

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



T E S I S

**Distribución espacial de los estadios de mineralización y alteración
hidrotermal del Yacimiento Polimetálico Ayawilca (Zona de Zinc) - Región**

Pasco – 2022

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Geólogo

Autor:

Bach. Luis Carlos GUZMAN BERNARDO

Asesor:

Dr. Tito Marcial ARIAS ARZAPALO

Cerro de Pasco – Perú – 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



T E S I S

**Distribución Espacial de los estadios de mineralización y alteración
hidrotermal del Yacimiento Polimetálico Ayawilca (Zona de Zinc) - Región**

Pasco – 2022

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Dr. Favio Máximo MENA OSORIO

PRESIDENTE

Dr. José Fermín HINOJOSA DE LA SOTA

MIEMBRO

Mg. Javier LOPEZ ALVARADO

MIEMBRO



Universidad Nacional Daniel Alcides
Carrión Facultad de Ingeniería
Unidad de Investigación

INFORME DE ORIGINALIDAD N° 193-2024-UNDAC/UIFI

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión en mérito al artículo 23° del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales aprobado en Consejo Universitario del 21 de abril del 2022, La Tesis ha sido evaluado por el software antiplagio Turnitin Similarity, que a continuación se detalla:

Tesis:

**Distribución Espacial de los estadios de mineralización y
alteración hidrotermal del Yacimiento Polimetálico Ayawilca
(Zona de Zinc) - Región Pasco – 2022**

Apellidos y nombres del tesista:

Bach. GUZMAN BERNARDO, Luis Carlos

Apellidos y nombres del Asesor:

Dr. ARIAS ARZAPALO, Tito Marcial

Escuela de Formación Profesional

Ingeniería Geológica

Índice de Similitud

2%

APROBADO

Se informa el Reporte de evaluación del software similitud para los fines pertinentes:

Cerro de Pasco, 1 de octubre del 2024



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DANIEL
ALCIDES
CARRIÓN
(AVANZADA)

Firmado digitalmente por MELBA
CACERES Rayuldo FAUJ
20154605046 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 01.10.2024 04:15:00 -05:00

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mi madre Nelly Bernardo por apoyarme siempre a lo largo de mi vida universitaria, por sus consejos y valores brindados para mi vida misma y profesional, sobre todo, por siempre haber creído en mí.

AGRADECIMIENTO

Mi eterno agradecimiento al staff de la empresa Tinka Resources SAC por la confianza y la motivación en mi trabajo, especialmente al equipo de Geología, los ingenieros Alvaro Fernandez-Baca, Jorge Gamarra, Luis Giraldo y Richard Chaiña que gratamente me ayudaron y promueven la búsqueda del conocimiento y mejora continua.

Asimismo, agradezco al asesor de mi tesis, el Doctor Tito Arias por su exigencia y soporte para la culminación del presente trabajo.

RESUMEN

El depósito Ayawilca está ubicado en la parte central del Perú, departamento de Pasco. Su mineralización está emplazada en las calizas del Pucará del Triásico Superior - Jurásico Inferior y las zonas importantes de zinc se encuentran en Ayawilca Sur y Oeste, este trabajo tiene como objetivos graficar secciones transversales en ambas zonas con un enfoque en la distribución espacial de los estadios de mineralización, alteración hidrotermal y características relevantes para su enriquecimiento en zinc. Para ello se seleccionó 58 sondajes diamantinos de un total de 300, colectando datos de logueo geológico, estructural, registro fotográfico, PIMA y a la par de una revisión de trabajos previos; posteriormente los datos fueron procesados en el software Discover para la generación de secciones e interpretación.

Las secciones muestran la mineralización de Cu-Sn en partes más profundas y hacia Ayawilca Central, las zonas de Zn en los núcleos de los anticlinales y Ag-Pb en sus bordes. La mineralización resulto en condiciones progresivamente más acidas, donde cada estadio reemplazó parcialmente al anterior; existe 3 asociaciones de minerales de alteración: los relictos con mag-chl+/-act-tr, las zonas de mayor circulación de fluidos con K-Dik+/Qz-I-Cb y las zonas de borde con cb-Sm-I+/K-chl-sílica. Las zonas de alta ley de zinc fueron producto del nexo entre la roca hospedante, brechamiento previo a la mineralización, intersección de fallas de rumbo andino, trans-andino, plegamiento de vergencia SO y sus fallas de bajo ángulo, así como el mayor desarrollo del estadio "A". Pese a la superposición de estadios, se ve una distribución clásica de metales base, la alteración hidrotermal no es tan desarrollado como en otros depósitos debido a la caliza. Los factores estructurales fueron importantes para la mineralización importante de zinc.

Palabras Clave: Zonación Mineralógica, Alteración Hidrotermal, Zinc, Paragénesis, Caliza, Grupo Pucará.

ABSTRACT

The Ayawilca deposit is located in the central part of Peru, Pasco department. Its mineralization is hosted by the Upper Triassic - Lower Jurassic Pucara limestones and the important zinc zones are located in South and West Ayawilca, this thesis has as goals to plot cross sections in both zones with a focus on the spatial distribution of the stages of mineralization, hydrothermal alteration and relevant characteristics for its enrichment of zinc. For this purpose, 58 drill holes were selected from a total of 300, collecting geological and structural logging data, photographic record, PIMA and a review of previous works; later the data were processed in Discover software for the generation of sections and interpretation.

The sections show Cu mineralization in deeper parts and towards Central Ayawilca, Zn zones are in the cores of the anticlines and Ag-Pb at their edges. The mineralization resulted in progressively more acidic conditions, where each stage partially replaced the previous one; there are 3 alteration mineral associations: the relicts with mag-chl+/-act-tr, the zones of higher fluid circulation with K-Dik+/Qz-I-Cb and the rim zones with cb-Sm-I+/K-chl-silica. The high zinc grade zones were the product of the host rock nexus with brecciation prior to mineralization, intersection of Andean strike-slip faults, trans-Andean, SW vergence folding and its low angle faults, as well as the higher development of the "A" stage. Despite the overlapping of stages, it is possible to see a classic distribution of base metals, the hydrothermal alteration is not as developed as in other deposits due to the limestone characteristics and the structural factors were important for the important mineralization of zinc.

Key words: Mineralogical Zoning, Hydrothermal Alteration, Zinc, Paragenesis, Limestone, Pucara Group.

INTRODUCCIÓN

El depósito Ayawilca Zn-Ag-Pb-In-Sn-Cu está ubicado en los andes centrales del Perú aproximadamente a 200km al Noreste de Lima a una elevación de 4250msnm. Este depósito fue descubierto el 2012 en el programa de expansión de recursos de Ag del Proyecto Colquipucro.

Lito-estratigráficamente presenta una superposición de 2 unidades sedimentarias (Goyllarisquizga-Pucará) sobre la secuencia metamórfica del Excelsior. La mineralización importante de zinc se encuentra entre 150-450m bajo la superficie y no se evidencia afloramientos de este estilo de mineralización; por lo que es un depósito oculto. Ayawilca ha sido caracterizado como un depósito CRD (Carbonate Replacement Deposit), debido al reemplazamiento y mineralización en la secuencia sedimentaria del Pucará, no obstante, la mineralización afecta también a la secuencia superior Goyllarisquizga (Zona Sur y Oeste).

Asimismo, presenta tres principales pulsos de mineralización y un pre-evento de transición de skarn (Uzieda, Fontboté, & Kouzmanov, 2020); características que también concuerdan con los conceptos de Deposito polimetálico Cordillerano planteados por Bendezú, & Fontboté 2009.

Este depósito tiene una edad de 23.1-22.7 Ma (Benites, Torró, & Vallance, *Geology, mineralogy, and cassiterite geochronology of the Ayawilca Zn-Pb-Ag-In-Sn-Cu deposit, Pasco, Peru*, 2021) datado mediante el método U-Pb en la casiterita. La mineralización de Ayawilca comprende 19.0 Mt (7.2 % Zn, 0.2 % Pb y 16.8 g/t Ag) de recursos indicados y 47.9 Mt (5.4 % Zn, 0.4 % Pb y 20 g/t Ag) de recursos inferidos, adicionalmente 8.4 Mt (1.0 % Sn) de recursos inferidos (Tinka Resources 2021).

Trabajos previos como el de Benites en el 2019 exponen la secuencia paragenética del depósito Ayawilca con tres estadios principales de mineralización (A,

B y C) y uno Pre-A de ensamble skarn mt-chl+/-act/tr y tlc como relictos en algunas zonas del proyecto, estadio “A” contiene po-sph (+Fe) +/-asp-cp-stn-hzb, el estadio “B” py-mar-qz y el estadio “C” sph (-Fe) - cb de Fe-Mn – gn +/- cp-sulfosales de Ag y Cu. Basado en ese estudio, este trabajo esquematizará la zonación de la mineralización y su de alteración, se enfocará en las zonas de mayor importancia económica de Zn (Ayawilca Sur y Oeste), de igual modo se analizará las características que indujeron a la formación de esta. Este trabajo servirá como referencia para la exploración de depósitos parecidos en la franja del Mioceno de polimetálicos de la parte central del Perú.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

LISTA DE ABREVIATURAS

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.	Planteamiento del problema	1
1.2.	Delimitación de la investigación	2
1.3.	Formulación del problema.....	2
	1.3.1. Problema general	2
	1.3.2. Problemas específicos	2
1.4.	Formulación de objetivos	3
	1.4.1. Objetivo general	3
	1.4.2. Objetivos específicos.....	3
1.5.	Justificación de la investigación.....	3
1.6.	Limitaciones de la investigación	4

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.	Antecedentes de estudio	5
2.2.	Bases teóricas científicas	11
2.2.1.	Generalidades del Proyecto Ayawilca.....	11
2.2.2.	Sulfuros en un Depósito Hidrotermal.....	14
2.2.3.	Alteraciones Hidrotermales	16
2.2.4.	Deposito Tipo CRD.....	18
2.2.5.	Deposito tipo Skarn	21
2.2.6.	Deposito Polimetálico Cordillerano	24
2.2.7.	Analizador Portátil Infrarrojo de Minerales (PIMA).....	26
2.3.	Definición de términos básicos	56
2.4.	Enfoque Filosófico – Epistémico	57

CAPITULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1.	Tipo de investigación	61
3.2.	Nivel de Investigación.....	61
3.3.	Características de la investigación.....	61
3.4.	Método de investigación.....	62
3.5.	Diseño de investigación.....	62
3.6.	Procedimiento del muestreo	63
3.7.	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	63
3.7.1.	Logueo Geológico	63
3.7.2.	Logueo estructural	63
3.7.3.	Registro fotográfico de testigos.....	64

3.7.4.	Análisis PIMA	65
3.7.5.	Revisión de Trabajos Previos	65
3.7.6.	Instrumentos de Recolección de Datos.....	66
3.8.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	66
3.8.1.	Procesamiento de la Información	67
3.8.2.	Presentación y publicación de los resultados	67
3.9.	Orientación ética.....	67

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	Presentación, análisis e interpretación de resultados.....	68
4.1.1.	Distribución espacial de los estadios de Mineralización y de alteración hidrotermal	68
4.1.2.	Ayawilca Oeste.....	73
4.1.3.	Ayawilca Sur	79
4.2.	Discusión de Resultados.....	85
4.2.1.	Distribución Espacial.....	85
4.2.2.	Alteraciones Hidrotermales	85
4.2.3.	Roca Hospedante	88
4.2.4.	Control estructural	89

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de ubicación del proyecto Ayawilca, referencia de las ciudades y proyectos mineros cercanos (Tinka Resources, 2023).	13
Figura 2 Solubilidad de metales en fluidos hidrotermales en función a 4 parámetros: “A” temperatura, “B” salinidad de fluido, “C” pH y (D) concentración de H ₂ S. En cada parámetro se presenta un conjunto de características física y químicas. No se muestra la solubilidad para la galena, debido a que es ligeramente más baja que la esfalerita (Fontboté, Kouzmanov, Chiaradia, & Pokrovski, 2017).....	15
Figura 3 “A” Diagrama Log fS ₂ vs de T muestra los estados de sulfuración (verde) de los fluidos hidrotermales basados en ensambles minerales de sulfuros estables (Einaudi et al 2003). FeS (mol%) en el contenido de esfalerita (rojo) puede indicar la temperatura o fS ₂ ((Barton y Toulmin, 1964). “B” Log fS ₂ vs de T para depósitos hidrotermales (Fontboté, Kouzmanov, Chiaradia, & Pokrovski, 2017).....	16
Figura 4 Figura de pH vs temperatura de Terry Leach, actualizado por Corbett y Leach (1998), para el simposio de Terry Leach en 2008 (Corbett, 2018), muestra los minerales comunes de alteración en un sistema hidrotermal.....	17
Figura 5 Rangos de Temperatura para la formación de minerales de alteración hidrotermal (Corbett, 2018).....	18
Figura 6 Propagación de múltiples frentes de reacción durante el flujo del fluido originado de la fuente del fluido (MEINERT, DIPPLE, & NICOLESCU, 2005).	22
Figura 7 Etapas de formación de un depósito skarn asociado a un plutón (MEINERT, DIPPLE, & NICOLESCU, 2005).....	23
Figura 8 Estructura de un sistema pórfido de Cu mostrando la relación espacial de los distintos depósitos asociados (Sillitoe, 2010).....	26

Figura 9 Principales bandas de absorción en el espectro SWIR ((Herrmann, Blake, & Doyle, 2001).....	28
Figura 10 a) Mapa esquemático mostrando los tres elementos dominios morfotectónicos de los Andes Peruanos Centrales (contiene elementos del INGEMMET, 1999; Benavides-Cáceres, 1999), los márgenes longitudinales de la franja y el segmento de subducción plana (RS:Es Estructura Romeral, HD: Deflexión de Huancabamba, AB: Deflexión de Abancay. b) Sección cruzada esquemática de los Andes centrales peruanos (modificado de Ramos y Aleman, 2000) (Scherrenberg, Holcombe, & Rosenbaum, 2014).	30
Figura 11 Mapa Geológico y estructural de la zona centro del Perú (Pfiffner, 2013). .	35
Figura 12 Franjas metalogénicas del centro y sur del Perú (Fontboté, 2019)	38
Figura 13 Mapa geológico y sección transversal del complejo domo-diatrema y mineralización de Cerro de Pasco. A) Localización de Cerro de Pasco. B) Plano geológico. C) Afloramiento de trachita porfirítica. (Rottier, Kouzmanov, Casanova, Wälle, & Fontboté, 2018).....	41
Figura 14 Geología de Cerro de Pasco A) Plano geológico del nivel 1200; B) Plano geológico del nivel 1600; C) Sección SW-NE a lo largo de la línea A-B; D) Sección E-W a lo largo de la línea C-D (Rottier, Kouzmanov, Wälle, Bendezú, & Fontboté, 2016)	42
Figura 15 Geología regional en el proyecto Ayawilca (Tinka Resources, 2023)	47
Figura 16 Geología local del Proyecto Ayawilca.....	50
Figura 17 Secuencia paragenética del proyecto Ayawilca (Uzieda, Fontboté, & Kouzmanov, 2020) A) Secuencia paragenética del depósito Ayawilca modificado de Benites et al. (2019). B) Representación esquemática de los estadíos A, B, y C en un diagrama modificado de Einaudi et al. (2003) de log fS2 vs temperatura basado en los	

ensambles de sulfuros; las líneas rojas indican FeS (mol%) contenidos en la esfalerita (Barton & Toulmin, 1966); empieza en la temperatura A basado en Harlaux (2019). C) Veta del Estadio A, la flecha roja indica la dirección de crecimiento del cuarzo. D) Cavidad en la pirrotita relleno de casiterita, stanita y arsenopirita. E) Estadio A de pirrotita alterado a marcasita (estadio B) y cortado por el estadio C (carbonato de Mn-Fe). asp: arsenopirita; cst: casiterita; cp: calcopirita; hrz: herzenbergita; mrc: marcasita; po: pirrotita; qz: cuarzo; st: Estannita.....52

Figura 18 Registro de datos estructurales mediante IQLogger (Reflex, 2021).....64

Figura 19 Distribución espacial y porcentajes de mineralización del estadio Pre-A en el proyecto Ayawilca.....69

Figura 20. Distribución espacial y porcentajes de mineralización del estadio A en el proyecto Ayawilca.....69

Figura 21 Distribución espacial y porcentajes de mineralización del estadio B en el proyecto Ayawilca.....71

Figura 22 Distribución espacial y porcentajes de mineralización del estadio C en el proyecto Ayawilca.....72

Figura 23 Distribución espacial y porcentaje de mineralización del Estadio Pre-A en Ayawilca Oeste.....76

Figura 24 Distribución espacial y porcentaje de mineralización del Estadio A en Ayawilca Oeste.....76

Figura 25 Distribución espacial y porcentaje de mineralización del Estadio B en Ayawilca Oeste.....77

Figura 26 Distribución espacial y porcentaje de mineralización del Estadio C en Ayawilca Oeste.....77

Figura 27 Distribución espacial de los minerales de alteración en Ayawilca Oeste.....78

Figura 28 Distribución espacial y porcentaje de mineralización del Estadio Pre-A.....	82
Figura 29 Distribución espacial y porcentaje de mineralización del Estadio A en Ayawilca Sur.	83
Figura 30 Distribución espacial y porcentaje de mineralización del Estadio B en Ayawilca Sur.	83
Figura 31 Distribución espacial y porcentaje de mineralización del Estadio C en Ayawilca Sur.	84
Figura 32 Distribución espacial de los minerales de alteración en Ayawilca Sur.	84
Figura 33 Minerales de alteración asociados a los estadios de mineralización del Proyecto Ayawilca.....	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Instrumentos de recolección de datos: técnica, materiales y	66
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS

Act:	Actinolita
Asp:	Arsenopirita
Bn:	Bornita
Cb:	Carbonato
Chl:	Clorita
Cp:	Calcopirita
Ct:	Calcita
Cv:	Covelita
CRD:	Deposito de reemplazamiento en carbonatos (Carbonate replacement deposit)
Dg:	Diegenita
Dik:	Dickita
Gn:	Galena
Hm:	Hematita
Hzb:	Herzenbergita
I:	Illita
LA-ICP-MS:	Ablación de Laser Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry)
Lo:	Lolingita
Mar:	Marcasita
Mt:	Magnetita
MTFB:	Faja plegada y corrida del Maraño (Maraño fold and thrust belt)
PIMA:	Analizador Infrarrojo Portable de mineral (Portable Infrared Mineral Analyzer)
Po:	Pirrotita
Py:	Pirita

Qz: Cuarzo

SIMS: Espectrometría de masa de iones secundarios (Secondary ion mass spectrometry)

Sm: Esmectita

Stn: Estanita

STFB: Faja plegada y corrida Sub-Andina (Sub Andean fold and thrust belt)

Tlc: Talco

Tr: Tremolita

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

El Perú es uno de los mayores productores de Ag, Cu, Zn, Pb, Bi, Sn y Au, algunos de estos metales son producidos principalmente por depósitos con un zonamiento de mineralización de mena de Cu en el centro y Zn-Pb en sus bordes.

Trabajos previos en un yacimiento parecido y cercano a Ayawilca como Cerro de Pasco (Zn-Pb-Ag-Cu-Bi) (Rottier, Kouzmanov, Wälle, Bendezú, & Fontboté, 2016) (Rottier, Kouzmanov, Casanova, Wälle, & Fontboté, 2018), de clase mundial y también de edad Miocénica, presenta el zonamiento mencionado y muestra tres estadios principales de mineralización, los cuales tienen como característica un fluido cada vez más oxidante y ácido.

Ayawilca se ha desarrollado en un ambiente netamente sedimentario que sobreyace a un basamento metamórfico, la mineralización parece estar lejos de la fuente magmática; características particulares en relación con otros depósitos polimetálicos de la zona central del Perú, el análisis de los factores para la

formación de una mineralización económicamente importante y distribución espacial de la mineralogía servirán de referencia para la exploración y generación de nuevos proyectos en esta franja Miocénica.

1.2. Delimitación de la investigación

En el avance de la exploración en Ayawilca se ha desarrollado un continuo entendimiento del depósito mineral, para ello se han realizado un conjunto de investigaciones internas tanto como externas, de las cuales se mencionarán las relacionadas con el presente trabajo.

Benites en el 2019 realiza la secuencia paragenética del depósito Ayawilca, clasificándolos en tres estadios principales de mineralización, Quispe en el 2020 contextualiza la distribución espacial del In e identifica la relación con la mineralogía basada en la paragénesis de Benites, Ramirez 2021 caracteriza el origen de los fluidos mineralizantes, así como de los niveles de anhidrita de Zona 3 mediante relaciones isotópicas (S y O).

Sin embargo, aún no se ha esquematizado la distribución de la mineralización orientado en la evolución temporal de Benites (2019) y los halos de alteración del proyecto, especialmente en las zonas de mayor importancia económica de Zn del depósito Ayawilca (Ayawilca Sur y Oeste).

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

- ¿Cuál es la distribución espacial de los estadios de mineralización y alteración hidrotermal en la zona de zinc de Ayawilca Sur y Oeste?

1.3.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es la distribución espacial de los estadios de mineralización en Ayawilca Sur y Oeste?

- ¿Cuál es la distribución espacial de la alteración hidrotermal en Ayawilca Sur y Oeste?
- ¿Qué factores influyeron para la mineralización de alta ley de zinc en Ayawilca Sur y Oeste?

1.4. Formulación de objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Determinar la distribución espacial de los estadios de mineralización y alteración hidrotermal en la zona de zinc de Ayawilca Sur y Oeste.

1.4.2. Objetivos específicos

- Elaborar secciones que muestren la distribución espacial de los estadios de mineralización en la zona de zinc de Ayawilca Sur y Oeste.
- Elaborar secciones que muestren la distribución espacial de la alteración hidrotermal en la zona de zinc de Ayawilca Sur y Oeste.
- Describir las características relevantes para el enriquecimiento de zinc en el Sur y Oeste de Ayawilca.

1.5. Justificación de la investigación

El Perú es uno de los mayores productores de Zn en el mundo, siendo el segundo en el año 2022 con 1.4 millones de toneladas que representan el 10.8% de la producción global (USGS zinc Statistics and information 2023).

Ayawilca se encuentra cerca de yacimientos de clase mundial, asimismo si ya estuviera en producción se encontraría dentro del top 10 de productores de zinc 2020 a nivel mundial (Stifel GMP); por lo que un mejor entendimiento de la distribución mineralógica del depósito permitirá tener un panorama más claro del comportamiento mineral de la zona de zinc del Proyecto (Ayawilca Sur y Oeste),

asimismo servirá como referente para la generación de targets de exploración en Ayawilca y otros depósitos polimetálicos similares.

1.6. Limitaciones de la investigación

Los depósitos CRD como tal, no son muy conocidos o profundamente estudiados, las rocas huésped de carbonato son altamente reactivas y neutralizan casi inmediatamente los fluidos hidrotermales ácidos, lo que limita la capacidad de causar alteración hidrotermal, por lo que su zonación es muy limitada o sus ensambles minerales son un tanto variables entre un depósito u otro, ya que muchos precipitan en condiciones epitermales.

Depósitos con valores económicos de Zn-Pb-Ag+/-Sn-In y con la misma edad no han sido reportados en esta parte del Perú, por lo que su entendimiento es relativamente nuevo y no se encuentra mucha bibliografía.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

En el afán de una mejor comprensión del depósito, así como su expansión, el proyecto Ayawilca cuenta con una serie de informes internos enfocados en la comprensión estructural y litológica, así mismo estudios recientes sobre la similitud en fases de mineralización con otros yacimientos en el Centro del Perú (Fontboté, 2016; Fontboté, 2019), trabajos de investigación de la PUCP (Pontificia Universidad Católica del Perú, 2019), en las cuales mediante una serie de secciones pulidas observadas en un microscopio petrográfico presentó 3 estadios de mineralización.

Para un mejor entendimiento de estos estadios de mineralización se ha citado los siguientes trabajos por proximidad al proyecto, semejanza mineralógica y por ser parte de la misma franja metalogénica (Miocénica).

