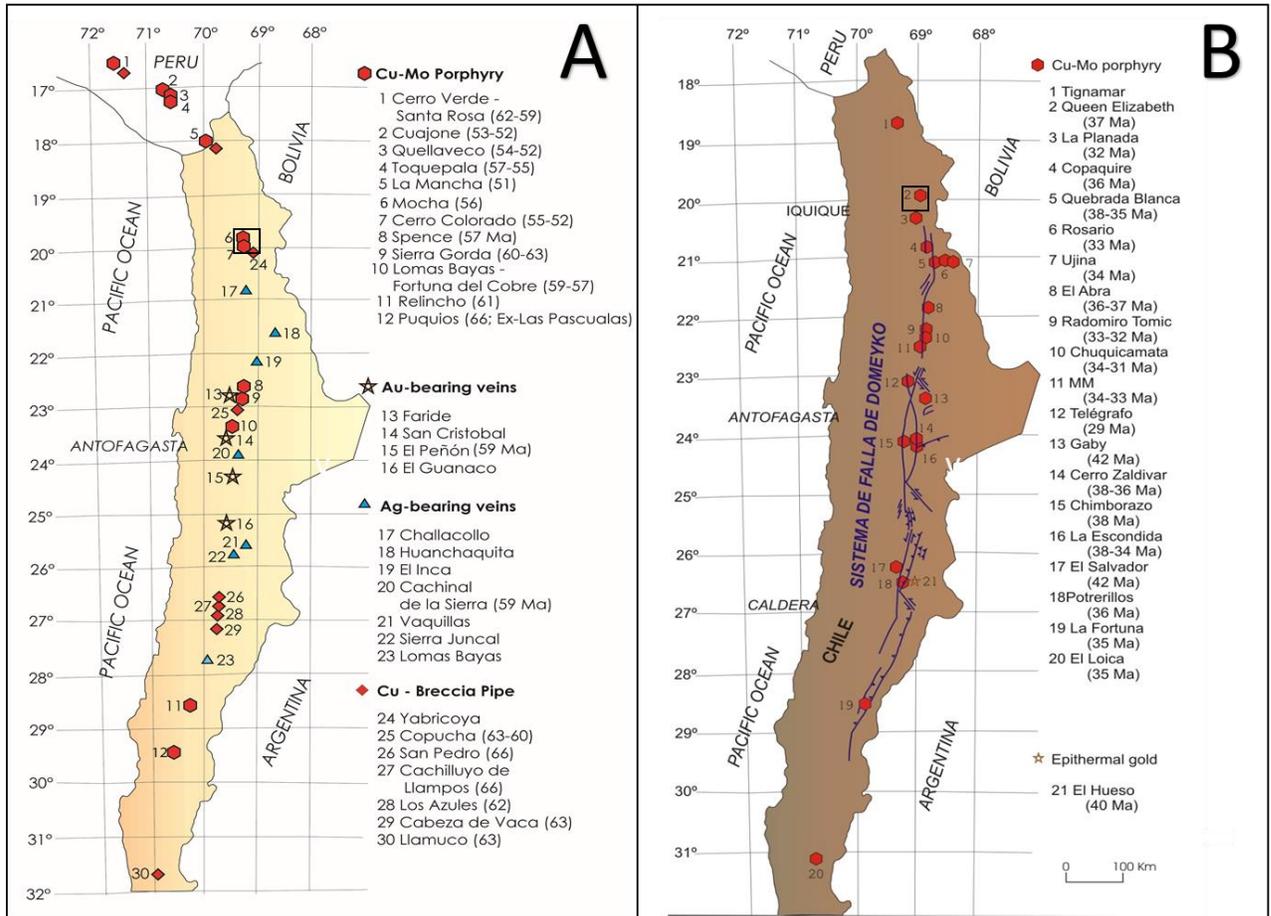
- Abedi, M., Norouzi, G.-H., & Bahroudi, A. (2012). Support vector machine for multi-classification of mineral. *Computers & Geosciences*, 46, 272-283.
- Amilibia, A., & Skarmeta, J. (2003). *La Inversión Tectónica de la Cordillera de Domeyko en el Norte de Chile y su relación con la Intrusión de Sistemas Porfídicos de Cu-Mo.*, Concepción.
- Barnett, C., & Kowalczyk, P. (2007). *Airborne Electromagnetics and Airborne Gravity in the QUEST Project Area, Williams Lake to Mackenzie, British Columbia*. Retrieved from Vancouver:
- Barnett, C., & Williams, P. (2006). *Mineral Exploration Using Modern Data Mining Techniques*. Retrieved from Colorado:
- Barra, F. (2016). Clasificación de depósitos minerales. Curso Introducción a Yacimientos minerales. Universidad de Chile.
- Behn, G., Camus, F., & Carrasco, P. (2001). Aeromagnetic Signature of Porphyry Copper Systems in Northern Chile and Its Geologic Implications. *Economic Geology*, 96, 239-248.
- Blanco, N., Vásquez, P., Sepúlveda, F. A., Tomlinson, A. J., Quezada, A., & Ladino, M. (2012). Levantamiento geológico para el fomento de la exploración de recursos minerales e hídricos de la Cordillera de la Costa, Depresión Central y Precordillera de la región de Tarapacá (20°-21°S): Servicio Nacional de Geología y Minería. In. Santiago.
- Bouzari, F., & Clark, A. (2002). Anatomy, Evolution, and Metallogenic Significance of the Supergene Orebody of the Cerro Colorado Porphyry Copper Deposit, I Región, Northern Chile. *Economic Geology*, 97, 1701–1740.
- Bouzari, F., & Clark, A. (2006). Prograde evolution and geothermal affinities of a major porphyry copper deposit: The Cerro Colorado hypogene protore, I Región, northern Chile. *Economic Geology*(101), 95-134.
- Camus, F. (2005). The Andean Porphyry Systems. *PGC*, 1, 45-63.
- Carranza, E., & Laborte, A. (2014). Data-driven predictive mapping of gold prospectivity, Baguio district, Philippines: Application of Random Forests algorithm. *Ore Geology Reviews*, 71, 777-787.
- COCHILCO. (2016). *Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera*.
- Cortés, J., Cascante, M., & Zavala, V. (2014). Geología de las Áreas Isluga y Sierra de Huaila, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, Nos. 172-173, 1 mapa escala 1:100.000. 65 p. In. Santiago.
- Crosta, A., & Moore, J. (1989). Geological mapping using Landsat Thematic Mapper imagery in Almeria Province, south-east Spain. *International Journal of Remote Sensing*, 10(3), 505-514.
- Desharnais, G., Paiement, J. P., Hatfield, D., & Poupart, N. (2017). *Mining BIG Data: The Future of Exploration Targeting Using Machine Learning*, Blainville Québec.
- Gallardo, F. (2015). *Geología Y Estructura De La Precordillera Altiplánica Entre 19°45's Y 20°00's, Región De Tarapacá, Chile 19°45's Y 20°00's, Región De Tarapacá, Chile*. (Magíster), Universidad de Chile, Santiago.
- Galli, C. (1957). Las formaciones geológicas en el borde occidental de la puna de Atacama, sector de Pica, Tarapacá. *Minerales*, 56, p. 1-15.