Proceso de reemplazamiento de sulfuros revelado por análisis textural y de elementos traza LA-ICP-MS: Ejemplo de la fase de mineralización inicial en Cerro de Pasco, Perú

Bertrand Rottier (2016) realiza su trabajo en el depósito Cordillerano de metales base de Cerro de Pasco, cuya mineralización propuesta es producto de 3 estadios que comprende asociaciones de minerales de alta y baja sulfuración: Estadio “A”, cuerpos de pirrotita que al exterior muestran cuerpos de reemplazamiento de esfalerita y galena, “B” reemplazamiento masivo de pirita-cuarzo y “C” venillas de enargita-pirita Cu-Ag-(Au-Zn-Pb) de tendencia E-O y una zonación de reemplazamiento en carbonatos de Zn-Pb-(Bi-Ag-Cu).

Rottier realizó un estudio detallado de texturas y composición mineral sobre más de 15m de reemplazamiento entre cuerpos de pirrotita y reemplazamiento de pirita-cuarzo. Combinando análisis textural y de elementos traza por ablación de laser espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (LA-ICP-MS), además realizó observaciones de campo y por microscopio, a la par de un análisis de la data geoquímica.

Los resultados concluyen una secuencia hidrotermal de evolución de fluido más simple que su propuesta en un estudio previo, esta secuencia podría estar vinculado al descenso de la reducción de la roca caja según la evolución del depósito. Respecto a los estudios anteriores, se plantea que la pirrotita “A” y sus esfaleritas (+Fe)-galena preceden a los cuerpos de pirita-cuarzo “B”. Las texturas de reemplazamiento son resultado de la superposición de eventos hidrotermales que ha sido usado de manera cualitativa para ver la variación de fS_2 , fO_2 y pH, además que existe dos grados de reemplazamiento de pirrotita: (1) condiciones moderadamente ácidos, relativamente reducidos y moderadamente oxidados

(reemplazamiento de la pirrotita por pirita euhedral no porosa), (2) condiciones más ácidas y oxidadas (pirrotita por marcasita porosa y arsenopirita por pirita). El resultado de análisis LA-ICP-MS es consistente con la interpretación textural.

Cada generación de mineral muestra diferentes firmas de elementos traza, estas a su vez parecen estar dentro de inclusiones sólidas a micro-nano escala en sulfosales y sulfuros. Los valores obtenidos de As, Sb, Pb y Bi en la pirita son sistemáticamente más altos que valores publicados en sistemas epitermal y pórfido. La firma de esos elementos traza en minerales recién formados depende de la naturaleza de reemplazamientos y disolución de fases aledañas, las cuales se encuentra grabados en la composición de los diferentes tipos de pirita (PyB1-Po, PyB2-mrc, PyB2-asp, y PyB-PQB) interpretados de la misma edad, pero de diferente reemplazamiento y divergente al estadio A.

Dilución cíclica de fluidos magmáticos hipersalinos ricos en metales por fluidos magmáticos de baja salinidad: Un proceso principal de formación del gigante depósito polimetálico-epitermal de Cerro de Pasco, Perú

El artículo de Bertrand Rottier (2018) continua con la investigación del depósito cordillerano polimetálico de Cerro de Pasco (Zn-Pb-Ag-Cu-Bi), esta vez detalla mejor los estadios B y C, dando como producto la siguiente secuencia: “A” cuerpos de pirrotita que gradan al exterior en reemplazamientos de esfalerita y galena, (B1) vetas de cuarzo pirita y (B2) cuerpos de reemplazamiento de pirita-cuarzo con alteración de cuarzo-sericita \pm caolinita, (C1) zonación de cuerpos de reemplazamiento de Zn-Pb-(Bi-Ag-Cu) y (C2) vetas de enargita-pirita de dirección EW, estos dos últimos acompañados de alteración argílica avanzada.

Mediante un estudio detallado de LA-ICP-MS en inclusiones fluidas, microscopio de infrarrojo cercano para mineralización de ganga y mena de las diferentes fases de mineralización, espectrometría de masas de iones secundarios (SIMS) y datos de isotopos estables; reconstruyó la evolución de los fluidos mineralizadores y concluyó que la temperatura, salinidad y composición de los ensambles de inclusiones fluidas de los estadios: A, B1, B2 y C1, fueron formados por la mezcla de fluidos de moderada salinidad, fluidos ricos en metales con baja salinidad y fluidos menos ricos en metales; por lo que la composición y evolución de fluido fue similar en cada fase; excepto en la C2. La moderada salinidad del fluido es indudablemente de origen magmático, ya que tiene una composición de alto contenido en metales base (>1wt% de Mg, Fe, Zn y Pb), además de concentraciones superiores a miles de ppm de Sb, As, B y Li, características que hacen a este fluido más inusual.

La química y salinidad del fluido moderadamente salino no corresponde a los fluidos de densidad intermedia ni a los fluidos hipersalinos formados en la fase de separación, esto indica que el fluido magmático de moderada salinidad y rico en metales fue producto de la mezcla de fluidos hipersalinos ricos en metales base profundamente almacenados, por posteriores fluidos o vapores magmáticos de baja salinidad e intermedia densidad (ricos en Sb, As, Li y B), los cuales fueron emitidos posteriormente a la vida del sistema magmático hidrotermal. El producto es un fluido rico en metales de moderada densidad, pero menor a la del fluido hipersalino; cualidad que le permitió ascender a las condiciones epitermales poco profundas.

Los sulfuros forman minerales en los estadios A, B1, B2 Y C1, a una profundidad que varía entre <500m a 1500m, principalmente debido a la dilución

del fluido creciente moderadamente salino y rico en metales (≈ 20 wt % NaCl equiv - 220° a 280°C) por fluidos de baja salinidad (<3 wt % NaCl equiv).

Las firmas isotópicas de oxígeno de cuarzo hidrotermal de los estadios A, B1 y B2 indican que los fluidos diluyentes de baja salinidad (localizado en partes poco profundas) fueron mezclados con el vapor condensado del magma y agua meteórica. Estos fluidos diluidos de baja salinidad tenían temperatura similar al de los fluidos ascendidos de moderada salinidad, mientras que en el estadio C1 fueron enfriados y dominados por aguas meteóricas.

Las vetas de enargita-pirita del estadio C2 difieren de otros estadios en el menor contenido de salinidad y en la composición de los ensambles de inclusiones fluidas hospedadas en cuarzo y enargita. Dedujo que su formación es debido al ascenso de CO_2 concentrado en el vapor de los acuíferos dominados por agua meteórica.

Contenidos similares de metal en fluidos moderadamente salinos de estadios como A, B1, B2 y C1 contrastan con los diferentes ensambles mineralógicos, incluyendo variaciones en el contenido de elementos traza en esfalerita, pirita, enargita y en minerales de alteraciones.

La diferencia se resume en una evolución con condiciones más oxidadas y acidas desde los estadios iniciales hasta los finales, también se debe a la interacción de fluidos con la roca caja y a la mezcla con los fluidos someros y poco salinos en el lugar de formación; estos tuvieron mayor relevancia que la fluctuación del fluido inicial (moderada salinidad y rico en metales).

La dilución cíclica de un fluido hipersalino de metales base (ubicado a profundidad), por un fluido magmático de baja salinidad es importante en la formación del depósito Cordillerano Cerro de Pasco. El modelo propuesto podría

explicar las altas salinidades del fluido en otros depósitos polimetálicos donde no se han observado evidencias de fases de separación.

Mineralización Epitermal cordillerano de Cu-Zn-Pb-(Au-Ag) en el Perú Central, distrito de Colquijirca: Patrones mineralógicos de mineralización a escala del depósito

La publicación de Ronner Bendezú (2009) está enfocado en la mineralización del depósito Colquijirca (Cu-Zn-Pb-Au-Ag), a lo largo de un corredor N-S de casi 4km cuya evidencia más relevante en superficie es un complejo domo-diatrema de 1km aproximado de profundidad. El depósito ha sido zonificado como Cu-(Au) en las partes más internas (deposito Smelter) y mineralización de Zn-Pb-(Ag) a la periferia (deposito Colquijirca), lo que conduce a la propuesta de 3 estadios principales de mineralización: El estadio inicial de cuarzo-pirita (no económico), el estadio principal económico de Cu a Zn-Pb, el cual comprende un zonamiento desde la parte interna a la externa: (1) enargita-oro, (2) enargita, (3) bornita, (4) tenantita, (5) calcopirita, (6) esfalerita galena, (7) zona de carbonatos con Zn y mineralización externa estéril compuesta principalmente por calcita, y la fase final (no económica) controlada por fallas que está compuesta de calcocita, digenita y venillas de covellita, los cuales cortan y reemplazan la zona de Cu del estadio principal. Su trabajo se ha enfocado en 3 aspectos: control de movimiento de fluido, zonación y variabilidad de la mineralogía ganga en la parte interna del sistema

El trabajo de campo ocupó logueo, mapeo, muestreo y recopilación de datos del staff de Colquijirca, de los cuales se extrajeron un conjunto de fotografías y se elaboraron planos. El trabajo de laboratorio ocupó 257 muestras, de las cuales se elaboraron 154 secciones pulidas que fueron estudiadas al

microscopio y algunas a difracción de Rayos X, microscopio infrarrojo, microsonda electrónica, espectrometría Raman y microscopia por electrónica de barrido

El procesamiento de toda esta data concluyó que los patrones de mineralización del corredor Smelter-Colquijirca contiene mineralización rica en sulfuro de Cu-Zn-Pb-(Au-Ag) en la parte norte de Colquijirca, esta sobreimposición es producto de los tres estadios principales. Las rocas carbonatadas alrededor del complejo domo-diatrema fueron reemplazadas por cuarzo-pirita, estas a su vez fueron reemplazadas por el principal estadio de mineralización a lo largo del corredor. El ultimo estadio depositó calcosina en varias zonas de cobre del estadio principal y es comparable con las venillas finales de depósitos tipo pórfido de cobre, respaldando la hipótesis de que la mineralización de tipo cordillerano se forma al final de la historia hidrotermal de un sistema de pórfido de Cu. En su mayoría el estilo de mineralización pertenece al tipo Cordillerano. La parte central del sistema presenta fluctuaciones importantes de acidez por la mezcla de condensaciones de vapores ácidos oxidados y fluidos magmáticos con débil a moderada salinidad, menos ácido.

2.2. Bases teóricas científicas

2.2.1. Generalidades del Proyecto Ayawilca

Ubicación

El proyecto Ayawilca está ubicado en los Andes centrales del Perú, dentro del departamento de Pasco, provincia Daniel Alcides Carrión, distrito de San Pedro de Pillao, aproximadamente a 200 Km en línea recta al NE de la ciudad de Lima. El área del proyecto abarca los límites de las comunidades de Yanacocha y Huarautambo (Figura 1) a una elevación

que varía entre los 3300 m.s.n.m y 4400 m.s.n.m. Las coordenadas centrales se ubican en UTM 332 400E y 8847 600N (datum WGS84, Zona 18S). El proyecto se encuentra dentro de la carta geológica nacional 21J del cuadrángulo de Yanahuanca y está localizado aproximadamente 20 km al Noreste de la mina Uchucchacua (Ag-Mn) y 40km al Noroeste de la mina Cerro de Pasco (Zn-Ag-Cu).

Accesibilidad

Desde la ciudad de Lima, la principal vía de acceso terrestre al proyecto Ayawilca es mediante la carretera: Sayán – Churín – Oyón – Yanahuanca - Ayawilca a lo largo de 330km, que incluye un tramo asfaltado hasta Oyón y luego afirmado hasta la zona del proyecto. Una segunda alternativa, es la carretera central hacia el NE (Oroya-Cerro de Pasco-Yanahuanca-Ayawilca), a lo largo de 395 km aproximadamente, asfaltado hasta Yanahuanca y afirmado hasta el proyecto. El tiempo aproximado de viaje es de 8 horas y 10 horas respectivamente.

Por otra parte, la alternativa de acceso aéreo más cercano es el aeropuerto de la ciudad de Huánuco, con un tiempo de vuelo aproximado de 45 minutos. El viaje continúa por vía terrestre en dirección Sur (30km) mediante la carretera asfaltada hasta el distrito de Ambo, seguido de la ruta afirmada al SW hacia el distrito de Yanahuanca (60 km). El tiempo de viaje promedio por tierra es de 3 horas.

Figura 1 Mapa de ubicación del proyecto Ayawilca, referencia de las ciudades y proyectos mineros cercanos (Tinka Resources, 2023).



Clima

En la zona de estudio se presenta un clima frígido durante todo el año. La temporada de precipitaciones pluviales (lluvia, eventualmente granizo y nevada) es de octubre a marzo. Mientras que, la temporada seca y de menor temperatura con helada, sucede entre mayo y setiembre; la temperatura oscila entre -3°C y 20°C .

Fisiografía

El proyecto Ayawilca se ubica en la parte central de los Andes peruanos, entre la Cordillera Occidental y Oriental. Se caracteriza por presentar geformas variadas de relieves bajos a altas cumbres, su elevación es de 4200 m.s.n.m.

La vegetación en la zona es escasa a partir de los 3800 m.s.n.m., donde se encuentra principalmente variedades de gramíneas como el ichu

y la chiligua, asimismo líquenes, musgos y yaretas en las partes más elevadas.

2.2.2. Sulfuros en un Depósito Hidrotermal

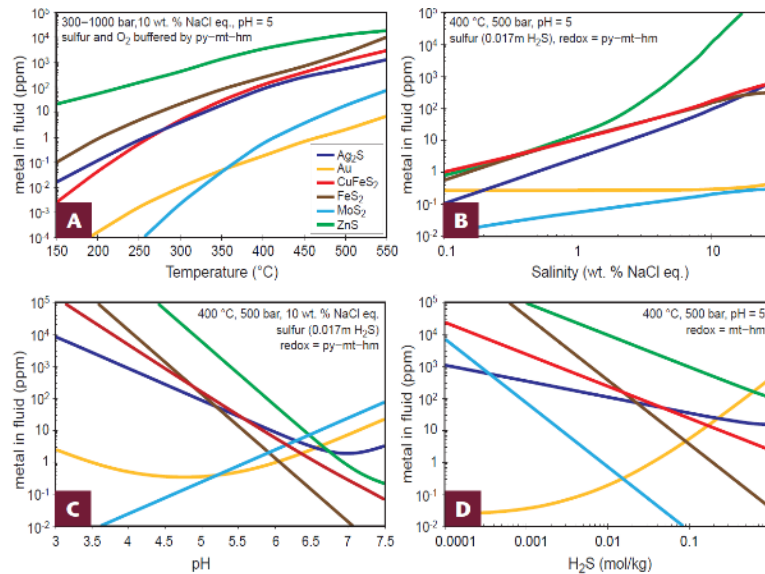
Los sulfuros minerales en un depósito hidrotermal son la fuente principal de metales base (Cu, Zn, Pb) y un número extenso de otros metales en menor concentración: Ag, As, Au, Bi, Cd, Co, Ga, Ge, In, Hg, Mo, Ni, Re, Sb, Se, Sn, Te y Tl. Los elementos trazan en los sulfuros ocurren en diferente estado químico, incluso se incorporan en la estructura cristalina de los minerales principales o como nanopartículas en otros sulfuros o sulfosales homogéneamente distribuidos en el mineral hospedante. La pirita es el sulfuro más abundante en este tipo de depósitos.

Parámetros de precipitación

Para la precipitación de fluidos hidrotermales existe 4 parámetros importantes: temperatura, acidez (pH), salinidad y fO_2 – fS_2 . Los procesos de enfriamiento, separación de fases, mezcla de fluidos e interacción con la roca influyen en estos cuatro parámetros.

El transporte del mineral es un aspecto importante y es debido a: los complejos clorurados para transportar metales base y Ag, el (álcali-)hidróxido y posibles complejos oxicluros para Mo y complejos sulfurados para Au. (Fontboté, Kouzmanov, Chiaradia, & Pokrovski, 2017).

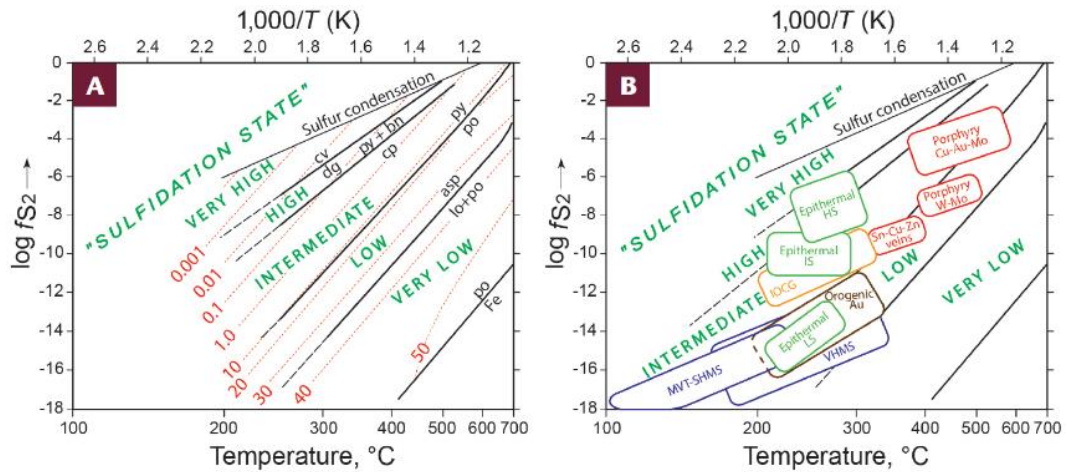
Figura 2 Solubilidad de metales en fluidos hidrotermales en función a 4 parámetros: “A” temperatura, “B” salinidad de fluido, “C” pH y (D) concentración de H₂S. En cada parámetro se presenta un conjunto de características físicas y químicas. No se muestra la solubilidad para la galena, debido a que es ligeramente más baja que la esfalerita (Fontboté, Kouzmanov, Chiaradia, & Pokrovski, 2017).



Reconstrucción de los parámetros de formación de minerales mediante sulfuros

El estado de sulfuración de un fluido hidrotermal varía en función a temperatura y log fS_2 (Fig 2. A), además determina el dominio de estabilidad de sulfuros, sulfosales y óxidos (Einaudi et al. 2003). El ambiente típico de los principales depósitos varía en términos de temperatura y log fS_2 (Fig 2. B), relacionando los ensambles minerales que permiten la evolución del estado de sulfuración del sistema hidrotermal. La zonación mineralógica de metales de sulfuros y sulfosales pueden ser usados para propósitos de exploración como guías de prospección hacia el centro del sistema mineralizado. (Fontboté, Kouzmanov, Chiaradia, & Pokrovski, 2017)

Figura 3 “A” Diagrama Log fS_2 vs de T muestra los estados de sulfuración (verde) de los fluidos hidrotermales basados en ensambles minerales de sulfuros estables (Einaudi et al 2003). FeS (mol%) en el contenido de esfalerita (rojo) puede indicar la temperatura o fS_2 ((Barton y Toulmin, 1964). “B” Log fS_2 vs de T para depósitos hidrotermales (Fontboté, Kouzmanov, Chiaradia, & Pokrovski, 2017).



2.2.3. Alteraciones Hidrotermales

Es la transformación de una asociación mineral original, en una más estable bajo las nuevas condiciones de temperatura, presión y sobre todo en equilibrio con el fluido hidrotermal que atraviesa la roca (Fontboté, 2003).

Minerales de Alteración Hidrotermal

Comprende un conjunto de minerales asociados a un tipo de alteración hidrotermal acorde a una terminología común en la exploración, Corbett y Leach representaron una base ideal para cualquier tipo de alteración hidrotermal en una mineralización epitermal y pórfido (fig). En la figura original Terry Leach no puso los valores de pH y temperatura debido a que existe otras variables para tener en cuenta, por lo que los valores que se muestran en el siguiente grafico deben ser tomados como indicativos (Corbbet, 2018).

Esencialmente los grupos de minerales están distribuidos según la variación de pH y temperatura. Los rangos de temperatura son producto de un análisis de un sistema geotermal y otras investigaciones Corbbet y Leach, 1998).

Figura 4 Figura de pH vs temperatura de Terry Leach, actualizado por Corbett y Leach (1998), para el simposio de Terry Leach en 2008 (Corbett, 2018), muestra los minerales comunes de alteración en un sistema hidrotermal

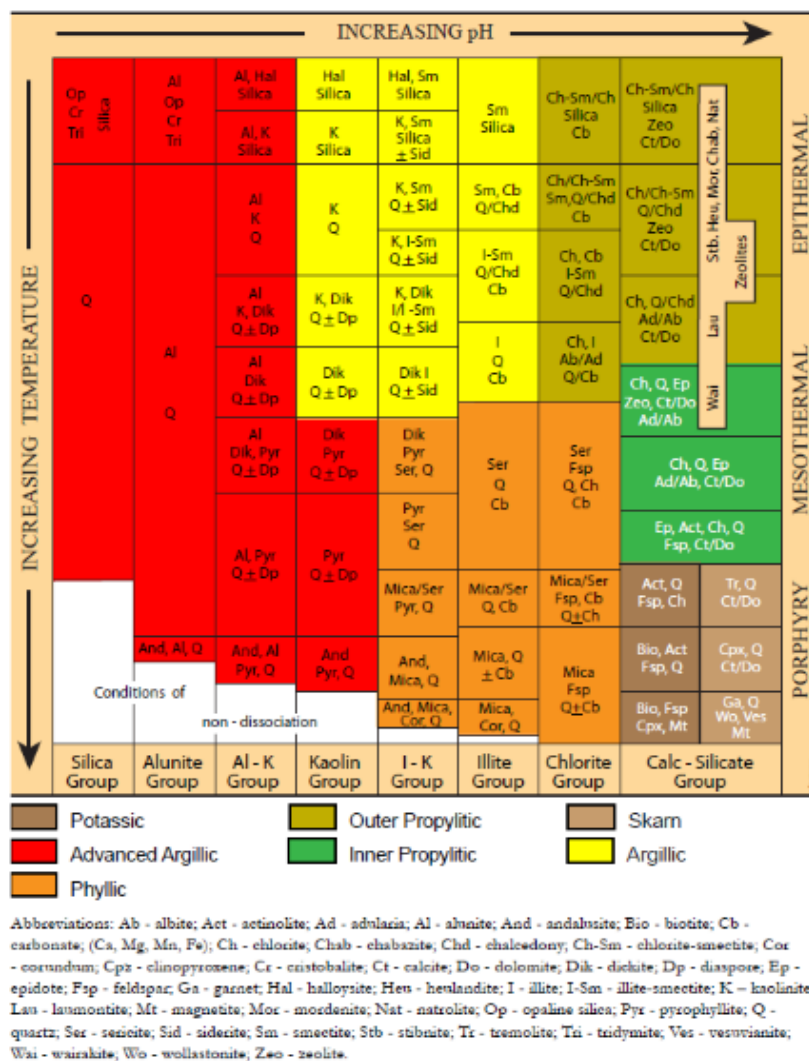
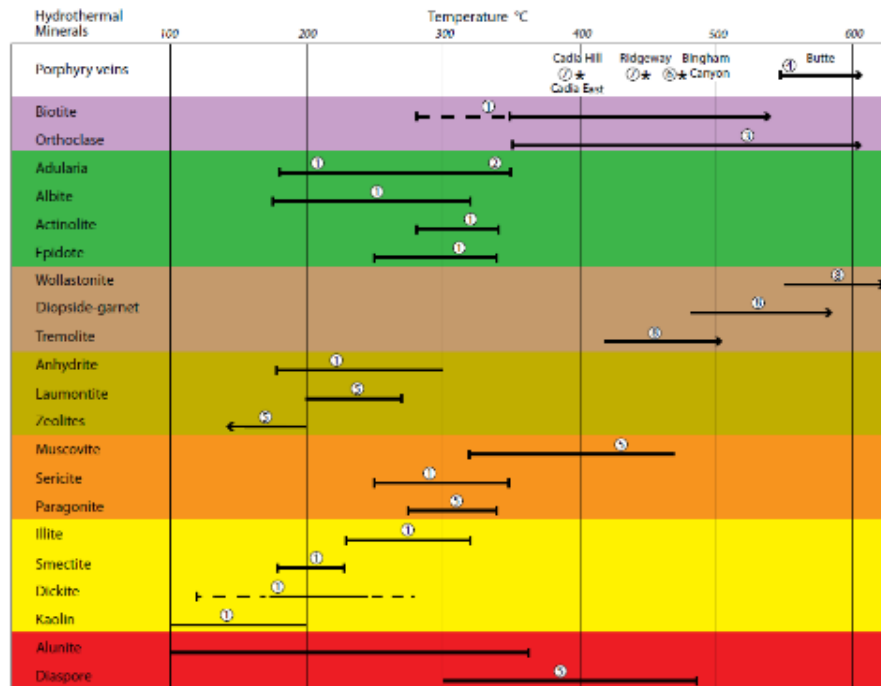


Figura 5 Rangos de Temperatura para la formación de minerales de alteración hidrotermal (Corbett, 2018).



2.2.4. Deposito Tipo CRD

Los depósitos de reemplazamiento en carbonatos son epigenéticos, relacionados a una intrusión, con sulfuros dominantes rico en Pb, Zn, Ag, Cu y Au; típicamente forman lentes o cuerpos elongados-tabulares referidos como mantos o chimeneas. El grado de mineralización es 100% cuerpos de sulfuros polimetálicos, skarn ricos en sulfuros asociados a cuerpos intrusivos sin mineralización o tipo pórfidos de Cu/Mo (Megaw, s/f).

Históricamente, la mayoría de CRD han sido formados en afloramientos con continuidad a profundidad. En algunos casos, los afloramientos descubiertos fueron pequeños respecto al volumen del sistema parcial, completamente cubiertos por roca sedimentaria o volcánica no reactiva.

Descripción General

Los CRD son depósitos que comprenden principalmente mantos y chimeneas de Pb-Zn-Ag-Cu-Au, estos cuerpos de sulfuro cortan las rocas

carbonatadas y son generalmente compuestos por galena, esfalerita, calcopirita, arsenopirita, pirita y pirrotita, además de calcita subordinada, sulfatos, fluorita y cuarzo estéril; los calcosilicatos, iron-calcic zinc y depósitos skarn de Cu pueden estar presentes o no en algunos sistemas. Evidencian que el reemplazamiento supera enormemente el relleno de espacios o deposición sin-genética. Los fluidos del CRD son calientes (250-500° C), reducidos, ácidos y salinos (>15% NaCl equiv.). Estos depósitos tienen un sistema con una intrusión central; estudios de isótopos de azufre, oxígeno, carbono y plomo indican un componente magmático próximo a los fluidos. Las firmas sedimentarias de salmuera y de fuentes meteóricas, aumentan cada vez más con la distancia del intrusivo.

La mineralización es asociada a una intrusión de varios eventos, que implica desde las fases tempranas hasta las finales, involucra intrusiones félsicas y comprende fases extrusivas; la intrusión está estrechamente relacionada con la mineralización y es por lo general de fases más envolventes, esas fases no son expuestas en algunos distritos, sin embargo, son encontradas cuando el sistema es explorado a profundidad, en secuencias carbonatadas a lo largo de márgenes de plataformas o basamentos altos y a lo largo de estructuras cortando cuencas, generalmente en la parte inferior de la sección relacionada al intrusivo principal de la mineralización.

Modelo Genético

Estudios geológicos y geoquímicos sugieren la génesis para el CRD (Prescott 1926; Megaw 1990; Beaty et al. 1990a; Titley 1993) se desarrolla mediante la permeabilidad controlada estructuralmente, los fluidos mineralizante migran grandes distancias antes de precipitar como sulfuros; sin embargo, en algunos casos esto suceden adyacente al cuerpo intrusivo. La distancia de

migración permite a los fluidos mezclarse con aguas meteóricas y connatas, también con salmueras de cuencas; así adquieren elementos exóticos, sulfuros y contenidos isotópicos que cubren la firma original del sistema. Los contrastes de permeabilidad y porosidad operan a escala micro y macro, con proximidad a las trayectorias de migración de fluido y la fuente.

La mineralización parece proceder de forma casi simultánea al proceso de disolución de carbonatos y deposición de los sulfuros del fluido mineralizante. Este mecanismo de reemplazamiento es apoyado por fluidos que migran mediante intrusiones y la mineralización previa de zonas con cuerpos en crecimiento.

Los fluidos de sulfuros agotados tienen suficiente potencial químico o térmico para realizar la alteración, depositar metales residuales y sílica; finalmente redepositar carbonatos disueltos en el proceso de mineralización. Los cuerpos son probablemente controlados por estructuras mayores que alimentan fluidos en ciertas áreas más rápido que en otras, además son desarrollados de manera rápida y son emplazados secuencialmente. Los sistemas principales han repetido sus pulsos sobrescribiendo la mineralización previamente formada, esto incluye repeticiones de mineralización-alteración prógrada y retrógrada, resultando en una paragénesis superpuesta y con recristalización de la mineralización, especialmente a lo largo de la trayectoria del fluido, seguido de varios lotes de fluidos mineralizantes.

La complejidad del depósito resultante es una extensión natural de la fuerza y longevidad del evento hidrotermal y el control en mineralización.

2.2.5. Deposito tipo Skarn

Meinert (2005) plantea que es uno de los depósitos más abundantes en la corteza terrestre y se ha formado en rocas de casi todas las edades durante metamorfismo regional o de contacto, en una variedad de procesos metasomáticos que involucran fluidos magmáticos, metamórficos, meteóricos o marinos. Los minerales característicos en este tipo de depósito son calco-silicatos, como granates y piroxenos.

Si bien es cierto, este tipo de depósito se encuentra adyacente a intrusivos, aunque puede formarse a lo largo de fallas y zonas mayores de cizalla, en sistemas geotermales de poca profundidad, en el piso marino, en las profundidades de la corteza inferior y en terrenos metamórficos profundamente enterrados. Entonces, para formar un skarn no es estrictamente necesario plutones ni calizas (MEINERT, DIPPLE, & NICOLESCU, 2005).

Los depósitos skarn tienen una variedad de metales que incluyen Fe, O, Cu, Pb, Zn, Mo, Ag, Au, U, elementos de tierras raras, F, B y Sn; los depósitos más económicos están estrechamente relacionados con el magmatismo.

Dos términos son usados en la zonación para indicar el protolito sedimentario o ígneo, exoskarn y endoskarn respectivamente, estos pueden referirse también a la ubicación de skarn en relación con el plutón (parte interna vs externa), aunque esta no es significativa en presencia de múltiples plutones o a la presencia de rocas no ígneas.

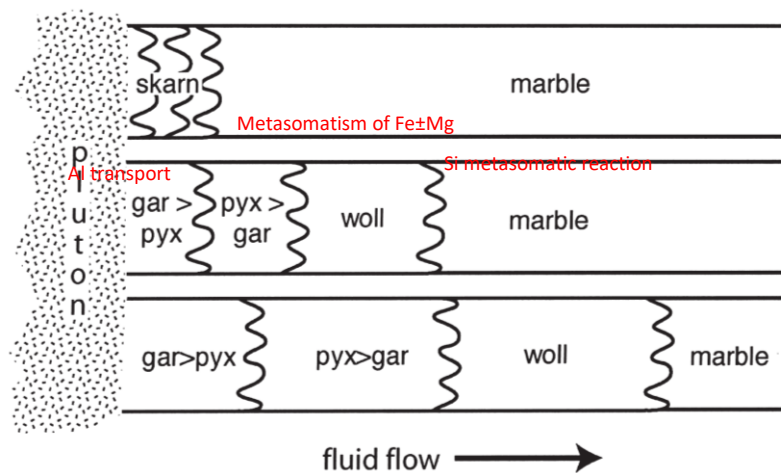
Etapas de formación

La fase prógrada se divide en dos etapas:

El metamorfismo isoquímico comprende recristalización metamórfica y cambios mineralógicos (reflejando el protolito), disolución de CaO y MgO en el magma.

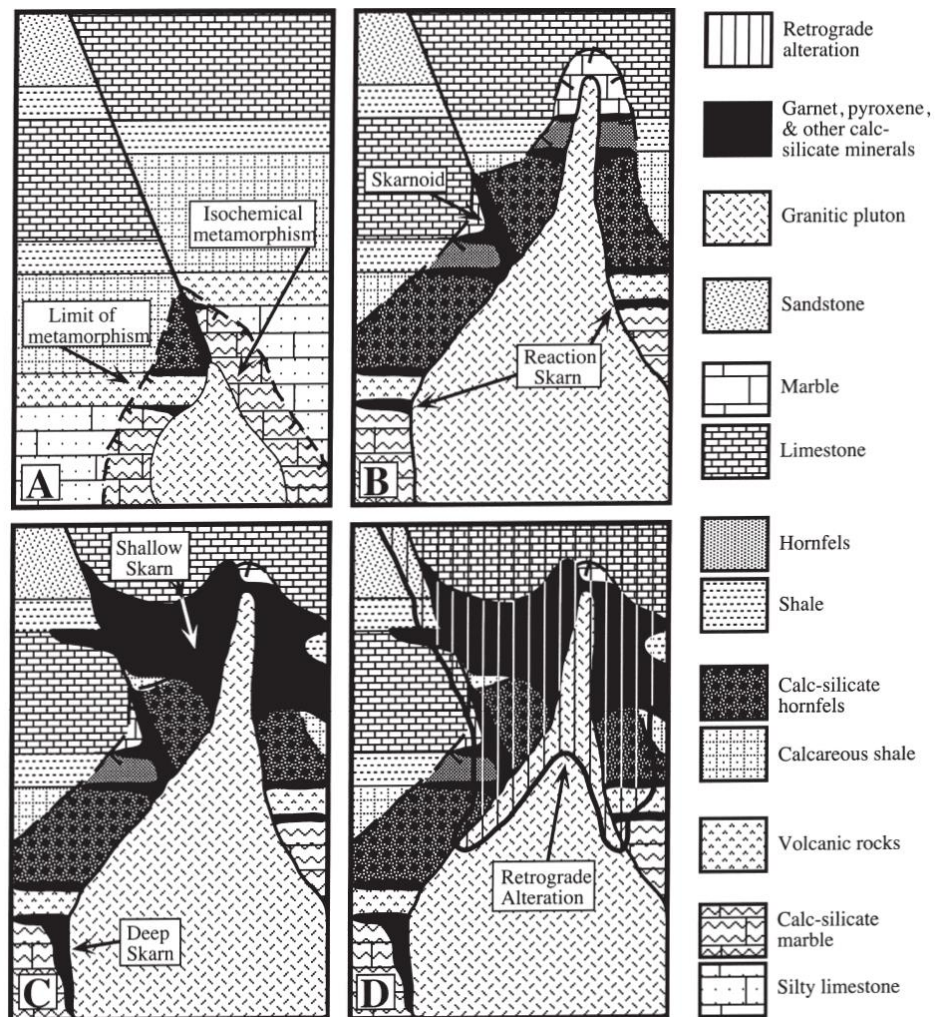
Múltiples etapas de metasomatismo, cristalización del magma y liberación de una fase fluida producen skarn metasomáticos, en el que se generan minerales anhidros por los fluidos de derivación magmática a temperaturas de 400°-800°C. Usualmente, en esta etapa comienza la mineralización.

Figura 6 Propagación de múltiples frentes de reacción durante el flujo del fluido originado de la fuente del fluido (MEINERT, DIPPLE, & NICOLESCU, 2005).



Ahora se sabe que la fase retrograda es causada mayormente por fluidos magmáticos en etapas posteriores, en lugar de como se creía antes, que era resultado de incursión de aguas meteóricas (Meinert 2020). Esta fase comprende el reemplazamiento hidratado, causando la alteración de los minerales de las etapas anteriores. Esta fase se rige por un control estructural; en algunos casos la mineralización se extiende hasta esta etapa.

Figura 7 Etapas de formación de un depósito skarn asociado a un plutón (MEINERT, DIPPLE, & NICOLESCU, 2005).



En los skarn distales las etapas que involucran el metamorfismo de contacto e intercambio directo de fluidos están ausentes, se forman principalmente depósitos de Zn-Pb en el rango de temperatura de 210°-350°C. Hay que destacar que el desarrollo del skarn depende de la profundidad de formación, en niveles menos profundos tiene amplia extensión lateral; mientras que a profundidad es relativamente pequeña en comparación de la aureola de metamorfismo. Además, la alteración retrograda es más extensa en niveles someros.

2.2.6. Deposito Polimetálico Cordillerano

El termino deposito cordillerano de metales base fue introducido por Sawkins (1972) para referirse a depósitos polimetálicos epitermales. El termino deposito o vetas de cordilleranas de metales base fue usado progresivamente por Einaudi (1982), Gilbert y Park (1986), Bartos (1987), Macfarlane y Petersen (1990), Hemley y Hunt (1992), BendeZú y Fontboté (2002) y BendeZú et al (2003,2008).

Fontboté en el 2020 menciona que los depósitos de Zn-Pb dentro del sistema pórfido incluye: depósitos formados posteriormente a una fase skarn prógrada y a un reemplazamiento de cuerpos y vetas sin ensambles de skarn que son desarrollados en las partes superficiales del sistema, predominantemente en un ambiente hidrotermal, este último es frecuentemente llamado deposito polimetálico cordillerano, depósito de reemplazamiento en carbonatos (CRD) o depósitos de intermedia sulfuración. El termino cordillerano es preferido por que estos depósitos no están restringidos a reemplazamiento en carbonatos y generalmente incluyen ensambles de baja y/o alta sulfuración.

Los depósitos polimetálicos cordillerano (Cu-Zn-Pb±Ag-Au-Bi) son formados en ambientes epitermal y sub-epitermal, con estadíos que gradan de baja a alta sulfuración, están asociados a sistemas pórfidos de series calco-alcalinas con abundantes en sulfuros, depositados en ambientes poco profundas y generalmente a temperaturas bajo 350°C. Estos depósitos son tardes en la evolución del sistema porfídico y depositan principalmente aprovechando espacios vacíos en rocas silicatadas y como cuerpos de reemplazamiento en rocas carbonatadas, a menudo con un zonamiento bien desarrollado (Fontbote, 2019).

Los depósitos cordilleranos polimetálicos frecuentemente muestran los siguientes eventos:

ESTADÍO PRE-A Algunos depósitos presentan una etapa previa de skarn retrogrado con talco, serpentinita, magnetita, siderita, cuarzo y actinolita-tremolita, cuyo contenido de ensambles ricos en magnesio en protolitos desprovistos de dolomita diagenética apuntan a una dolomitización hidrotermal previa.

ESTADÍO A (LS, Zn-Pb±Cu±Sn, ~350-220°C) Caracterizado por un ensamble de baja sulfuración con pirrotita, magnetita, esfalerita (>30mol% FeS), cantidades variables de galena, calcopirita y arsenopirita. algunas veces con Sn como casiterita, estannita y herzenbergita en depósitos reducidos, donde la esfalerita puede contener altos valores de In. Los principales minerales ganga son cuarzo y clorita.

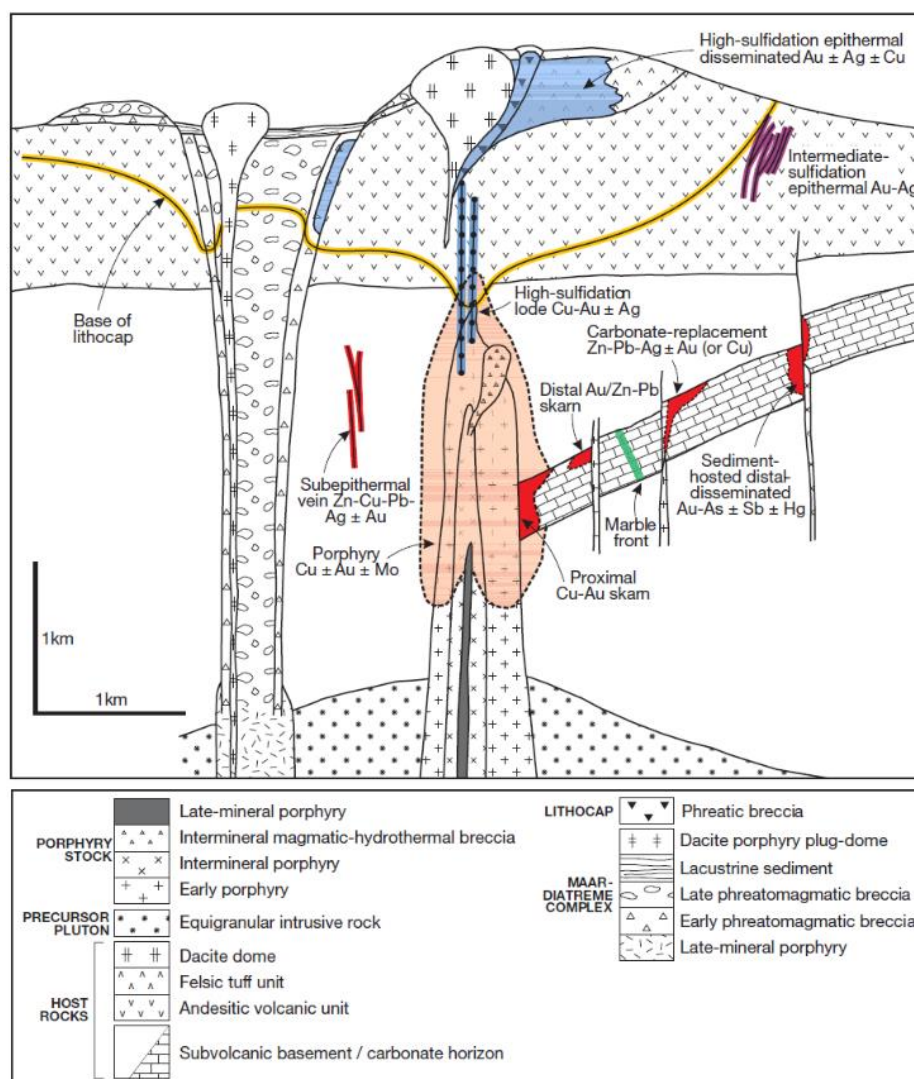
ESTADÍO B (IS, ~280-200°C) Consiste predominantemente en Pirita, frecuentemente idiomórfico y de grano grueso acompañado de cuarzo, también puede contener cantidades menores de wolframita y oro. La aparición de sericitización indica descenso de pH comparado con el estadio A.

ESTADÍO C (HS/IS, ~280-150°C) Etapa que puede alcanzar alta sulfuración en las partes internas (Cu-Zn±Au) con ensambles de enargita/famatinita, covelita, esfalerita (-Fe), colusita, cuarzo alunita y caolinita, que gradan hacia las partes más externas a intermedia sulfuración (Zn-Pb-Ag) con ensambles de esfalerita (±Fe a -Fe), galena, tenantita-tetraedrita, bismunitita, otras sulfosales, calcopirita, rodocrosita y carbonatos de Mn-Fe(±Zn) y ±alabandita. Este estadio se presenta en vetas que pueden extenderse por

kilómetros en rocas detríticas, volcánicas y otras pocas reactivas; mientras que en los carbonatos forma cuerpos de remplazamiento y brechas de disolución.

La mayoría de los yacimientos presentan temperaturas de ~350-~250°C en los estadios iniciales A y B, el estadio C de ~250-~150°C. asimismo muestran salinidad moderada en los tres estadios.

Figura 8 Estructura de un sistema pórfido de Cu mostrando la relación espacial de los distintos depósitos asociados (Sillitoe, 2010).



2.2.7. Analizador Portátil Infrarrojo de Minerales (PIMA)

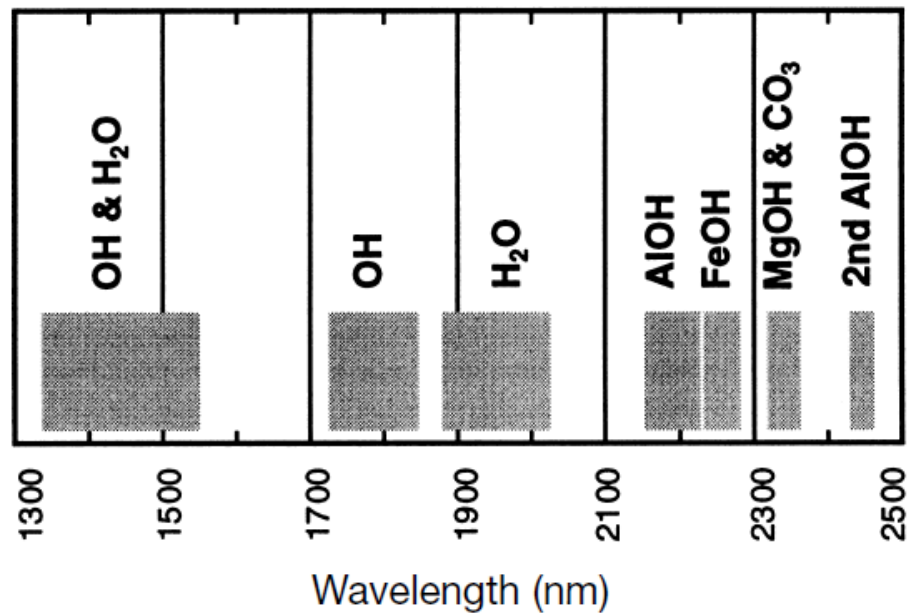
Es un equipo portátil que realiza un análisis espectral basado en la espectrometría infrarroja de ondas cortas (SWIR) que va desde 1300 hasta 2500

nm, este rango espectral incluye características de absorción atribuidas a enlaces moleculares como OH, H₂O, CO₃, NH₄, AlOH, FeOH y MgOH (Thompson et al 1999), siendo así útil para reconocer filosilicatos, silicatos y sulfatos hidroxilados, carbonatos y minerales asociados a amonio (NH₄) (Pontual et al 1997a). Especies minerales en estos grupos contienen características dentro del SWIR que habilita su identificación en la mayoría de las muestras geológicas secas incluyendo rocas, polvo, testigos y suelos. Las magnitudes relativas de varias características de absorción espectral permiten la estimación de la relativa abundancia de minerales identificables en ensambles simples (Thompson et al 1999) y el grado de cristalinidad de algunos filosilicatos. Además, la relación entre la longitud de onda de ciertas características de absorción espectral y variación composicional de algunos minerales (mica blanca y clorita) habilita la estimación aproximada de la composición mineral por la espectrometría SWIR.

Esta técnica permite una identificación rápida de campo de los minerales de alteración hidrotermal, la delimitación de zonas de alteración, la variación de la composición mineral, cristalinidad y relativa abundancia de los minerales.

El PIMA ha sido usado con mucho éxito para minerales epitermales de alta y baja sulfuración, en yacimientos volcanogénicos de sulfuros masivos (VMS) y para yacimientos relacionados a intrusivos. Los casos estudiados con estos sistemas demuestran la habilidad para adquirir rápidamente y procesar la información obtenida con el espectrómetro para realizar logeos de la perforación y mapas. La información resultante es crítica para definir objetivos de exploración. (SPECTRAL INT. INC, 2005).

Figura 9 Principales bandas de absorción en el espectro SWIR ((Herrmann, Blake, & Doyle, 2001)



- **Marco Geológico**

Elementos Morfotectónicos de los Andes Centrales del Perú

Los Andes en la parte central y norte del Perú, han experimentado ~200 Ma de levantamiento y exhumación en respuesta a la subducción de la placa de Nazca a la placa Sudamericana (Ramos y Aleman, 2000). La evolución Mesozoica involucró la extensión de las placas lo que dio lugar a la apertura de la fosa Oeste Peruana, seguido del incremento del acoplamiento de placas y el inicio de la orogenia Andina a los 80Ma (Benavides-Caseres, 1999).

La orogénesis Andina involucro tres principales fases de acortamiento que corresponden a convergencia de placas rápidas de trinchera-perpendicular a lo largo del margen andino (Martinod, 2010); La orogenia peruana del Cretácico Superior, la orogenia Incaica de del Paleoceno-Eoceno y la Orogenia Quechua del neógeno (Steinmann, 1929).