- Galli, C. (1968). Carta geológica de Chile: Cuadrangulo Juan de Morales, Provincia de Tarapacá, escala 1:50.000. In: Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Galli, C., & Dingman, R. (1962). *Carta geológica de Chile: Cuadrángulos Pica, Alca, Matilla y Chacarilla, con un estudio sobre los recursos de agua subterránea, Provincia de Tarapacá*. Retrieved from
- García, F. (1967). *Geología del Norte Grande de Chile, Symposium sobre el Geosinclinal Andino* Santiago.
- Gardeweg, P., M., & Sellés, M., D. (2013). Geología del área Collacagua-Rinconada, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, mapa escala 1:100.000. In. Santiago.
- Gunn, P., & Dentith, M. (1997). Magnetic responses associated with mineral deposits. *Journal of Geology and Geophysics*, 17, 145-155.
- Halley, S., Dilles, J., & Tosdal, R. (2015). Footprints: Hydrothermal alteration and geochemical dispersion around porphyry copper deposits. *Society of Economic Geologists* (100), 1-17.
- Harris, J. R., Grunsky, E., Behnia, P., & Corrigan, D. (2014). Data- and knowledge-driven mineral prospectivity maps for Canada's North. *Ore Geology Reviews*, 71, 788-803.
- Hoffmann, A. M. (2012). *Comportamiento de la mineralogía de ganga en el proceso hidrometalúrgico en mina Cerro Colorado*. (Título de geólogo), Universidad de Chile, Santiago.
- John, D. A., Ayuso, R. A., Barton, M. D., Blakely, R. J., Bodnar, R. J., Dilles, J. H., . . . Vikre, P. G. (2010). *Porphyry copper deposit model*. Retrieved from
- Lahsen, A. (1973). Geología de Puchuldiza. CORFO, 49 p. Informe Inédito. In.
- Maksaev, V. (1978). Cuadrángulo Chitigua y sector occidental del cuadrángulo Cerro Palpana, Región de Antofagasta. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile 31: 55 p., 1 mapa escala 1:50.000. . In. Santiago.
- Maksaev, V. (2001). *Reseña metalogénica de Chile y de los procesos que determinan la metalogénesis andina*. Retrieved from Santiago de Chile:
- Morandé, J., Gallardo, F., Muñoz, M., & Farías, M. (2015). Carta Guaviña, Región de Tarapacá.: Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica. Escala 1:100.000. In. Santiago.
- Moreno, L., Burgoa, C., & Escobar, F. (2013). *Proyecto hipógeno Cerro Colorado, Reporte Interno* Retrieved from
- Munchmeyer, C. (1996). Exotic deposits products of lateral migration of supergene solutions from porphyry copper deposits. In Andean copper deposits: new discovery, mineralization, styles and metallogeny *Society fo Economic Geology*, 5, 43-58.
- Ordoñez, A., & Rivera, G. (2004). Mapa Metalogénico de Tarapacá. Escala 1:500.000. . In: Sernageomin.
- Pacci, D., Cáceres, R., & Sayes, J. (1980). *Inventario de yacimientos metálicos y no metálicos*. Retrieved from Santiago:
- Porwal, A., Deb Das, R., Chaudhary, B., Gonzalez-Alvarez, I., & Kreuzer, O. (2014). Fuzzy inference systems for prospectivity modeling of mineral systems and a case-study for prospectivity mapping of surficial Uranium in Yeelirrie Area, Western Australia. *Ore Geology Reviews*, 71, 839-852.
- Rodriguez, C. (2012). *Análisis espacial geológico-minero para la definición de áreas de interés prospectivo en los municipios de Actopan y Pachuca, Estado de Hidalgo, México* Retrieved from Santiago de Chile:

- Seedorff, E., Dilles, J., Proffett, J. M., Einaudi, M. T., Zurcher, L., Stavast, W. J. A., Barton, M. (2005). Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features. . *Economic Geology*, 100, 251-298.
- Sellés, D., Gardeweg, M., & Garibaldi, N. (2016). Geología del área Pampa Lirima-Cancosa, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 182: 115 p., 1 mapa escala 1:100.000. In. Santiago.
- Sepúlveda, F. A., Vásquez, P., & Quezada, J. (2014). Cartas Patillos y Oficina Victoria, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 167 y 168: 94 p. 1 mapa escala 1:100.000. . In. Santiago.
- Sillitoe, R. (1972). A Plate Tectonic Model for the Origin of Porphyry Copper Deposits. *Economic Geology*, 184-197.
- Sillitoe, R. (2005). Supergene Oxidized and Enriched Porphyry Copper and Related Deposits. *Society of Economic Geologists*, 100, 723–768.
- Sillitoe, R. (2010). Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 3-41.
- Singer, D. A., Berger, V. I., & Moring, B. C. (2008). *Porphyry copper deposits of the world—Database, grade and tonnage* Retrieved from
- Thomas, A. (1967). *Cuadrángulo Mamiña, Provincia de Tarapacá. Carta Geológica de Chile No. 17, 1 mapa escala 1:50.000*. Retrieved from Santiago, Chile.:
- Tobar, A., Salas, I., & Kast, R. (1968). Cuadrángulos Camaraca y Azapa, Provincia de Tarapacá. Carta Geológica de Chile, Nos. 19 y 20, escala 1:50.000, 13 p. . In. Santiago.: Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Tomlinson, A., Blanco, N., & Ladino, M. (2015). Carta Mamiña, Región de Tarapacá. 2015. Escala 1:100.000. In. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Vergara, H., & Thomas, A. (1984). *Hoja Collacagua, Región de Tarapacá. Carta Geológica de Chile 59: 79 p, 1 mapa escala 1: 250.000*. Retrieved from Santiago:

# 11. Anexos

Anexo A: A. Franja Metalogénica del Paleoceno - Eoceno Temprano. B. Franja Metalogénica del Eoceno Medio – Oligoceno junto a estructuras asociadas al sistema de fallas Domeyko (Maksaev, 2001). Zona de estudio enmarcada en rectángulos de borde negro.



*Anexo B: Otros yacimientos cupríferos de la zona de estudio.*

<b>Nombre</b>	<b>Tipo mena</b>	<b>Forma del yacimiento</b>	<b>Roca de caja</b>
Cucho	Cu	s/i	Complejo Intrusivo Alantaya
Queen Elizabeth	Cu-(Mo)	Pórfido	Formación Copaquire
Marcelina	Cu-(Ag)	s/i	Formación Cerro Empexa
Ángela	Cu	s/i	Intrusivos hipabisales de Quebrada de tarapaca
La Española	Cu-(Au)	Vetas	Formación Cerro Empexa
Sin nombre	Cu	s/l	Formación Cerro Empexa
San Enrique	Cu	Vetas	Formación Cerro Empexa
La Rinconada	Cu-(Ag,Au)	s/i	Intrusivos hipabisales Mocha
Prospecto Yuya	Cu	s/i	Intrusivos hipabisales Mocha
Yuya	Cu	s/i	Intrusivos hipabisales Mocha
Chipamani	Cu	s/i	Formación Cerro Empexa
Chiflón	Cu	s/i	Formación Cerro Empexa
Tres puntas	Cu-(Ag,Au)	s/i	Formación Cerro Empexa
Santa Fe	Cu	s/i	Formación Cerro Empexa
Chana	Cu-(Au)	s/i	Complejo Intrusivo Alantaya
Recuerdo	Cu	s/i	Intrusivos hipabisales del paleoceno
Los Chiles	Cu-(Ag,Au)	s/i	Formación Cerro Empexa
Cerro Colorado	Cu-(Mo)	Stockwork	Complejo Intrusivo Cerro Colorado
Cerro Quipisca	Cu	Stockwork	Cuerpos hipabisales del paleoceno
Amilca	Cu(-Au)	Veta	Formación Cerro Empexa
Flor del desierto	Cu	Veta y stockwork	Cuerpos hipabisales del eoceno
Lallinca	Cu	Veta, chimenea de brecha y stockwork	Cuerpos hipabisales del eoceno
La Planada	Cu-(Mo)	Veta, chimenea de brecha y stockwork	Complejo Plutónico Yabricoya
Hundida	Cu	Chimenea de brecha	Complejo Plutónico Yabricoya
Arauco	Cu-(Au,Ag)	Chimenea de brecha	Complejo Plutónico Yabricoya
Tigre	Cu	Chimenea de brecha	Complejo Plutónico Yabricoya
San Carlos	Cu	Chimenea de brecha	Complejo Plutónico Yabricoya
Sin nombre	Cu	Relleno de fracturas	Complejo Plutónico Yabricoya
Santiago	Cu	Veta	Formación Icanche
Río Tinto Norte	Cu	Veta y chimenea de brecha	Complejo Plutónico Yabricoya
Río Tinto Sur	Cu-(Ag, Au)	Veta	Complejo Plutónico Yabricoya
Columtucsa	Cu	Relleno de fracturas	Complejo Plutónico Yabricoya
Gualchagua	Cu	Relleno de fracturas	Formación Cerro Empexa
Sin nombre	Cu	Veta	Formación Cerro Empexa
Infiernillo	Cu	Relleno de fracturas y stockwork	Formación Cerro Empexa