Los episodios posteriores fueron aparentemente asociados al impacto del dorsal y la subducción plana (entre ~15-11Ma; Hampel , 2002; Rosenbaum , 2005), lo cual incremento el acoplamiento de placas y acortamiento corteza, reduciendo actividad arcos magmáticos y actividad volcánicos , así como actividad hidrotermal y formación de yacimientos (Gutscher, 2000; Rosenbaum, 2005; Martinod, 2010; Bissig, 2015).

La parte central del Perú comprende 3 principales dominios morfotectónicos: La cordillera Occidental (Ayawilca), Cordillera Oriental y la Franja corrida y plegada Sub-Andina.

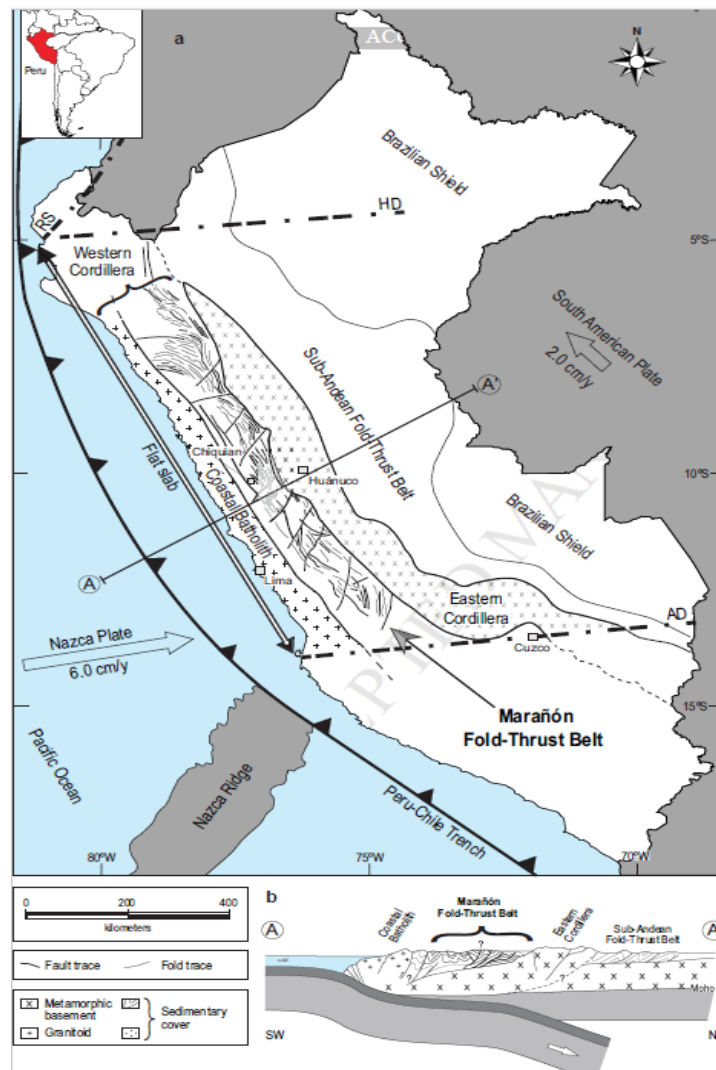
La Cordillera Occidental comprende una franja Oeste, Batolito de la Costa y en el Este la faja plegada y corrida del Marañón; asimismo hacia el Este se encuentra la Cordillera Oriental.

La faja plegada y corrida del Marañón (MTFB, siglas en inglés) es un orógeno de margen convergente asociado a la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, de tendencia NNE-SSW a lo largo de ~1000 km hacia el norte del Perú.

El MTFB se encuentra delimitado en el Norte por la deflexión de Huancabamba y en el Sur por Andahuaylas. Esta franja contiene de forma distribuida principales depósitos epitermal, pórfido y skarn; algunos en el límite con el alto basamento siendo la mayor parte del Mioceno medio y más jóvenes (Cerro de Pasco, Morococha, Pierina, Lagunas Norte y Yanacocha), algunos ligeramente más antiguos incluyendo el depósito del Oligoceno Milpo-Atacocha y Eocénico Quicay. Depósitos más antiguos están ausentes debido a que posiblemente fueron erosionados, por otro lado, los depósitos Eoceno-Mioceno fueron preservados debido al clima semiárido (Rainbow et

al, 2006), bajas cantidades de erosión (Spiking and Simpsons, 2014) y condiciones tectomagmáticas favorables (Bissig et al., 2015).

Figura 10 a) Mapa esquemático mostrando los tres elementos dominios morfoTECTÓNICOS de los Andes Peruanos Centrales (contiene elementos del INGEMMET, 1999; Benavides-Cáceres, 1999), los márgenes longitudinales de la franja y el segmento de subducción plana (RS: Es Estructura Romeral, HD: Deflexión de Huancabamba, AB: Deflexión de Abancay. b) Sección cruzada esquemática de los Andes centrales peruanos (modificado de Ramos y Aleman, 2000) (Scherrenberg, Holcombe, & Rosenbaum, 2014).



Configuración geológica regional

Estratigráficamente, la zona central del Perú comprende formaciones progresivamente más antiguas en dirección Este, abarcando desde el Neoproterozoico-Paleozoico al Terciario medio. Las rocas más antiguas son de edad Neoproterozoica, específicamente los esquistos y un complejo de rocas metamórficas pertenecientes al complejo Marañón; estos fueron formados en una cuenca de sedimentación continua y alargada, los controles estructurales que delineaban la cuenca siguieron la dirección andina peruana (NO-SE).

Los estratos paleozoicos tienen afloramientos dispersos que sobreyacen en discordancia al complejo Marañón o entre ellas mismas, estas fueron afectadas por una serie de episodios orogénicos, como los plegamientos y fallamientos en las pizarras y filitas del grupo Excelsior del Devónico. Las rocas del Carbonífero, como el Grupo Ambo presentan secuencias continentales de areniscas, lodolitas y conglomerados polimícticos que los ríos llenaron con material proveniente de la región interior del escudo brasileño, así como eventos volcánicos explosivos. En el Carbonífero Superior y Pérmico, se presentan algunos niveles calcáreos como las del grupo Copacabana, muy resistentes a la erosión y a la base areniscas finas (Grupo Tarma). Las partes más potentes fueron depositadas en un conjunto de rifts vinculados a zonas de falla de deslizamiento.

Del descanso de las tensiones de formación de cuenca extensivas, resultó una amplia subsidencia regional con un ancho mar dentro del continente, en el cual las arcillas, y sedimentos ricos en materia orgánica (Formación Ene - Pérmico medio Superior) fueron depositados. Respecto a

la fase controlada por la falla anterior, la ubicación de la subsidencia del post-rift Ene fue desplazada lateralmente hacia el Este, la deformación pre-Mitú es datado como Pérmico Superior a Triásico Inferior (Rosas, Fontboté, & Tankard, 2007).

Las capas Rojas del Mitú del Triásico Inferior fueron depositadas en un set de rifts, cuyo relleno consiste en depósitos molásico clásticos constituido por areniscas rojas, conglomerados y volcánicos andesíticos. La sedimentación del Pucará (Triásico Superior-Jurásico Inferior) era un hundimiento regional en el que los depocentros locales fueron formados por hundimientos transtensional intermitentes, los diversos depocentros se unieron para formar la amplia cuenca epicontinental, expresada por transgresión generalizada de sedimentos marinos que continuó parcialmente hasta el Cretácico Superior (Megard, 1978; Benavides, 1999). Las partes más potentes de la secuencia carbonata del Pucará (Triásico superior-Jurásico inferior) son asociados con fallas principales NO, que se atribuye al hundimiento transtensional.

En la serie inferior del Jurásico Medio el mar es retirado y es interrumpida la sedimentación carbonatada. Del cual se tuvo material continental y capas rojas al norte del Perú. En el Callovian comienza un nuevo régimen extensional geodinámico y se establece material silicoclástico y deltaico costal al Oeste (Benavides, 1999). La Formación Oyón del Jurásico Superior compuesta de capas delgadas y oscuras de grano fino de areniscas grawacas y lutitas intercaladas con mantos de carbón.

Durante el Cretácico; la transgresión establece al mar de forma somera sobre la corteza continental; este mar es de material clástico

transportado del escudo brasileño y también del geoanticlinal del Marañón. El grupo Goyllarisquizga presenta una serie clástica y calcárea de la cuenca Cretácea occidental, teniendo areniscas con estratificaciones cruzadas y de grano fino a grueso, en partes algo conglomeraditas con intercalaciones muy delgadas de limoarcillitas grises, horizontes de lutitas y algunas calizas. Sucedió por una secuencia de aguas profundas, la Formación Pariahuanca del Cretácico inferior está compuesta por calizas y junto a la formación Santa estas unidades son calcáreas.

Durante el Cretáceo superior una menor cantidad de materiales Clásticos fueron transportados; en cambio las calizas fueron depositadas en un mar marginal limpio, las formaciones de este periodo presentan por lo general contactos concordantes de manera secuencial. La Formación Chulec presenta secuencias de delgadas calizas y margas de color amarillo terroso, sin embargo, a diferencia de otras formaciones esta tiende a engrosar en la parte central. La Formación Pariatambo tiene intercalaciones de Calizas con limoarcillitas calcáreas gris oscuras; se puede observar restos de amonites. La formación Jumasha presenta estratificaciones macizas de calizas grises, este es característico de los andes centrales y zona de cuenca occidental, esta formación se presenta frecuentemente plegada. La Formación Celendín se presenta en calizas margosas y nodulares pobremente estratificados y con abundantes fósiles.

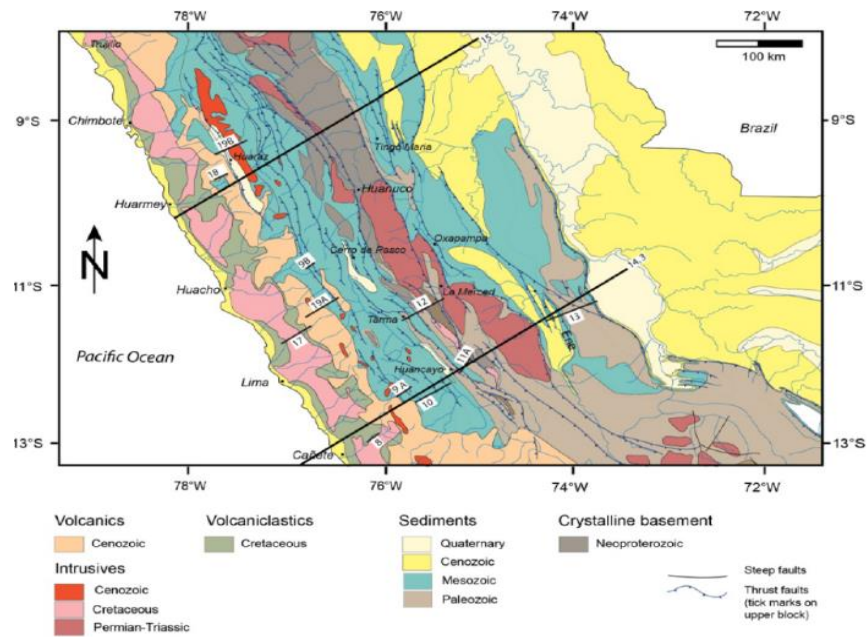
La formación Casapalca se sobrepone concordantemente sobre el Celendín y al Este, discordantemente sobre otras formaciones más antiguas; la litología es diferente a las demás formaciones del Cretáceo infrayacente, consiste en areniscas rojas friables, margas lodolitas y conglomerados, el

color rojo es abundante; de aguas deltaicas poco profundas y depósitos continentales derivados probablemente de partes emergentes al Oeste.

El Cenozoico esta caracterizado por actividad ígnea, ya que desde el Paleoceno tuvo mayor envergadura volcánica. La formación Yantac desarrollado hasta el Eoceno, presenta secuencia volcano-sedimentaria, también otras formaciones como el volcánico Carlos Francisco, Grupo Calipuy del Eoceno-Mioceno presentan estratos volcánicos variados, principalmente rocas piroclásticas de composición andesítica, también ignimbritas dacíticas, el volcánico Colqui y volcánico Millotingo del Eoceno – Oligoceno, que contienen derrames andesíticos, el volcánico Rumillana del Mioceno Superior con volcanoclastos, el volcánico Pocococha del Mio-Plioceno con derrames andesíticos y la Formación Huayllay del Plioceno, después de la última fase tectónica, presenta actividad volcánica con efusiones andesíticas.

La cobertura cuaternaria está distribuida irregularmente en la zona centro como resultado de procesos glaciares, aluviales, fluviales y algunos casos por pérdida de masa; su distribución es mayor en áreas adyacentes a las cordilleras y en los valles donde se encuentran como materiales aluviales del Pleistoceno o escombros de talud.

Figura 11 Mapa Geológico y estructural de la zona centro del Perú (Pffiffner, 2013).



Geología Económica/Metalogenia

El potencial de los depósitos polimetálicos en la zona central del Perú está asociada a la presencia de intrusiones Miocénicas medias y tardías, por lo que los depósitos minerales en el Centro del Perú consisten en una variedad de yacimientos de metales base de edades que asociados a la franja del Mioceno (15-5Ma; Domo de Yauli, Morococha, Cerro de Pasco, Colquijirca y Antamina). Los principales depósitos de este grupo están principalmente relacionados a intrusiones del Mioceno; estos depósitos son principalmente polimetálicos de reemplazamiento en carbonatos (CRD), vetas polimetálicas, depósitos polimetálicos epitermales, cordilleranos polimetálicos, depósitos tipo skarn de Zn-Cu, skarn de Cu-Zn.

El depósito Ayawilca presenta una edad de 23.1-22.7 Ma (Mioceno inferior), datación realizada mediante U-Pb en la casiterita (Benites, Torr6, & Vallance, *Geology, mineralogy, and cassiterite geochronology of the Ayawilca Zn-Pb-Ag-In-Sn-Cu deposit, Pasco, Peru*, 2021), siendo

ligeramente más joven que Uchucchacua (24.5 Ma; Bissig, 2008) ubicado a 27 Km, así también es más reciente que depósito El Porvenir-Atacocha (29.5 Ma) y Quicay (37.5Ma) ubicados 39Km y 32Km respectivamente.

La distribución en tiempo se presenta un tanto dispersa debido a los depósitos del Eoceno-Oligoceno, distribuidos en un transecto de dirección Este. Bissig en el 2008 señala la geometría de la subducción no puede causar esta distribución de la mineralización por si sola, y que las características de la placa superior en esta zona habrían ejercido también un control metalogénico.

En adición, el descubrimiento del depósito Ayawilca conlleva a importantes implicaciones en la exploración en los Centro del Perú, ya que contiene recurso de Sn potencialmente económico a 850Km en dirección NW de la franja de estaño de los Andes, el cual contiene el depósito de clase mundial San Rafael en el sur del Perú.

Geología Económica/Metalogenia

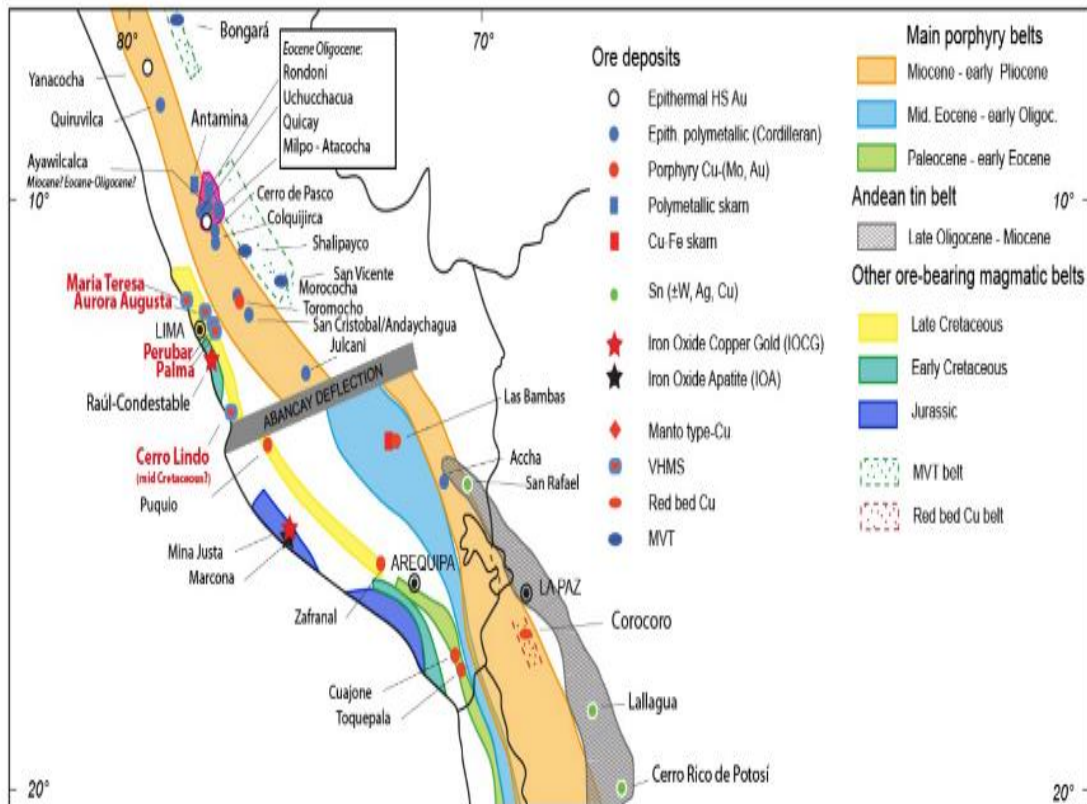
El potencial de los depósitos polimetálicos en la zona central del Perú está asociada a la presencia de intrusiones Miocénicas medias y tardías, por lo que los depósitos minerales en el Centro del Perú consisten en una variedad de yacimientos de metales base de edades que asociados a la franja del Mioceno (15-5Ma; Domo de Yauli, Morococha, Cerro de Pasco, Colquijirca y Antamina. Los principales depósitos de este grupo están principalmente relacionados a intrusiones del Mioceno; estos depósitos son principalmente polimetálicos de reemplazamiento en carbonatos (CRD), vetas polimetálicas, depósitos polimetálicos epitermales, cordilleranos polimetálicos, depósitos tipo skarn de Zn-Cu, skarn de Cu-Zn.

El depósito Ayawilca presenta una edad de 23.1-22.7 Ma (Mioceno inferior), datación realizada mediante U-Pb en la casiterita (Benites, Torrón, & Vallance, Geology, mineralogy, and cassiterite geochronology of the Ayawilca Zn Pb Ag In Sn Cu deposit, Pasco, Peru, 2021), siendo ligeramente más joven que Uchucchacua (24.5 Ma; Bissig, 2008) ubicado a 27 Km, así también es más reciente que depósito El Porvenir-Atacocha (29.5 Ma) y Quicay (37.5Ma) ubicados 39Km y 32Km respectivamente.

La distribución en tiempo se presenta un tanto dispersa debido a los depósitos del Eoceno-Oligoceno, distribuidos en un transecto de dirección Este. Bissig en el 2008 señala la geometría de la subducción no puede causar esta distribución de la mineralización por si sola, y que las características de la placa superior en esta zona habrían ejercido también un control metalogénico.

En adición, el descubrimiento del depósito Ayawilca conlleva a importantes implicaciones en la exploración en los Centro del Perú, ya que contiene recurso de Sn potencialmente económico a 850Km en dirección NW de la franja de estaño de los Andes, el cual contiene el depósito de clase mundial San Rafael en el sur del Perú.

Figura 12 Franjas metalogénicas del centro y sur del Perú (Fontboté, 2019)



Se describe un depósito importante de la franja Miocénica en la región centro del Perú:

Cerro de Pasco

Es el depósito más conocido de zinc en la región central del Perú (14.5 Ma; Baumgartner et al., 2009), pertenece a la franja metalogénica Miocénica, la cual tiene un vínculo espacial y temporal entre epitermales polimetálicos y pórfidos que han sido demostrados en diferentes localidades (Catchpole et al., 2011, 2015^a; Rottier et al., 2016a, 2018) . Este depósito ha estado en operación por más de 100 años y está localizado a 40 km al SE del proyecto Ayawilca. Cerro de Pasco es un depósito epitermal de metales base asociado a un pórfido, el cual ocurre como vetas en rocas silicatadas y como cuerpos de reemplazamiento en las secuencias carbonatadas, presenta una mineralización rica en sulfuros (>50% del volumen total) el cual incluye Zn-

Pb-Cu-Ag-(Au-Bi-Sb); asimismo ha sido descrito como el segundo depósito cordillerano de metales base más grande conocido después de Butte en Montana, EE. UU. (Rottier, Kouzmanov, Wälle, Bendejú, & Fontboté, 2016). Es uno de los depósitos magmático-hidrotermal más grandes en términos de Zn, Pb y Ag, con una producción historia de más de 200 Mt con 7 wt% Zn, 2 wt% Pb y 3 oz de Ag, en adición al menos 100 Mt con 1.3 wt% Cu y 1g/t Au. Más de mil millones de onzas de Ag como óxidos fueron originalmente minados por los españoles (Baumgartner et al., 2008).

Este depósito está dividido por una falla inversa denominada Falla Longitudinal de azimut N345°. La parte Oeste consiste en un extenso complejo Domo-diatrema compuesta por una sucesión freatomagmática, magmática y eventos freáticos, los cuales corta a las pizarras del Grupo Excelsior, conglomerados polimícticos y areniscas del grupo Mitú. La parte Este está formada por secuencia potente de rocas carbonatadas, principalmente calizas, con intercalaciones arenosas, calizas negras bituminosas y capas con nódulos de chert perteneciente a la formación Chambará, el depósito polimetálico epitermal está ubicado a lo largo del margen Este del complejo de Domo-diatrema y principalmente hospedado en la secuencia carbonatada. La mineralización consiste en 3 estadios: El estadio “A” comprende cuerpos de pirrotita-cuarzo que gradan hacia afuera de manera concéntrica en cuerpos de reemplazamiento de esfalerita (Fe+) y galena, estos cuerpos presentan trazas de wolframita y casiterita, rodeado por una zona compuesta por pirrotita con cuarzo, esfalerita(+Fe), calcopirita y estanita. En la zona más externa se puede apreciar pirrotita, esfalerita(+Fe), arsenopirita, calcopirita y cuarzo. Posteriormente el estadio “B” consiste en

dos tipos de mineralización, (B1) vetas de pirita y cuarzo con menores cantidades calcopirita, hematita, magnetita, esfalerita clara, galena y tetraedrita-tennantita que corta al complejo de diatrema-domo, además el estadio (B2) comprende cuerpos de reemplazamiento de pirita (90%) y cuarzo (10%) en el contacto de la brecha del diatrema y las rocas carbonatadas del Pucará, este estadio ha reemplazado parcialmente los bordes del estadio “A”. Finalmente el estadio “C” caracterizado por dos tipos de mineralización contemporáneas de intermedia a alta sulfuración, (C1) cuerpos de reemplazamiento en carbonatos Zn-Pb-(Bi-Ag-Cu) que muestran una zonación hacia el exterior : (1) en el núcleo famatinita, pirita caolinita y alunita, (2) pirita, tetraedrita, sulfosales con Ag y Bi, caolinita, alunita, sulfato-fosfato de aluminio (minerales APS), (3) la zona exterior con esfalerita(-Fe), galena, caolinita y minerales raros APS y las zonas más externas (4) magnetita, hematita, carbonatos de Fe-Mn-Zn con trazas de galena, esfalerita y pirita, su contemporáneo (C2) se encuentra en el complejo de diatrema-domo como conjunto de venillas Cu-Ag-(Au-Zn-Pb) enargita-pirita ± cuarzo, estas venillas fueron datados de 14.54 +/- 0.08 a 14.41 +/- 0.07 Ma (Baumgartner et al., 2009), estas venillas se sobre impusieron a los estadios anteriores “A” y “B”.

Figura 13 Mapa geológico y sección transversal del complejo domo-diatrema y mineralización de Cerro de Pasco. A) Localización de Cerro de Pasco. B) Plano geológico. C) Afloramiento de trachita porfírica. (Rottier, Kouzmanov, Casanova, Wälle, & Fontboté, 2018)

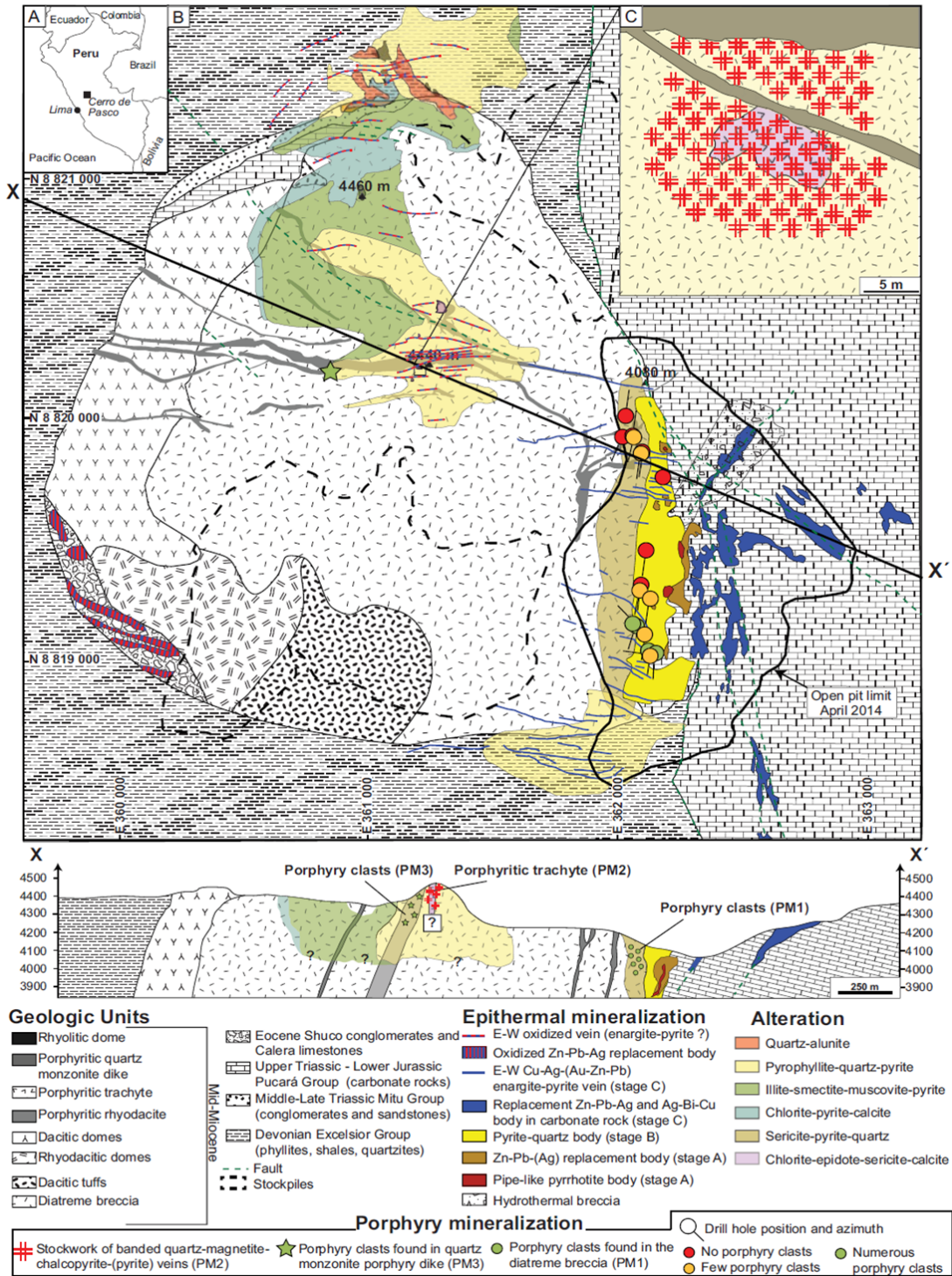
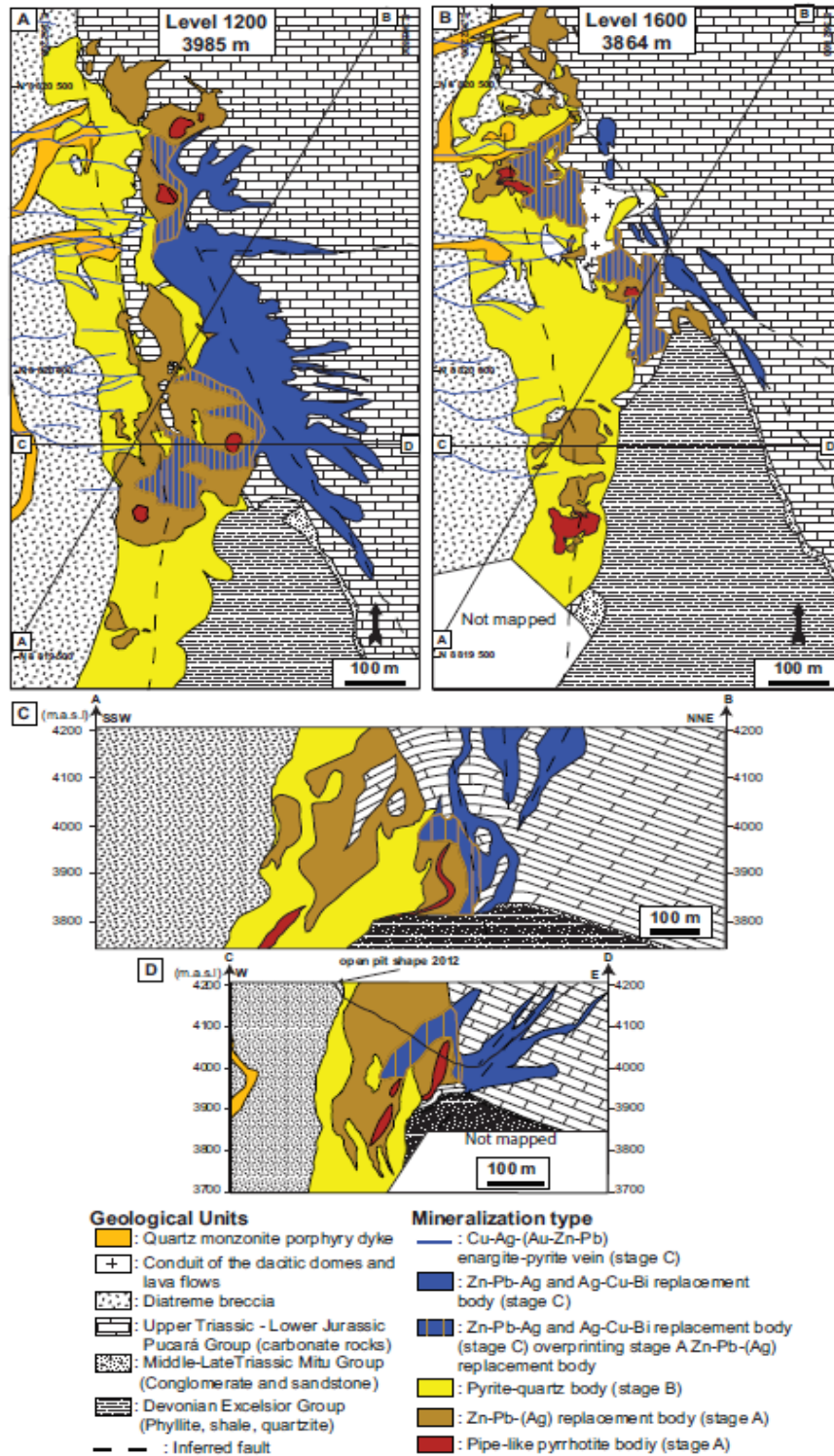


Figura 14 Geología de Cerro de Pasco A) Plano geológico del nivel 1200; B) Plano geológico del nivel 1600; C) Sección SW-NE a lo largo de la línea A-B; D) Sección E-W a lo largo de la línea C-D (Rottier, Kouzmanov, Wälle, Bendezú, & Fontboté, 2016)



Se tiene evidencia de 3 tipos de mineralización porfirítica temporalmente distintos: Incluye hornfels y clastos ígneos porfiríticos en la brecha del diatrema cortado por vetas de alta temperatura de cuarzo-molibdenita-calcopirita-pirita (PM1) A Re-Os datado de 15.59 +/- 0.12 Ma obtenido de la molibdenita por separado extraído de vetas de cuarzo-molibdenita -calcopirita-pirita en un clasto (PM1). El segundo tipo de mineralización (PM2) consiste por al menos dos stockworks de vetas de cuarzo-magnetita-calcopirita-pirita en un cuerpo de traquita porfirítica (15.286 ± 0.018 Ma zircón U-Pb ID-TIMS; Rottier, 2017) en el centro del complejo diatrema-domo. El tercer tipo de mineralización compuesto por hornfels y clastos ígneos porfiríticos (15.165 ± 0.043 Ma zircón U-Pb ID-TIMS; Rottier, 2017) cortados por vetas de cuarzo-magnetita-calcopirita-pirita) hospedados en un dique cuarzo-monzonítico. Estos tipos de mineralización evidencian espacial y temporalmente una asociación entre el depósito epitermal polimetálico y una mineralización tipo pórfido en Cerro de Pasco (B. Rottier, 2018).

Geología Proyecto Ayawilca

Grupo Excelsior

Es registrado como el basamento del Proyecto Ayawilca, el grupo Excelsior del Devoniano está compuesto principalmente por filitas de coloración gris verdosa, también rojas con contenido de hematita (posiblemente producto de interacción con fluidos; Luis Fontbote, 2019 visita técnica) y gris oscura en determinadas áreas. Presenta una foliación bien marcada producto de una fuerte deformación a raíz de varias fases superpuestas asociadas a la formación de lentes y vetas de cuarzo lechoso,

muchas veces intercaladas con meta-limolitas y meta-areniscas de grano fino. Hacia el techo de esta unidad y en contacto con las calizas del grupo Pucará, se observa en determinadas zonas una delgada brecha de contacto compuesta por clastos de cuarzo subangular y filitas, soportados por una matriz de filita, posible brecha de falla formado por el emplazamiento de fallas de bajo ángulo entre el basamento y la caliza del Pucará; sin embargo, este sistema de fallas aún se encuentra en análisis.

Grupo Pucará

Superpuestas discontinuamente al Excelsior, se encuentra la secuencia carbonatada del Grupo Pucará de edad Triásico Superior - Jurásico Inferior. Este grupo está conformado por calizas de facies variadas que van desde texturas tipo boundstone hasta mudstone (Clasificación de Dunham, 1962). La base presenta una caliza gris a gris oscura con textura bandeada de wackestone a mudstone, facie que fue muy favorable para la precipitación del primer pulso de mineralización.

Existen zonas de intenso brechamiento (monomíctico y polimíctico), posiblemente son producto de la disolución kárstica. Es común encontrar algunos horizontes con guijarros de chert y bioclastos (espículas y crinoideos). Localmente se encuentran horizontes finos de lutitas carbonosas y calcarenitas (areniscas con carbonato intergranular).

En el proyecto, este grupo no ha podido ser subdividido en sus distintivas formaciones como en otras regiones del Perú (Formación Chambará, Aramachay y Condorsinga), debido al brechamiento, la disturbación y a la carencia de elementos guías observados en otras áreas. Localmente este grupo se encuentra en el borde de la cuenca, además,

atravesó por diversos eventos tectónicos que borraron probablemente gran parte de las características propias de cada formación o que limitaron su desarrollo a diferencia de otras partes del centro del Perú (Rosas, Fontboté, & Tankard, 2007). Esta secuencia tiene una potencia aproximada de 200m en la zona del proyecto.

Grupo Goyllarisquizga

Las secuencias del Cretácico inferior están conformadas por areniscas y limolitas intercaladas, las cuales afloran a lo largo del rumbo NO-SE; en el área del proyecto se observa afloramientos con buzamientos de horizontales a sub-horizontales. Esta unidad alcanza una potencia promedio de 150 a 200m. Tinka Resources ha subdividido el grupo en 3 distintivas sub-unidades:

Goyllarisquizga Inferior:

Sobreyace disconforme al Pucará en un contacto producido por erosión, presenta en la base horizontes con guijarros sub-redondeados de chert en una matriz arenosa oscura o carbonatada con textura fluidal, el cual es denominado conglomerado chértico. En ocasiones, se intercalan delgadas facies de lutitas carbonosas y hacia la parte superior conglomerados de arenisca gris a gris oscura con clastos de cuarzo sub-redondeado y algunos guijarros de chert. El tamaño de grano de la arenisca en esta sub-unidad es de medio a grueso y tiene una potencia muy variable que va desde unas decenas de centímetros hasta 50 m aproximadamente.

Goyllarisquizga Medio:

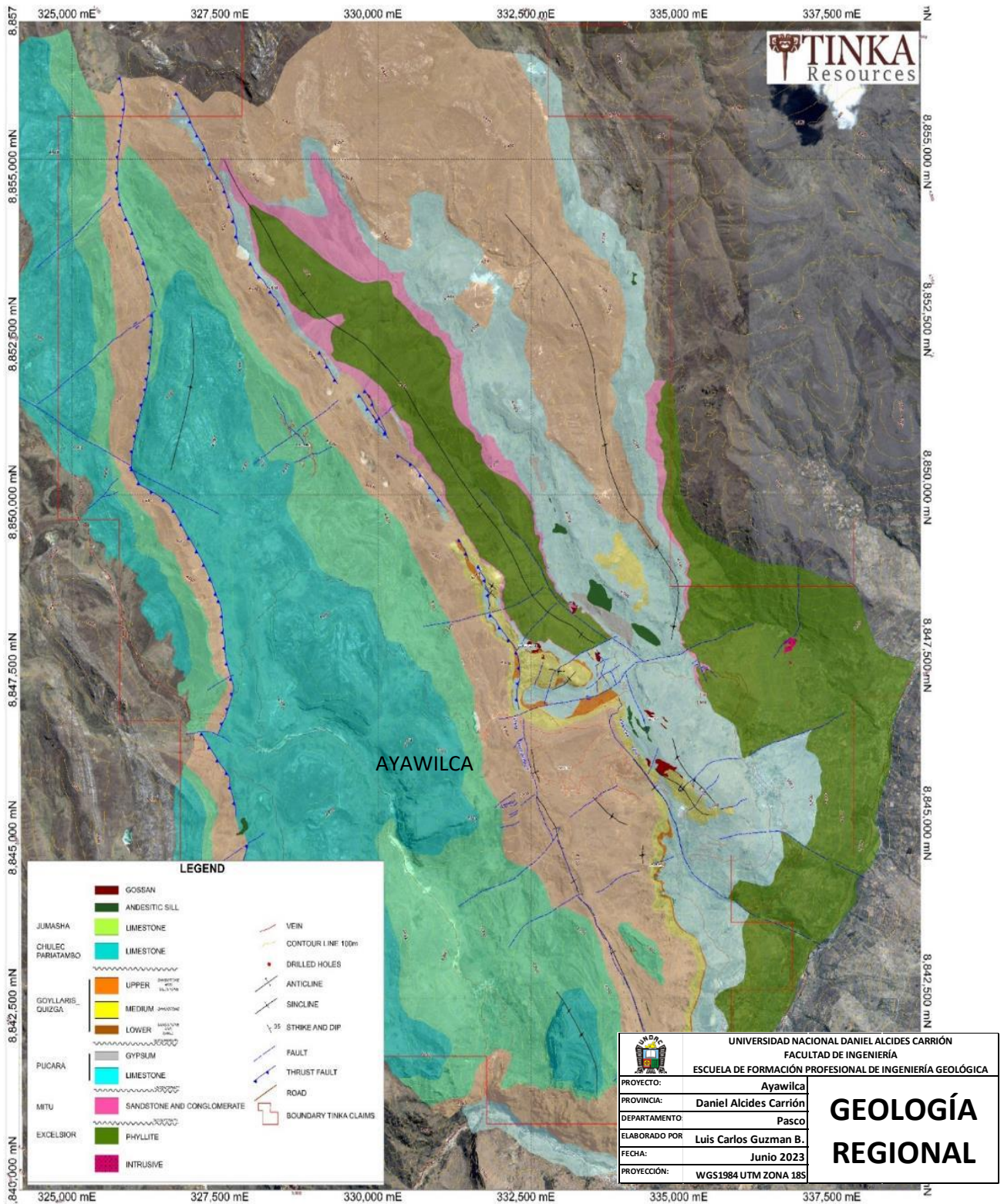
Se encuentra sobreyaciendo a la sub-unidad inferior en un contacto transicional. En esta sub-unidad media predomina la arenisca blanca

(cuarzosa), posiblemente correlacionable con el Chimú. En la base se observan areniscas con horizontes de grano grueso y esporádicos guijarros de cuarzo sub-redondeado, los horizontes superiores gradan entre areniscas de grano medio y grueso, con una selección granulométrica secuencial y características figuras de estratificación cruzada. La parte superior de la secuencia contiene intercalaciones de arenisca blanca y arenisca oscura con bandas de óxidos de manganeso. Esta subunidad alcanza una potencia promedio de 70 m.

Goyllarisquizga Superior:

Es la secuencia más joven del grupo, el cual sobreyace transicionalmente a la sub-unidad media y está compuesto por areniscas de grano fino a medio con una matriz arcillosa, también presenta horizontes de grano grueso. Generalmente cerca a la base de esta sub-unidad se encuentra limolitas rojas con intercalaciones de areniscas y lutitas (blancas y negras), asimismo, hacia el techo se encuentran areniscas arcósicas y grauvacas intercaladas con lutitas y limolitas blancas, gris verdosa y gris oscura. Algunos horizontes presentan intercalaciones con horizontes de arenisca de estratificación cruzada; es común observar afloramientos de arenisca en Ayawilca Central con buzamientos sub horizontales, la potencia aproximada es de 100m.

Figura 15 Geología regional en el proyecto Ayawilca (Tinka Resources, 2023)



Geología Estructural

La geología estructural del proyecto Ayawilca es bastante compleja y amerita un estudio más profundo para su completo entendimiento. No obstante, se describe los principales rasgos estructurales observados tanto en el cartografiado de superficie como los evidenciados en la perforación diamantina.

Un rasgo estructural importante es la falla Colquipucro, el cual presenta vergencia este, típico de la tectónica de piel delgada a lo largo del MFTB (Megard 1984; Scherrenberg et al. 2016). Esta falla presenta una cinemática inversa y aflora en la zona Oeste del proyecto Ayawilca (NO-SE con buzamiento al Oeste 70-75°), asimismo, genera un sobreescurrecimiento que desplaza unidades de arenisca y limolitas antiguas del grupo Goyllarisquizga sobre otros horizontes estratigráficos más jóvenes de la misma unidad, así como también calizas del Pucará sobre las areniscas del Goyllarisquizga.

Otro rasgo estructural importante en el proyecto Ayawilca es el anticlinal de dirección NO-SE que aflora en la zona Suroeste del proyecto. El anticlinal está formado por el plegamiento de las secuencias sedimentarias conformadas por las calizas del Pucará y areniscas del Goyllarisquizga. En la zona central de Ayawilca, esta secuencia de arenisca de rumbo NO-SE presenta suaves buzamientos (10-25°), no obstante, en el Oeste se encuentra abruptamente plegada, formando un anticlinal de eje NO-SE con suave vergencia al suroeste. El flanco oeste de dicho anticlinal presenta fuertes buzamientos de las capas hacia el O, llegando a ser sub-verticales, así como formar un anticlinal tumbado en Ayawilca Sur.

Hacia el Este, la secuencia sedimentaria de las calizas del Pucará y areniscas del Goyllarisquizga se encuentran nuevamente plegadas, formando un sinclinal volcado en la zona denominada Ayawilca Este y Zona 3. En esta zona el plegamiento es evidente en superficie, identificándose tanto en el cartografiado como en la perforación diamantina.

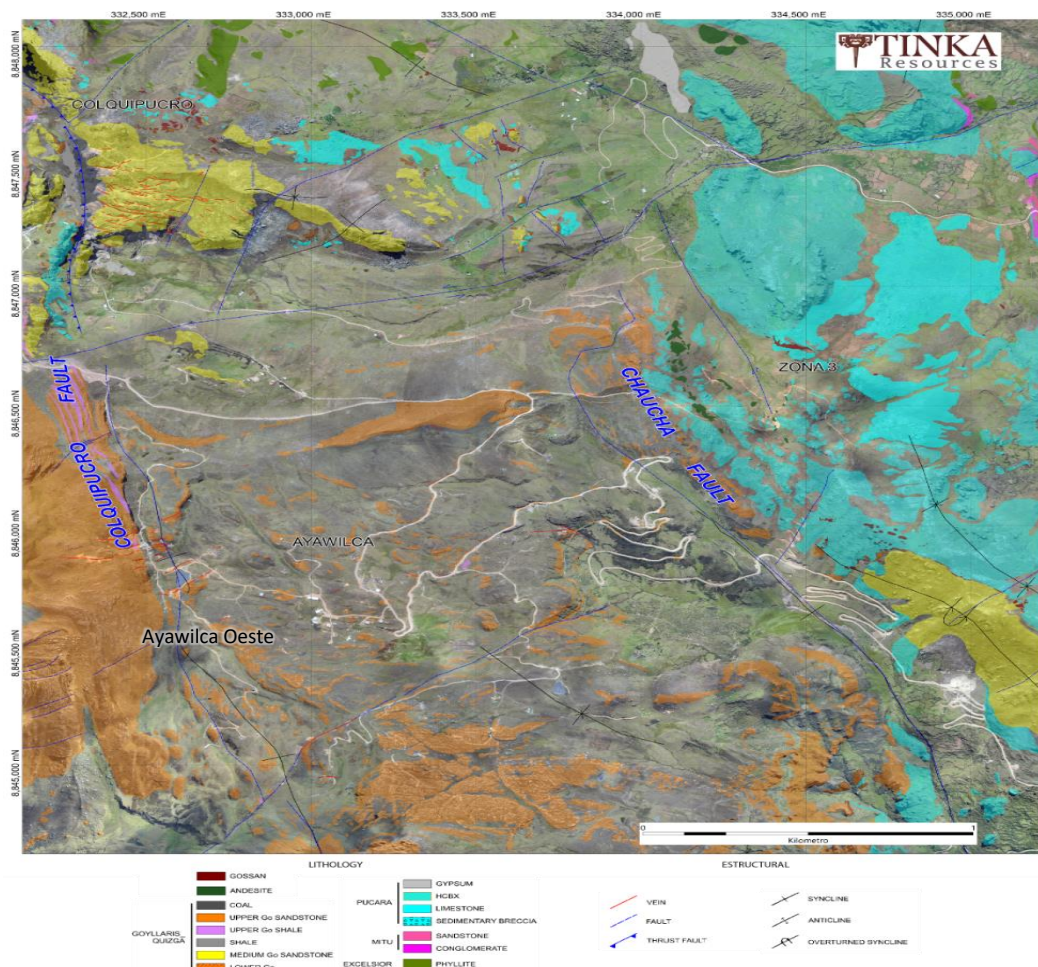
Este sinclinal volcado es cortado por una falla denominada Chaucha, el cual tiene una tendencia NO-SE y fuerte buzamiento (70°) al Este. Esta falla es de cinemática normal, desplaza el sinclinal y toda la secuencia sedimentaria, así como el basamento de filita.

Otro rasgo estructural importante que se encuentra en superficie son las fallas de rumbo NE-SW, estas se encuentran cortando y desplazando a las estructuras NO-SE antes descritas. Dentro de este sistema destaca la falla 060, la cual parece haber tenido un rol importante en el control de la mineralización entre las zonas de Ayawilca Sur y Oeste. Esta falla tiene un rumbo aproximado $N60^\circ E$ y fuerte buzamiento Noroeste (75°).