*Anexo C: Matriz de correlación de elementos para franja Paleoceno – Eoceno Inferior, sin considerar outliers.*

	<b>Cu</b>	<b>Mo</b>	<b>As</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>
<b>Cu</b>	1				
<b>Mo</b>	0.09	1			
<b>As</b>	-0.12	0.29	1		
<b>Pb</b>	-0.01	0.06	0.02	1	
<b>Zn</b>	0.10	-0.18	-0.07	0.38	1

*Anexo D: Matriz de correlación de elementos para franja Paleoceno – Eoceno Inferior, considerando outliers.*

	<b>Cu</b>	<b>Mo</b>	<b>As</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>
<b>Cu</b>	1				
<b>Mo</b>	0.033	1			
<b>As</b>	0.004	0.352	1		
<b>Pb</b>	0.011	0.290	0.368	1	
<b>Zn</b>	0.061	-0.022	0.213	0.299	1

*Anexo E: Matriz de correlación de elementos para franja Eoceno Medio – Oligoceno, sin considerar outliers.*

	<b>Cu</b>	<b>Mo</b>	<b>As</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>
<b>Cu</b>	1				
<b>Mo</b>	0.18	1			
<b>As</b>	0.00	0.16	1		
<b>Pb</b>	0.13	0.12	0.38	1	
<b>Zn</b>	0.21	-0.01	0.19	0.30	1

*Anexo F: Matriz de correlación de elementos para franja Eoceno Medio – Oligoceno, considerando outliers.*

	<b>Cu</b>	<b>Mo</b>	<b>As</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>
<b>Cu</b>	1				
<b>Mo</b>	0.108	1			
<b>As</b>	0.028	0.164	1		
<b>Pb</b>	0.272	0.052	0.324	1	
<b>Zn</b>	0.150	-0.009	0.232	0.332	1

*Anexo G: Valores del percentil 80 de concentración de elementos, considerando outliers dentro de la franja metalogénica del Paleoceno – Eoceno Inferior de la zona de estudio.*

<b>Franja Paleocena – Eoceno Inferior. Considerando outliers.</b>	<b>Cu [ppm]</b>	<b>Mo [ppm]</b>	<b>As [ppm]</b>	<b>Pb [ppm]</b>	<b>Zn [ppm]</b>
<b>Valor que separa el cuarto del quinto quintil superior</b>	91	9	81	20	74

*Anexo H: Valores del percentil 80 de concentración de elementos, sin considerar outliers dentro de la franja metalogénica del Paleoceno – Eoceno Inferior de la zona de estudio.*

<b>Franja Paleocena – Eoceno Inferior. Sin considerar outliers.</b>	<b><i>Cu [ppm]</i></b>	<b><i>Mo [ppm]</i></b>	<b><i>As [ppm]</i></b>	<b><i>Pb [ppm]</i></b>	<b><i>Zn [ppm]</i></b>
<b>Valor que separa el cuarto del quinto quintil superior</b>	84	9	79	20	73

*Anexo I: Valores del percentil 80 de concentración de elementos, considerando outliers dentro de la franja metalogénica del Eoceno Medio - Oligoceno Inferior de la zona de estudio.*

<b>Franja Eoceno Medio - Oligoceno. Considerando outliers.</b>	<b><i>Cu [ppm]</i></b>	<b><i>Mo [ppm]</i></b>	<b><i>As [ppm]</i></b>	<b><i>Pb [ppm]</i></b>	<b><i>Zn [ppm]</i></b>
<b>Valor que separa el cuarto del quinto quintil superior</b>	230.4	10	51.4	27	82.82

*Anexo J: Valores del percentil 80 de concentración de elementos, sin considerar outliers dentro de la franja metalogénica del Eoceno Medio - Oligoceno Inferior de la zona de estudio.*

<b>Franja Eoceno Medio - Oligoceno. Sin considerar outliers.</b>	<b><i>Cu [ppm]</i></b>	<b><i>Mo [ppm]</i></b>	<b><i>As [ppm]</i></b>	<b><i>Pb [ppm]</i></b>	<b><i>Zn [ppm]</i></b>
<b>Valor que separa el cuarto del quinto quintil superior</b>	247	11	54	28	85