Gracias a las diferentes campañas de perforación diamantina ha sido posible identificar un rasgo estructural muy relevante que no aflora en superficie, se trata de un sistema de fallas de bajo ángulo formado entre la base de las calizas del Pucará en el contacto con el basamento de filitas del Excélsior. Este sistema de fallas de bajo ángulo parece tener un rumbo NO-SE con buzamientos hacia el NE, genera desplazamientos de la secuencia sedimentaria, como también de las filitas del basamento sobre la secuencia sedimentaria, creando una serie de imbricaciones con repeticiones. El principal interés en este sistema es debido a las repeticiones que genera a las calizas del Pucará, ya que, en algunos casos estas repeticiones están asociadas

a zonas de mineralización de alta ley (sondaje A18-129). Las fallas de bajo ángulo son más evidentes en la zona de Ayawilca Sur, específicamente en el bloque sur de la falla 060, donde las fallas inversas generan una fuerte deformación que dan lugar a cabalgamientos no solo dentro del Pucará, también en las areniscas del Goyllarisquizga, permitiendo identificar plegamientos más cerrados, dando la sensación de anticlinales apilados en los frentes de sobre escurrimiento. La geometría de estas fallas de cabalgamiento difiere de las fallas inversas generadas en la faja corrida y plegada del Marañón; por lo que su génesis tendría otra explicación. Estas estructuras habrían jugado un rol fundamental en la mineralización y reemplazamiento de las calizas del Pucará.

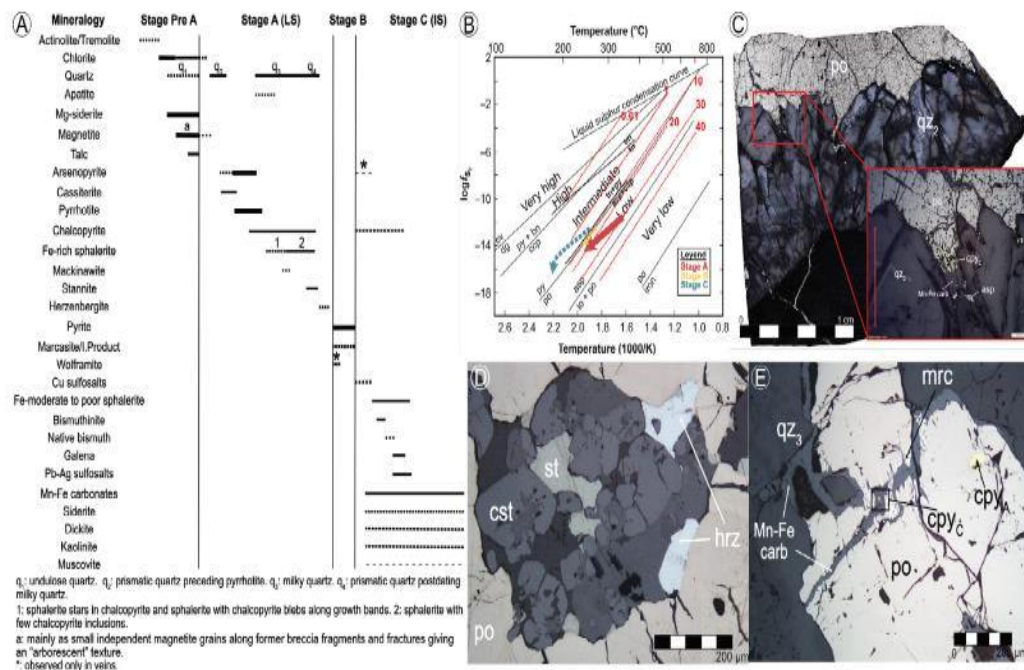
Figura 16 *Geología local del Proyecto Ayawilca.*



Secuencia paragenética y zoneamiento

Un estudio de relación temporal de la mineralización se ha enfocado en los principales sondajes del Proyecto Ayawilca, este proporcionó la diferenciación de tres fases de mineralización (Benites, Torró, & Vallance, Ore mineralogy of the In-bearing Ayawilca Zn-Ag-Sn-Cu project, Pasco, Peru, 2019). El estadio “A” está compuesto por una asociación de minerales de bajas sulfuración, debido a la reacción con las calizas del Pucará, tales como pirrotita, magnetita, esfalerita (+Fe), calcopirita, arsenopirita y en menor cantidad casiterita y estanita, seguidos por cuerpos de piritita de grano grueso (euhedral-subeuhedral) en una etapa un poco más ácida “B” y finalmente el evento “C” de intermedia sulfuración contiene asociaciones de esfalerita-galena-sulfosales y carbonatos de Fe-Mn con caolinita-pirofilita.

Figura 17 Secuencia paragenética del proyecto Ayawilca (Uzieda, Fontboté, & Kouzmanov, 2020) A) Secuencia paragenética del depósito Ayawilca modificado de Benites et al. (2019). B) Representación esquemática de los estadios A, B, y C en un diagrama modificado de Einaudi et al. (2003) de log fS₂ vs temperatura basado en los ensambles de sulfuros; las líneas rojas indican FeS (mol%) contenidos en la esfalerita (Barton & Toulmin, 1966); empieza en la temperatura A basado en Harlaux (2019). C) Veta del Estadio A, la flecha roja indica la dirección de crecimiento del cuarzo. D) Cavidad en la pirrotita relleno de casiterita, stanita y arsenopirita. E) Estadio A de pirrotita alterado a marcasita (estadio B) y cortado por el estadio C (carbonato de Mn-Fe). asp: arsenopirita; cst: casiterita; cp: calcopirita; hrz: herzenbergita; mrc: marcasita; po: pirrotita; qz: cuarzo; st: Estannita.



Estadio Pre-A

Comprendidos por relictos de un skarn retrogrado magnésico previo al Estadio A, está compuesto por Mg-siderita, talco y magnetita asociados a zonas de actinolita-tremolita que posteriormente fueron cloritizadas. Se ha

identificado dos generaciones de magnetita, la primera de forma pseudoradial que probablemente reemplazo a los anfíboles y el segundo como cristales octahedrales y stringers. Las partes más abundantes y profundas de magnetita son localmente enriquecidos por casiterita, reemplazando y rellenando los espacios intersticiales entre los granos de magnetita, estas se encuentran a lo largo de la base de la secuencia calcárea del Pucará, en algunas zonas se encuentran relictos de una caliza bandeada con menor contenido de magnetita. (Uzieda, Fontboté, & Kouzmanov, 2020; Benites, Torró, & Vallance, Geology, mineralogy, and cassiterite geochronology of the Ayawilca Zn Pb Ag In Sn Cu deposit, Pasco, Peru, 2021)

Estadío A

El estadio A comprende una adición y reemplazamiento del Pre-A por cuarzo prismático, masivos de pirrotita, arsenopirita seguido de calcopirita, esfalerita +Fe, estannita y herzenbergita. Generando sucesivamente las partes económicas más importantes de Ayawilca y mineralizando principalmente la parte inferior del Pucará y en menor cantidad, en forma un tanto disperso en dirección al Goyllarisquizga.

Se ha estudiado dos generaciones de esfalerita +Fe, la primera en menor cantidad dentro la calcopirita como inclusiones tipo estrella y diseminados de grano fino, la segunda en mayor cantidad y con finas diseminaciones de calcopirita. Ambas primeras generaciones de sph y cp reemplazaron a la pirrotita y luego fueron reemplazados por Estannita. La estannita también se encuentra en los intersticios de la casiterita y la herzenbergita en los intersticios de la estannita y casiterita, si como también

con la pirrotita. Esta generación de esfalerita (+Fe) presenta ligeramente mayor contenido de Zn en las vetas del NW que en la zona de manto.

Los cuerpos de pirrotita alcanzan aproximadamente 1.7 km de longitud, 200m de ancho y una potencia promedio de 30m, no obstante, en Ayawilca Central se puede duplicar la potencia. El reemplazamiento dejó relictos de magnetita en los bordes del depósito; por otro lado, las concentraciones más altas de sph (+Fe) se ubican en Ayawilca Sur y Oeste, formando cuerpos sobreimpuestos de los minerales de este estadio.

Estadio B

En el estadio B la pirita y el cuarzo reemplazan parte del Pucará y los sulfuros del estadio A, principalmente arsenopirita, pirrotita y esfalerita (+Fe). Cuando la pirita reemplaza a la pirrotita, la pirita presenta intercrecimiento con marcasita y producto intermedio, además se observan zonas de pérdida de volumen a causa de la sobreposición de esta fase, generando una pirita porosa (Ayawilca Sur A17-069 y A17-056 - Ayawilca Central A17-075 y A15-040), así como mayor desarrollo de sus cristales (pirita Euhedral-Subhedral).

Los cuerpos de pirita de esta fase están distribuidos a lo largo de la zona de pirrotita, las áreas de mayor contenido en pirita se encuentran en la transición de la zona Suroeste hacia la parte Central del proyecto, del mismo modo se encuentra un cuerpo masivo en la parte Este que se superpone a la magnetita.

Este estadio alcanzo mayor magnitud en las areniscas del Goyllarisquizga respecto a los estadios anteriores, encontrándose venillas y diseminados acompañados de pirita-marcasita.

Estadío C

Este evento se sobre impuso parcialmente a los estadios previos y es caracterizado por una mineralización de intermedia sulfuración, encontrándose más abundante en las periferias de los mantos con masivos de sulfuros y en las vetas del Goyllarisquiza. La mineralización de los mantos de este estadio comprende una tercera generación de calcopirita, esfalerita (-Fe) acompañado de galena y cantidades menores de tetraedrita, bismuto nativo, galena bismutífera, pirargirita, estefanita y zoubequita.

Las vetas de Ayawilca Oeste presentan principalmente esfalerita (-Fe), galena, Cu-Ag sulfosales (tetraedrita, greibergita, estefanita y pirargirita), pirita, pocas cantidades de arsenopirita, marcasita, pirrotita y calcopirita siderita, Mn-Fe carbonatos. La Esfalerita del estadio A y la calcopirita de este estadio fueron reemplazados por galena, sulfosales de Ag-Cu y la esfalerita (-Fe). Esta generación de esfalerita (-Fe) presenta ligeramente mayor contenido de Zn en la zona de los mantos que en las vetas del NW.

Las vetas de Ayawilca Este contienen bismuto nativo, galena y gustavita que posteriormente son cortados por finos venilleos de siderita y Mn-Fe carbonatos. Así también una segunda generación de calcopirita que rellena microfracturas en la pirita y también se superpone a la calcopirita de la primera generación.

Este estadio adicionalmente de trasladarse a un ambiente más ácido, está acompañado con alteración a dickita-caolinita.

2.3. Definición de términos básicos

Asociación de Mineral

Grupo de minerales que son característicos en determinada zona de alteración o en una parte de un sistema de vetas, los cuales no están en contacto del todo ni fueron necesariamente depositados en el mismo periodo de tiempo, este no implica condiciones de equilibrio (Barton et al., 1963; Hemley y Hunt., 1992). Los minerales que constituyen una asociación son separados por comas.

Ensamble mineralógico

Grupo de minerales que ocurren en directo contacto y no muestran evidencia de reacción uno respecto el otro (Barton et al., 1963). A pesar de que Hemley y Hunt (1992) aplicaron este término en la existencia de equilibrio químico.

Fase de Mineralización

Barton (1970) usó este término para hacer referencia a un grupo de fases que representan un intervalo de deposición durante el cual no existe mayor discernimiento de cambio físico o químico.

Paragénesis

Implica una característica asociación mineralógica en un depósito que connota una contemporánea formación (Bates y Jackson, 1987), en el cual el equilibrio no es necesariamente involucrado. Es el modo de origen de una fase respecto a sus vecinos, incluyendo todos los procesos que deberían estar envueltos en el desarrollo textural en un lugar (e.g., por expolición, recristalización, relleno de fracturas o reemplazamiento).

Secuencia paragenética

Es usado para describir el orden cronológico en la formación de una asociación de minerales. Refleja cambios de un ensamble mineral en un determinado punto sobre un intervalo de tiempo.

Secuencia de zonación

Es la reacción secuencial en el incremento migratorio de una solución en un tiempo específico. Opuesto al patrón de zonación, el crecimiento zonal puede estar controlada por proceso termal y químico

Zonación deposicional

Refleja el cambio en el ensamble mineral sobre un intervalo de espacio en un determinado tiempo.

2.4. Enfoque Filosófico – Epistémico

Para mostrar la expresión epistemológica de este trabajo, es necesario elucidar la teoría y la relación con la práctica. La orientación epistemológica hace referencia a dos distinciones: Distinción gnoseológica, el saber o la fuente del saber que da sustento a la investigación (empirismo o racionalismo) y Distinción ontológica, relación entre el sujeto investigador y objeto observable, los cuales se concretan en dos valores (idealismo y realismo) (De Berríos, 2009).

Cruce de estas distinciones epistemológicas, este trabajo tendrá un enfoque empírico-realista, ya que la construcción teórica de la distribución espacial de los estadios de mineralización y ensambles de alteración hidrotermal del yacimiento polimetálico Ayawilca es producto de las condiciones de precipitación mineral en el área, teniendo también en referencia yacimientos parecidos de la parte central del Perú, adicionalmente todos estos conceptos

pueden ser observados en los sondajes de perforación diamantina, así como algunos afloramientos en superficie.

Formulación de Hipótesis

El depósito de Ayawilca está relacionado al cinturón magmático del Mioceno, al igual que Cerro de Pasco, el cual también tiene una zona de reemplazamiento en carbonatos para sus metales base. Partiendo de esta premisa, presentan una mineralogía parecida basada en sus tres eventos de mineralización, sin embargo, las primeras fases no son tan reducidas como en Ayawilca, debido a que el fluido en su migración tuvo contacto con rocas más oxidadas como las areniscas rojas de la Formación Mitú y la presencia de cuerpos ígneos cercanos; en Cerro de Pasco el estadio económicamente importante es el C.

El fluido mineralizante en el proyecto Ayawilca no tuvo contacto con rocas oxidadas, en cambio interactuó con rocas reducidas (Excelsior), asimismo no se ha encontrado evidencias de algún cuerpo ígneo en la cercanía y el fluido ha reaccionado inmediatamente a lo largo de las calizas del Pucará, el estadio económicamente más importante para Zn y Sn es el estadio A.

Hipótesis específicas

La distribución espacial consiste en el estadio "A" con cuerpos de magnetita que fueron parcialmente reemplazados por pirrotita, además de esfalerita (+Fe), calcopirita, arsenopirita, casiterita y estannita, reemplazamiento de bordes por el evento "B" compuesto por pirita-cuarzo, principalmente a la pirrotita y magnetita y finalmente la fase "C" con esfalerita, galena, carbonatos (Mn-Zn-Fe) y sulfosales en los bordes de los cuerpos anteriores o zonas más externas del depósito.

La distribución espacial de los minerales de alteración comprende las zonas con magnetita asociados a $\text{Chl} \pm \text{Act-Tr-Sm}$, la mineralización del estadio B tendrían una asociación de $\text{Ser} \pm \text{I-K}$ y en el estadio C, Dik-K ; al igual que la mineralización existe una superposición en los minerales de alteración.

Las zonas Oeste y Sur presentan mineralización de alta ley de zinc, debido su ubicación favorable asociada a 3 estructuras geológicas: la falla Colquipucro, el plegamiento y la falla 060 en Ayawilca Sur; las condiciones generadas por estas estructuras habrían sido determinantes para el entrapamiento de la mineralización.

Identificación de Variables

Variable Independiente

Estadios de mineralización y alteración hidrotermal en las zonas de zinc

Los estadios de mineralización comprenden el orden cronológico de la precipitación mineral y los minerales de alteración se reequilibran según las condiciones del sistema.

Variable Dependiente

Distribución espacial en las zonas de zinc

Es la zonación, el cambio de la mineralogía sobre un intervalo de espacio.

Definición operacional de variables e indicadores

Según su operatividad el presenta variables cualitativas (llamadas también categóricas), ya que no se utilizan valores numéricos, en cambio, se describe los datos por categoría o características sin un orden natural. A la vez, es también politómicas (múltiples valores) ya que la distribución espacial variara según la presencia o ausencia de ciertos minerales.

Variable Independiente

Estadíos de mineralización en las zonas de zinc

Dimensión: Estadío Pre-A, Estadío A, Estadío B y Estadío C

Indicadores: Presencia de minerales perteneciente a cada estadío.

Asociación de alteración hidrotermal en las zonas de zinc

Dimensión: Clorita, Tremolita, Actinolita, Talco, Sericita, Illita, Dickita, Esmeclita, Caolinita, Cuarzo, Sílice Amorfa.

Indicadores: Presencia o ausencia de los minerales de alteración.

Variable Dependiente

Distribución Espacial en las zonas de zinc

Dimensión: Mineralización y asociaciones de alteración

Indicadores: Presencia o ausencia de minerales de cada estadío, estructuras geológicas y características de la roca hospedante.

CAPITULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación

Este trabajo es de tipo descriptiva ya que comprende la descripción, registro, análisis e interpretación de la naturaleza actual y la composición o procesos de los fenómenos. (Tamayo, 2003)

3.2. Nivel de Investigación

Según el Nivel de investigación, el cual se refiere el grado de profundidad que abarca el objeto de estudio, el presente trabajo es Descriptiva, ya que se centra en establecer la estructura, comportamiento y tendencia en un grupo o población.

3.3. Características de la investigación

El presente trabajo es sistemático ya que considera investigaciones previas como antecedentes, estas sirven de base y generan un sistema de conceptos, es metódico ya que se basará en un método de investigación cualitativo, es ordenado ya que para llegar a su fin requiere una disposición de pasos durante su desarrollo; asimismo es reflexivo y critico ya que promueve un

pensamiento agudo sobre el tema, el cual puede llevar a nuevas interrogantes y por ende el desarrollo de nuevos conceptos.

Este trabajo cumplirá con los siguientes pasos para obtener los resultados, los cuales serán interpretados a fin de responder las preguntas del problema, determinar las conclusiones y recomendaciones.

3.4. Método de investigación

Según el diseño de la investigación, el cual es el plan, estructura, estrategia general que orienta y guía la investigación para responder al problema planteado, este trabajo es de campo, ya que consiste en la recolección de datos directamente de los sujetos investigados o de la realidad donde ocurren los hechos, los cuales son datos primarios que no han sido manipulados o se ha tenido control de alguna variable.

Para el análisis de este trabajo se recopila información de los sondeos de perforación hasta la campaña 2021, así mismo, está enfocado en la zona de mineralización de zinc (Ayawilca Sur-Ayawilca Oeste) donde se interpreta la distribución espacial de la mineralogía basado en la secuencia paragenética, logeo de testigos geológicos y análisis PIMA.

3.5. Diseño de investigación

El diseño metodológico de investigación es no experimental, ya que no existe una modificación deliberada de las variables, asimismo es transversal, ya que se centra en analizar cuál es el nivel o estado de una o más variables o ver cuál es la relación entre un conjunto de variables en un punto en el tiempo. Del mismo modo es subclasificado como descriptivo ya que indaga la incidencia de las modalidades o niveles de una o más variables en una población (Fernández, 2014).

3.6. Procedimiento del muestreo

Posteriormente la data será procesada en el Software Discover de Datamine, el cual permitirá observar la distribución espacial y la relación entre geología, mineralización, alteraciones y lecturas PIMA, considerando la paragénesis del depósito.

3.7. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

3.7.1. Logueo Geológico

El trabajo en un pozo nuevo comienza con el registro del número de sondaje en Logchief, indicando las coordenadas del collar, azimut e inclinación con el que inicia el sondaje, asimismo se agrega la campaña a la que pertenece, fecha de inicio y geólogo responsable del registro. Posteriormente se procede con la descripción a detalle basado en intervalos (metros) manteniendo siempre una terminología descriptiva sin el sesgo de una terminología interpretativa, el registro debe contener una descripción detallada y la más exacta posible (véase fotografía 31 en el Anexo B), además se debe rellenar los siguientes campos:

Litología: Registro de la unidad litoestratigráfica, así como el tipo de roca que se presenta en el intervalo.

Alteración: Registro alfanumérico de acuerdo con los cambios mineralógicos en cada tipo de roca, considerando el tipo, intensidad y estilo de alteración.

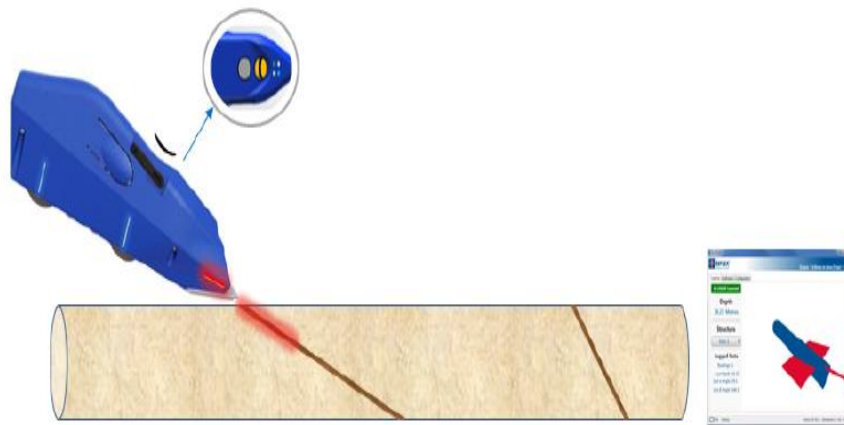
Mineralización: Registro alfanumérico que incluye el tipo de mineral, estilo de mineralización, y el porcentaje en que se presenta.

3.7.2. Logueo estructural

Primero se verifica el correcto marcado de las líneas de orientación obtenidas con el ACT II RD (Reflex), en caso se tengan incoherencias se realiza

la corrección de estas y se continúa resaltando con un lápiz de cera los contactos litológicos, planos de estratificación, planos de falla, contactos de mineralización (vetas y zonas de reemplazamiento por sulfuros masivos), vetas y venillas. Luego se debe identificar y registrar en la laptop la profundidad y tipo de estructura, posteriormente con el equipo posicionado en la línea de orientación con dirección al fondo del pozo, se levanta el equipo IQ-logger hasta alinear el láser con la estructura, luego registrar el dato y adiciona las observaciones o una breve descripción de la estructura medida (véase fotografía 32 en el Anexo B).

Figura 18 Registro de datos estructurales mediante IQLogger (Reflex, 2021).



3.7.3. Registro fotográfico de testigos

Todos los sondajes son fotografiados luego de haberse registrado los datos del logueo geológico, geomecánico y estructural, asimismo realizado el marcado y rotulado de muestras para ensayos geoquímicos y el registro de susceptibilidad magnética. El fotografiado de testigos se realizó en una mesa porta testigos diseñado para el registro fotográfico, asimismo se usó 2 reglas de 1m con divisiones cada 10cm para escala y se rotulo en las pequeñas pizarras acrílicas los datos del proyecto, numero de sondaje, numero de caja, metraje de inicio y final, manteniendo el orden correlativo entre las cajas de sondajes.

3.7.4. Análisis PIMA

Para el análisis PIMA los sondajes son seleccionados de acuerdo con sus intervalos de interés encontrados, así como sondajes aledaños a estos, según esta clasificación se realiza las lecturas PIMA por intervalos de muestra geoquímica, las cuales fueron separados con anterioridad según el cambio geológico, mineralógico o por alteraciones.

El análisis de datos requiere del uso de un archivo de referencia sobre datos espectrográficos de diferentes ambientes geológicos que pueden ser complementados, en algunos casos por paquetes de datos espectrográficos procesados digitalmente. La técnica permite una identificación rápida en campo de los minerales de alteración hidrotermal y su distribución. Los ensambles de minerales, correlacionados con otros datos de exploración, son usados para establecer la ubicación de las perforaciones y para guiar programas de exploración. La colección de datos es sistemáticamente organizado y realizado por un operador entrenado.

3.7.5. Revisión de Trabajos Previos

Con el objetivo de ampliar los conocimientos sobre el tema y llevar la investigación de forma eficiente, organizada y efectiva, se consultó diferentes fuentes sobre depósitos minerales con características similares a Ayawilca, así como conceptos descritos en el presente trabajo; teniendo en cuenta siempre el nivel de fiabilidad de la fuente y citando conceptos extraídos durante todo este proceso.

3.7.6. Instrumentos de Recolección de Datos

Tabla 1 *Instrumentos de recolección de datos: técnica, materiales y Equipos usados en el presente trabajo*

TECNICA	MATERIALES	EQUIPOS
Logueo geológico	Lupa x20	Laptop Getac
	Lápiz rayador	
	Lápiz imán	
	Libreta de Campo	
	Protactor	
	Lápiz portaminas	
	Flexómetro	
	Ácido Clorhídrico	
Logueo Estructural	Lápiz de cera	IQ-Logger
	Flexómetro	Laptop Getac
Registro Fotográfico	Plumón Jumbo 123	Cámara fotográfica SONY
	Borrador para pizarra	Laptop LENOVO
	Reglas de escala	
Análisis PIMA		
Revisión de Trabajos Previos		Laptop LENOVO

3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Una vez recolectado toda la data de los sondeos del proyecto Ayawilca mediante las técnicas explicados líneas arriba, los datos serán tabulados y clasificados de acuerdo con las zonas de interés (Ayawilca Oeste y Ayawilca Sur). Cabe agregar que los datos fueron previamente sometidos a pruebas de fiabilidad y validez como parte del protocolo interno de la empresa.

3.8.1. Procesamiento de la Información

Posteriormente la data será procesada en el Software Discover de Datamine, el cual permitirá observar la distribución espacial y la relación entre geología, mineralización, alteraciones y lecturas PIMA, considerando la paragénesis del depósito.

Este paso servirá para observar la coherencia con la hipótesis.

3.8.2. Presentación y publicación de los resultados

Finalmente, producto del procesamiento de la información se plasmará los resultados en secciones y planos para su interpretación, los cuales serán etiquetados y editados en el software Adobe Illustrator; asimismo se mostrará fotografías de algunos sondajes que corroboran los resultados.

3.9. Orientación ética

El presente trabajo está enfocado en usar los datos con responsabilidad, mostrar los resultados con honestidad durante todo el proceso de investigación, presentando únicamente los datos autorizados por la empresa Tinka Resources S.A.C., de igual manera respetar la originalidad de ideas de diferentes autores, poniéndolos en referencia y citando sus nombres cuando corresponda.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Presentación, análisis e interpretación de resultados

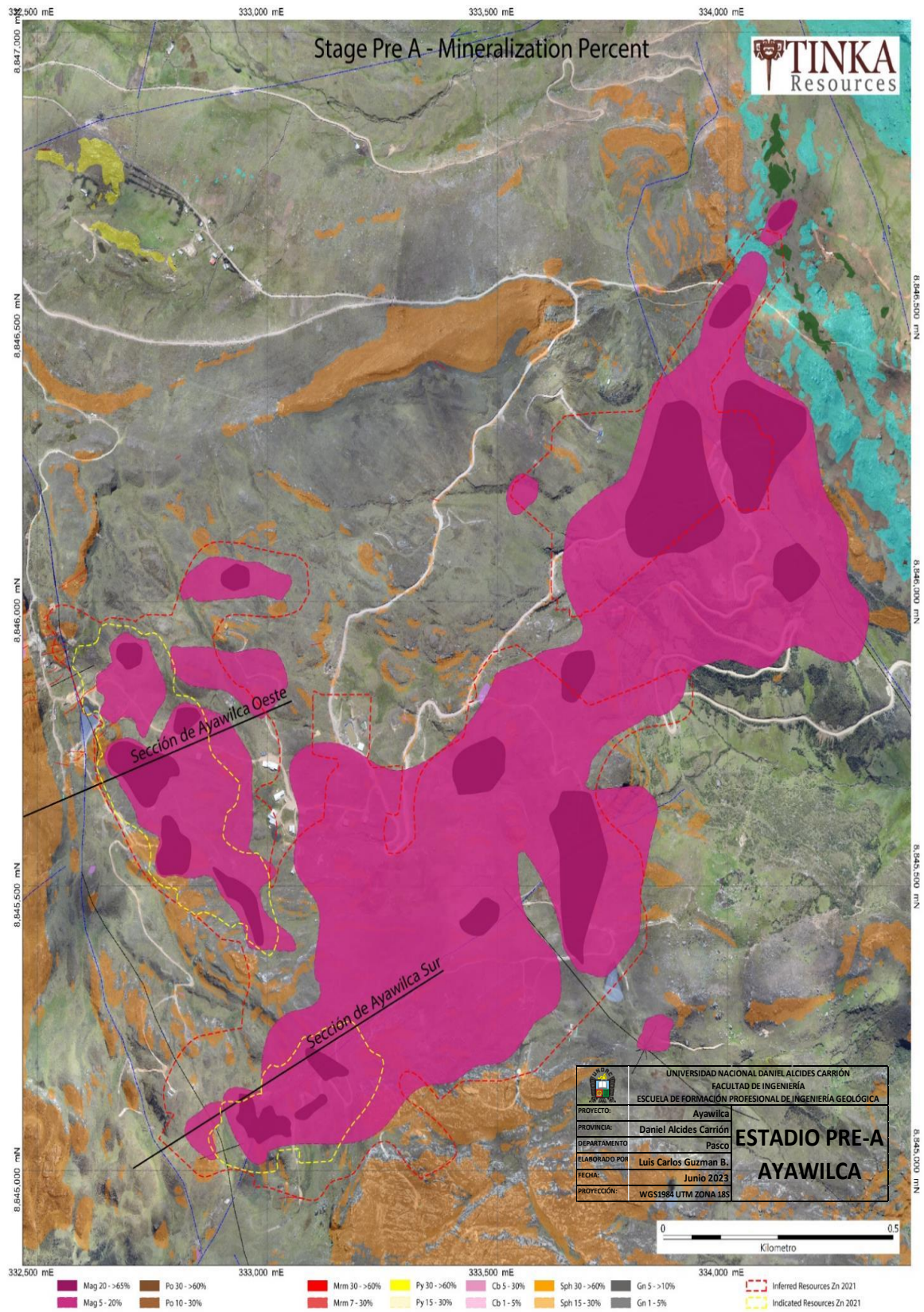
4.1.1. Distribución espacial de los estadios de Mineralización y de alteración hidrotermal

Para fines de simplificar los estilos de mineralización en el proyecto Ayawilca, en este trabajo se han clasificado en dos grupos, los cuales divide la mineralización según abundancia y estructura:

Primer estilo: Mineralización masiva y semi-masiva con contenido de mineral mayor a 60% y 25-30% respectivamente (véase las fotografías 7, 8, 10, 11, 12, 17 y 18 en el Anexo A).

Segundo estilo: Mineralización en forma de venillas, parches, diseminaciones, “bandeamientos” y reemplazamiento selectivo, mineral <25% (véase las fotografías 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 13, 14, 15, 16, 22 y 23 en el Anexo A).

Figura 19 Distribución espacial y porcentajes de mineralización del estadio Pre-A en el proyecto Ayawilca.



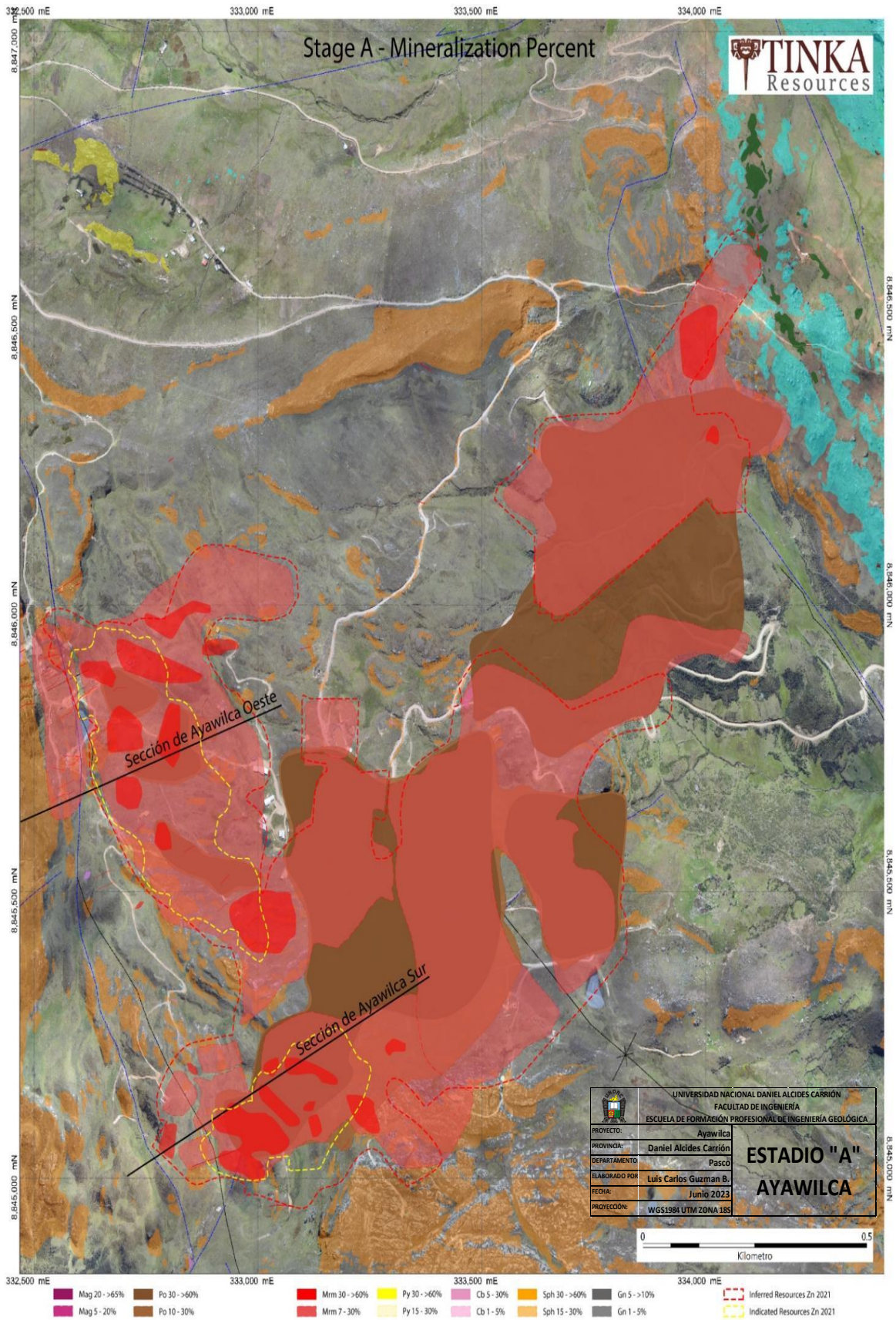
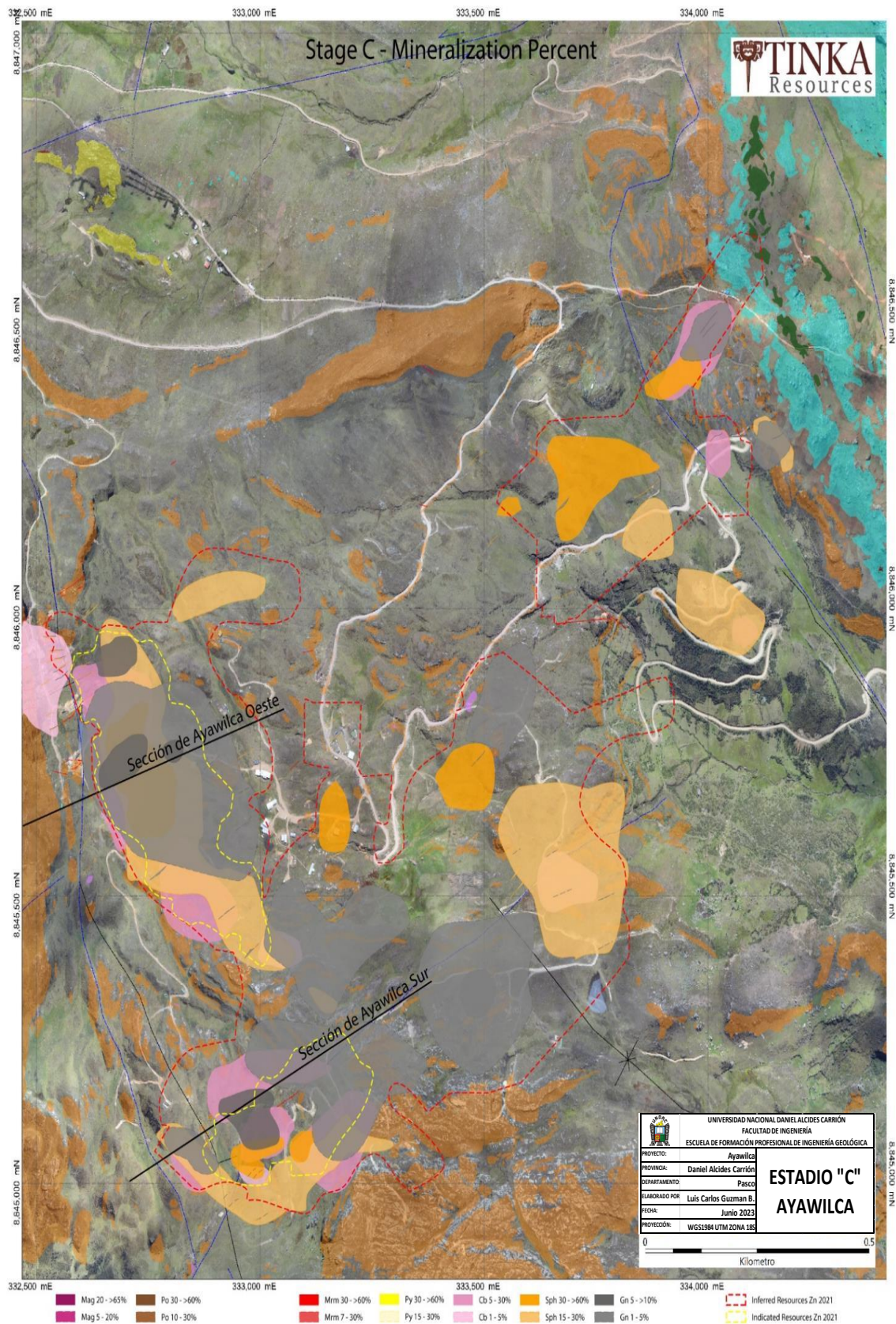


Figura 21 Distribución espacial y porcentajes de mineralización del estadio B en el proyecto Ayawilca.



Figura 22 Distribución espacial y porcentajes de mineralización del estadio C en el proyecto Ayawilca.



4.1.2. Ayawilca Oeste

El estadio (pre-A) consiste en masivos de magnetita, precipitados principalmente en la parte basal del Pucará; en una transición hacia Ayawilca Central puede estar acompañado de actinolita-tremolita (Skarn, véase fotografía 1 en el Anexo A) y gradar en los bordes a zonas de semimasivos o parches, adicionalmente, la magnetita llega a ascender a zonas cerca al eje del anticlinal como cuerpos masivos, así como, parches y bandas controlados por un fallamiento inverso NW-SE de buzamiento NE.

El estadio “A” se presenta en el 1er estilo de mineralización con cuerpos de pirrotita que han reemplazado principalmente los núcleos de los masivos de magnetita, tanto en la base del Pucará, los cuerpos que ascendieron cerca al eje del anticlinal y las fallas inversas de bajo ángulo en el flanco Este del anticlinal (véase fotografías 7 y 9 en el Anexo A); generalmente están acompañados de cuarzo cristalizado rellenando oquedades, así también de parches y disseminaciones de Sph (+Fe) (véase fotografía 8 en el Anexo A) que en ocasiones grada a semimasivos y masivos; por lo general el 1er estilo de mineralización contiene el segundo (con asp-cp+/-cst), el cual aumenta su contenido en la base y hacia Ayawilca Central. El 2do estilo de mineralización tiene una distribución más extensa en el núcleo del anticlinal, siendo más abundante cerca al contacto con las areniscas del Goyllarisquizga y en menor contenido a lo largo del flanco Este; este estilo se presenta como zonas de parches, disseminaciones, venilleos y en ocasiones reemplazamiento selectivo de los clastos de las calizas brechadas (véase fotografía 15 en el Anexo A); este estilo de mineralización sobrepasa al Goyllarisquizga, especialmente en zonas aledañas al eje del anticlinal, produciéndose venillas y vetas de sph con menor contenido de po-cp-asp-qz+/-

cst, así también como diseminación de sph a lo largo de la estratificación de la arenisca (véase fotografías 13 y 14 en el Anexo A). El contenido de pirrotita que se encuentra en las areniscas es limitado y muchas veces débilmente magnéticas. La cristalización de cuarzo es variada, pudiéndose encontrar pequeños cristales desarrollados acompañando a los sulfuros, especialmente en la zona cercana al eje del anticlinal, sin embargo, en zonas de “borde” como en los flancos del anticlinal se presenta generalmente como cuarzo amorfo, en ocasiones silicificando la roca o rellenando espacios vacíos.

Posteriormente el estadio “B” de py-mar se sobrescribe a toda la mineralización previa, reemplazando parcialmente los masivos y semimasivos de po-sph(+Fe), dejando muchas veces una textura oquerosa producto de la pérdida de volumen (véase fotografías 18 y 19 en el Anexo A). Este estadio tubo un mayor alcance y se expandió ampliamente hasta las areniscas del Goyllarisquizga (véase fotografías 20 y 21 en el Anexo A), reemplazando y acompañando las zonas del estadio anterior, así como zonas aledañas más extensas.

Finalmente, el estadio “C” corta toda la mineralización previa; se encuentra desde la base (cerca de la zona de masivos y semimasivos de sulfuros) como venillas y rellenos de cavidades de carbonatos complejos beige (Fe-Mn), así como calizas metasomatizadas por carbonatos en los bordes, ambos estilos acompañados con gn-sph(-Fe) +/- sulfosales (Ag+/-Cu) (véase fotografías 11, 19, 24 y 25 en el Anexo A). Este estadio craquela la roca preexistente, desde el centro del anticlinal hasta flanco este y oeste, de mayor a menor abundancia respectivamente; también precipita en las areniscas del Goyllarisquizga como venillas y en los intersticios de sus granos de cuarzo. La coloración de estos carbonatos varia de una tonalidad beige a blanco, si bien ambos carbonatos son

complejos en cuanto a su composición, el primero presenta mayor contenido de Fe-Mn y está más asociado a sid-ank+/-rds acompañados de sph (-Fe)-gn+-Sulfosales de Ag+/-Cu (véase fotografía 27 en el Anexo A); por ende, este carbonato se encuentra en zonas de mineral económico y áreas cercanas o de borde, caso contrario, el carbonato blanquecino generalmente se ubica en zonas más alejadas (véase fotografía 28 en el Anexo A).

En esta área las filitas del Excelsior presentan un venilleo centimétrico de toda la mineralización mencionada, muchas veces aprovechando las oquedades y bordes del cuarzo blanco metamórfico (véase fotografía 30 en el Anexo A), la cantidad de venilleo incrementa en dirección de Ayawilca Central.

La distribución espacial de los minerales de alteración sigue un comportamiento muy parecido al de la mineralización económica, siendo el núcleo del anticlinal una zona compleja de superposición de estadios. Sin embargo, se puede observar una asociación de Mag-Chl+/-Ta en las zonas de Mag+/-Po. Las zonas de concentración de sulfuros Sph-Py presentan una asociación de K-Dik+/-I-Cb-Qz, el cuarzo se encuentra principalmente en las zonas más profundas, también es usual encontrar esta asociación en el Goyllarisquizga, en la zona de vetas y disseminación de sulfuros. Las calizas de borde a las asociaciones previas presentan una asociación de Cb-K+/-Chl-I-Sm-Sílica, la presencia de clorita disminuye notablemente al alejarse de las zonas de mineralización económica, las calizas del flanco E del anticlinal predomina una asociación mineral de Cb-Sm-I+/-K-Chl del Pucará.

Adicionalmente existe un halo de alteración en las areniscas y limolitas del Goyllarisquizga, el óxido de manganeso intersticial a los granos de cuarzo de las areniscas, como relleno en algunas fracturas, y zonas de carbonatación de las

limolitas, ambas alteraciones se encuentran más desarrollados según su cercanía al eje del anticlinal.

Figura 23 Distribución espacial y porcentaje de mineralización del Estadio Pre-A en Ayawilca Oeste.

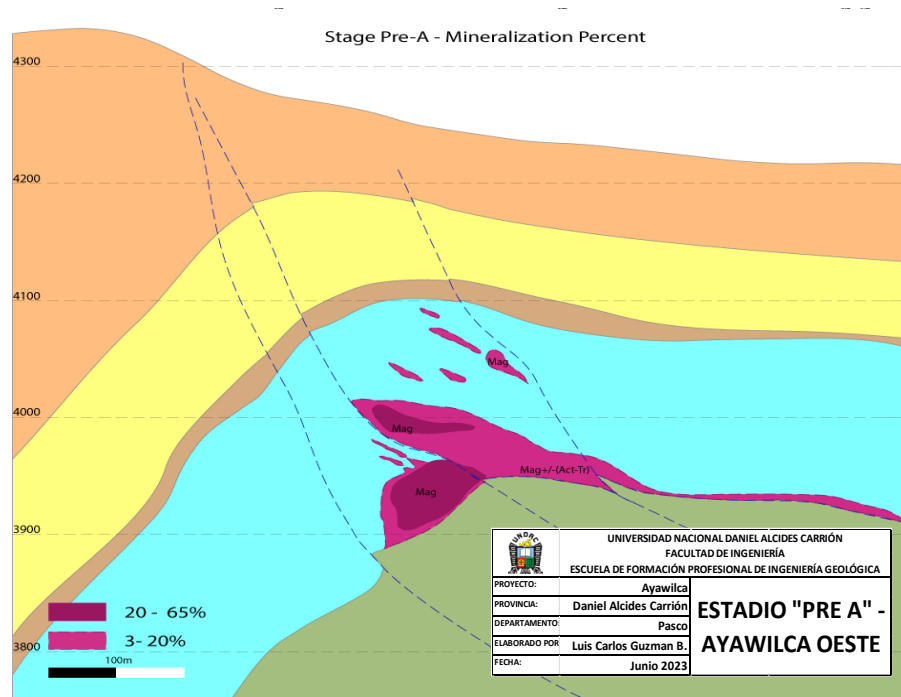


Figura 24 Distribución espacial y porcentaje de mineralización del Estadio A en Ayawilca Oeste.

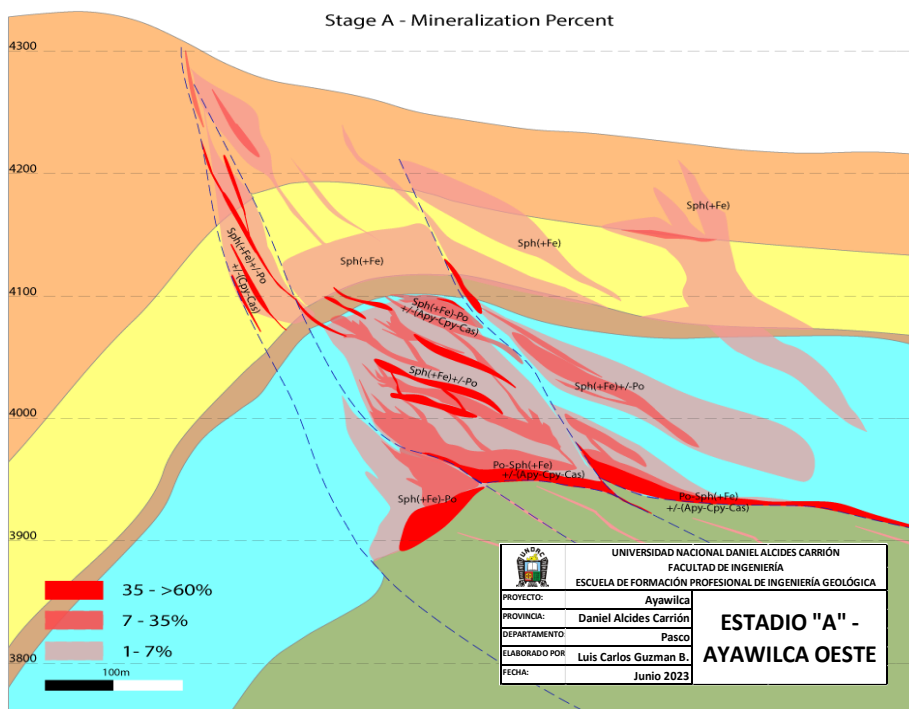


Figura 25 Distribución espacial y porcentaje de mineralización del Estadio B en Ayawilca Oeste.

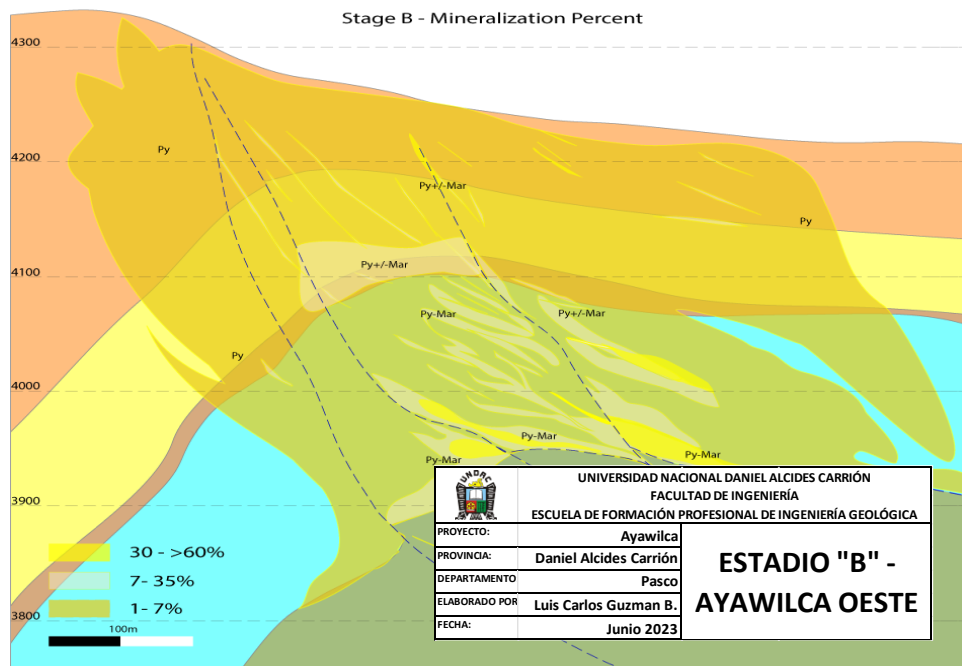
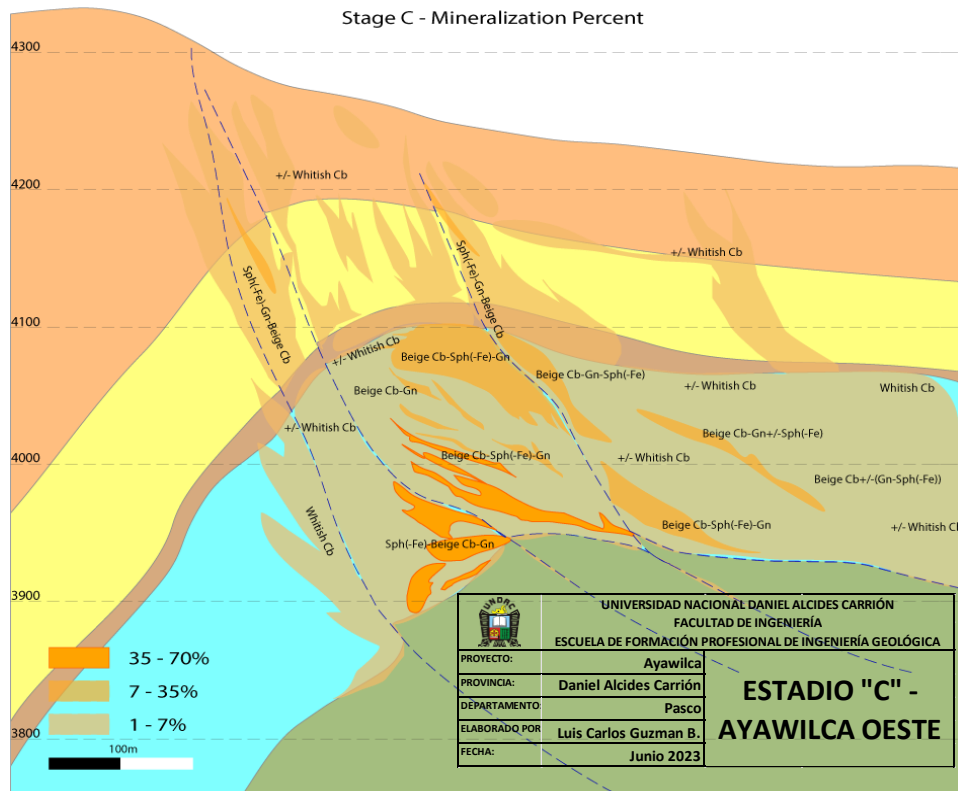


Figura 26 Distribución espacial y porcentaje de mineralización del Estadio C en Ayawilca Oeste



4.1.3. Ayawilca Sur

La mineralización económica es más abundante en esta parte del depósito, predomina el 1er estilo de mineralización a la cercanía del núcleo del anticlinal. El estadio Pre”A” desarrolló cuerpos masivos y semimasivos de magnetita, los cuales precipitaron ante la primera interacción con la secuencia carbonatada del Pucará, formando así mantos en el contacto Pucará-Excelsior y aprovechando su ascenso mediante fallas de bajo ángulo y permeabilidad producto del plegamiento; queda como evidencia algunas zonas de magnetita como relictos en el núcleo del anticlinal. Se puede encontrar Act-Tr en los bordes de los mantos, en zonas donde la superposición de eventos no ha sido muy desarrollada (véase fotografía 1 en el Anexo A), es decir en la transición hacia Ayawilca Central. Este estadio también se encuentra en menor cantidad como el 2do estilo de mineralización en los bordes de los masivos mismos, y en algunas zonas bajo el anticlinal tumbado (Goyllarisquizga y Pucará), posiblemente aprovechando el sistema de fallas de cabalgamiento.

El estadio “A” comprende un reemplazamiento de la mineralización previa. La pirrotita reemplaza en gran proporción a las zonas de magnetita y se extiende en sus bordes, ocupando zonas más cercanas a las charnelas y generando un núcleo con masivos de pirrotita (1er estilo de mineralización) que gradúa con un aumento progresivo de esfalerita (+Fe) hacia los bordes (véase fotografía 17 en el Anexo A), en forma de parches y reemplazamientos parciales a zonas de semimasivos y masivos; también se genera zonas del 2do estilo de mineralización en áreas cercanas al flanco superior del anticlinal, en calizas cloritizadas y argilizadas; áreas de venilleo, reemplazamiento selectivo, parches y diseminaciones de Sph+/-Po. Este estadio está acompañado de diseminaciones y

parches de asp-cp+/-cas, principalmente cerca al eje, a las charnelas, así como en las zonas de pirrotita. Ambos estilos de mineralización están acompañados de cuarzo, el más cristalizado en drusas y venilleos en la zona de sulfuros y como venillas de cuarzos amorfo y zonas silicificadas cerca al flanco superior del anticlinal. La mineralización de este estadio se extiende y sobrepasa hacia las areniscas del Goyllarisquizga, generando zonas de masivos de sph muy cerca de las charnelas, así como vetas de Sph+/-Po-asp-cp, bandeamientos, disseminaciones y venilleos sobre el anticlinal tumbado (véase fotografías 13 y 14 en el Anexo A). Al igual que el estadio previo, esta mineralización también se encuentra en menor cantidad en las zonas aledañas bajo el anticlinal tumbado; es usual encontrar el segundo estilo de mineralización como remplazamientos selectivos, parches, venilleos y disseminaciones en los bordes de los sulfuros masivos, especialmente al NE, en las calizas sobre algunas fallas de sobrecurrimiento de bajo ángulo.

El estadio “B” tuvo un área de influencia más extensa, siendo la zona de mayor abundancia el núcleo del anticlinal; reemplazando principalmente po+/-Sph(+Fe) por py-mar, consecuentemente, se ubican como zonas masivas y semimasivas cerca al núcleo del anticlinal (véase fotografías 18 y 19 en el Anexo A). El segundo estilo de mineralización abarca un área más extensa, tanto en los bordes de los sulfuros en el Pucará como en toda el área del plegamiento en el Goyllarisquizga, acompañando a zonas de mineralización del estadio anterior como vetillas, disseminaciones, vetas y bandeamientos (véase fotografías 20 y 21 en el Anexo A).

El estadio “C” corta toda la mineralización previa, aprovecha los espacios de calizas que no fueron reemplazados completamente, así como las zonas de

borde. Este estadio se presenta como el 2do estilo de mineralización, relleno de cavidades y venillos de carbonatos complejos beige (Fe-Mn) con diseminaciones de Gn-Sph(-Fe)+/-sulfosales (Ag+/-Cu) que cortan los masivos de sulfuros. Adicionalmente se generan zonas de metasomatismo y remplazamiento en los bordes de los sulfuros masivos (véase fotografías 24 y 25 en el Anexo A). Un área donde se ha desarrollado notablemente la zona de reemplazamiento y metasomatismo con carbonatos complejos es el flanco inferior del anticlinal tumbado, cerca al borde N en una tendencia SO-NE, presenta áreas de calizas recristalizadas con carbonatos complejos beige y con diseminaciones de sulfosales de Ag. Las zonas de calizas metasomáticas contienen carbonatos complejos de Fe-Mn, la coloración varia de beige a blanquecina, siendo el primero acompañado usualmente por Gn-Sph(-Fe)+/-sulfosales de Ag-Cu y el segundo con menor contenido de sulfuros y un tanto más de alejado de la zona de sulfuros masivos (véase fotografías 28 y 29 en el Anexo A).

La distribución de las alteraciones en Ayawilca Sur tiene una configuración muy parecida a la de la mineralización, siendo los relictos de masivos de magnetita en la parte céntrica del núcleo del anticlinal acompañados con Chl+/-Act. Las zonas de sulfuros contienen Dik-K-Qz+/-I, así también las áreas aledañas a las vetas y zonas de diseminación de Py-Sph+/-Cb en las areniscas del Goyllarisquizga. Las calizas que circundan al núcleo mineralizado del anticlinal contienen una asociación Cb-Chl-K+/-I-Sílica con una disminución de Chl hacia el exterior, en una transición hacia el NE la asociación comprende Cb+/-Sm-K-I-Chl, esta asociación se presenta principalmente en las calizas del Pucará.

Al igual que en Ayawilca Oeste, existe un halo de alteración en las areniscas y limolitas del Goyllarisquizga, evidenciándose también óxido de manganeso intersticial a los granos de cuarzo de las areniscas y como relleno de algunas fracturas.

Figura 28 Distribución espacial y porcentaje de mineralización del Estadio Pre-A en Ayawilca Sur.

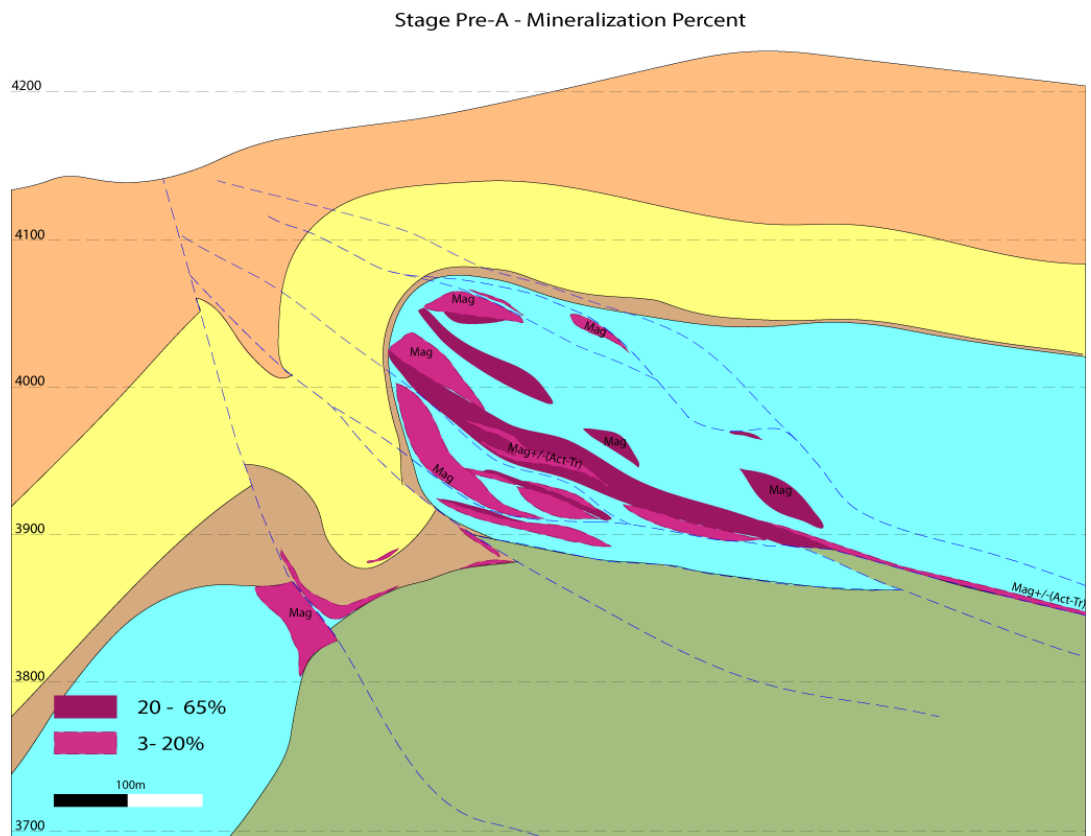


Figura 29 Distribución espacial y porcentaje de mineralización del Estadio A en Ayawilca Sur.

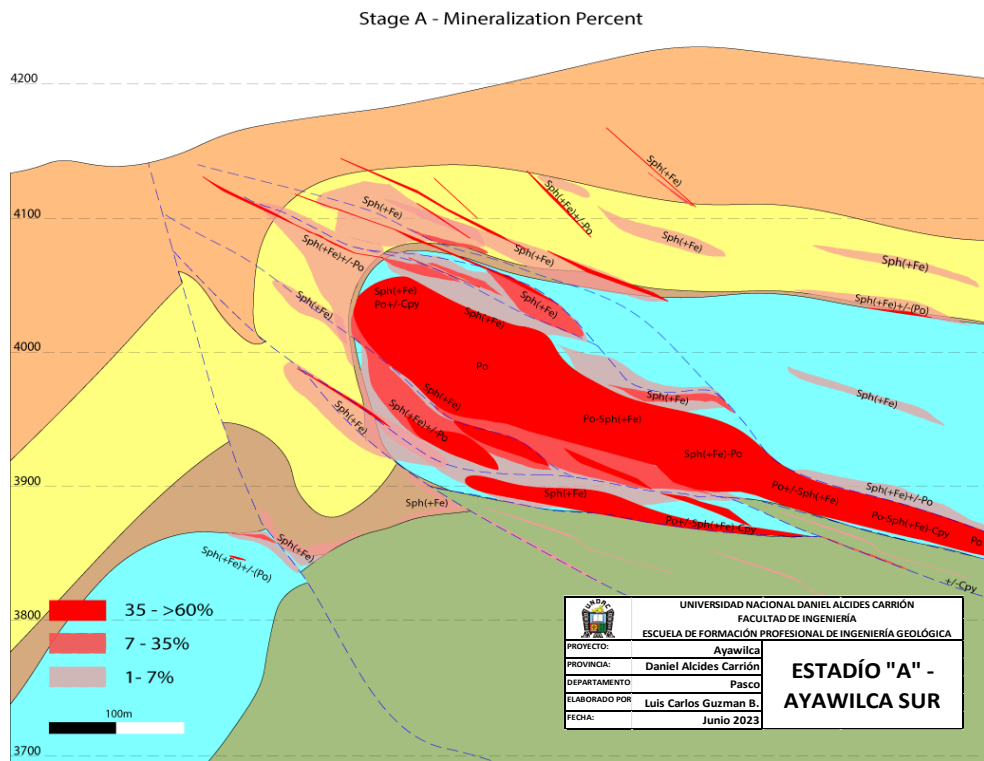


Figura 30 Distribución espacial y porcentaje de mineralización del Estadio B en Ayawilca Sur.

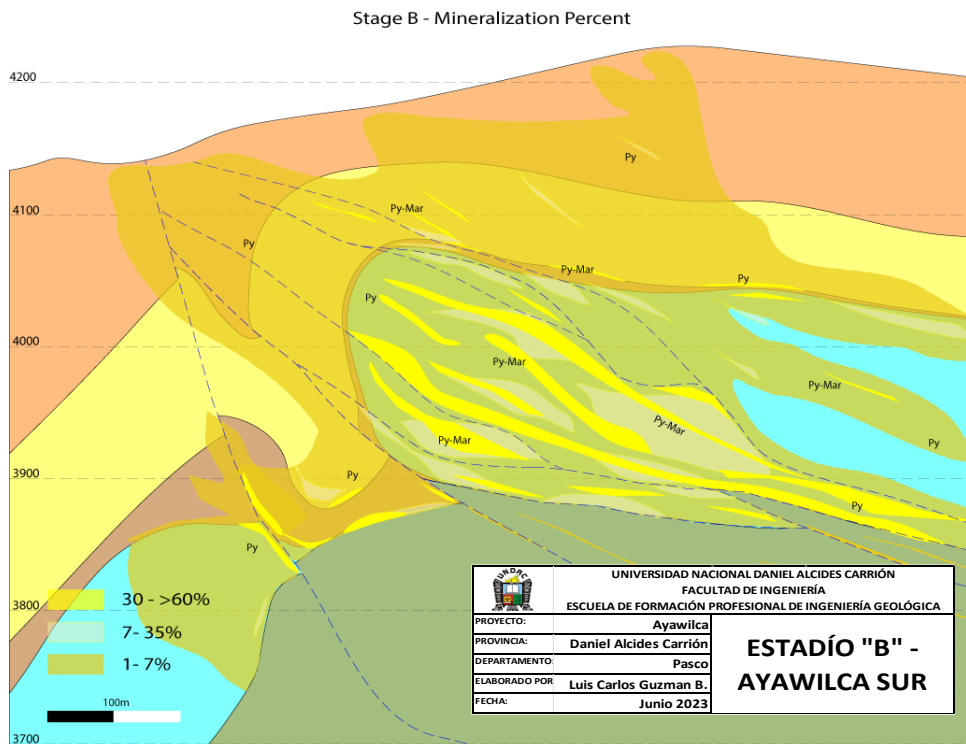


Figura 31 Distribución espacial y porcentaje de mineralización del Estadio C en Ayawilca Sur.

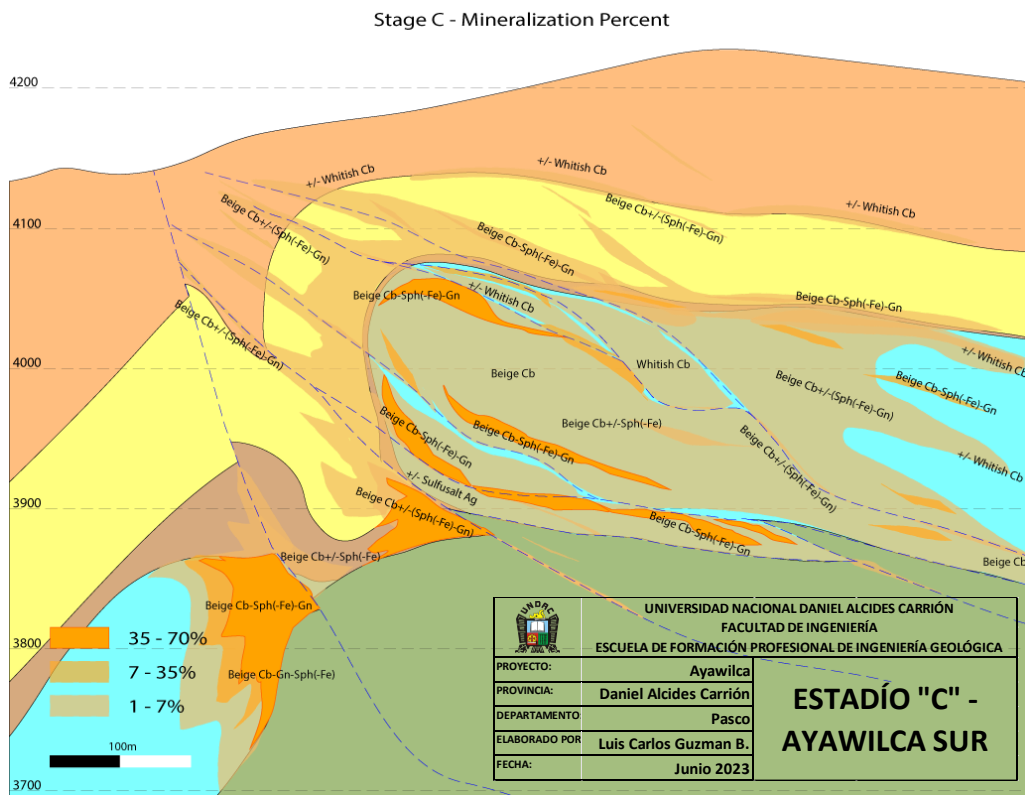
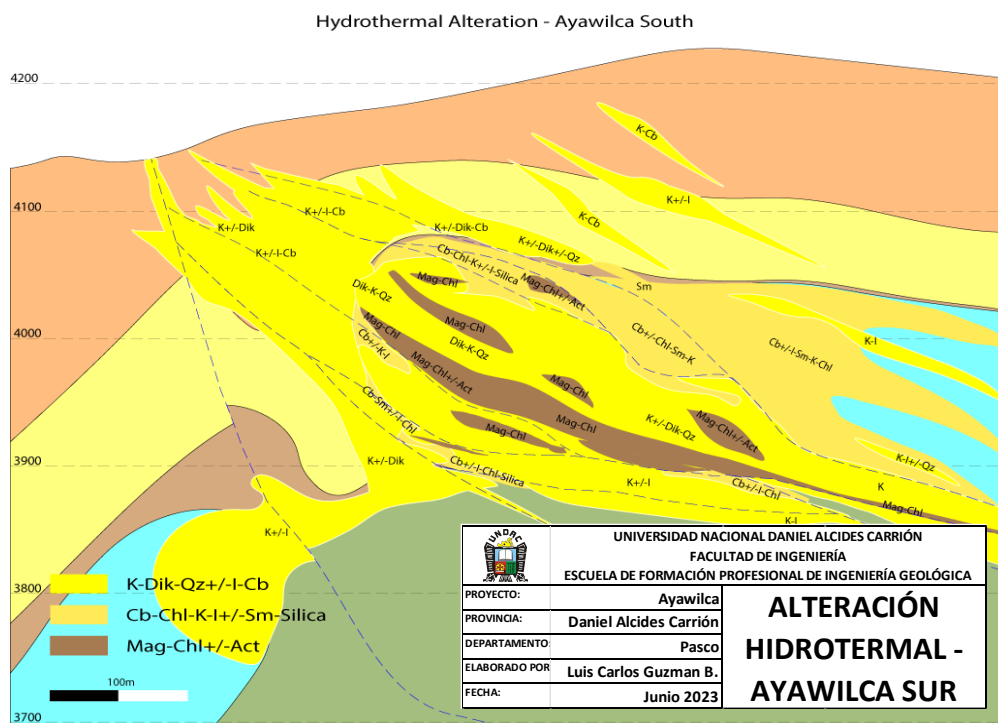


Figura 32 Distribución espacial de los minerales de alteración en Ayawilca Sur.



4.2. Discusión de Resultados

4.2.1. Distribución Espacial

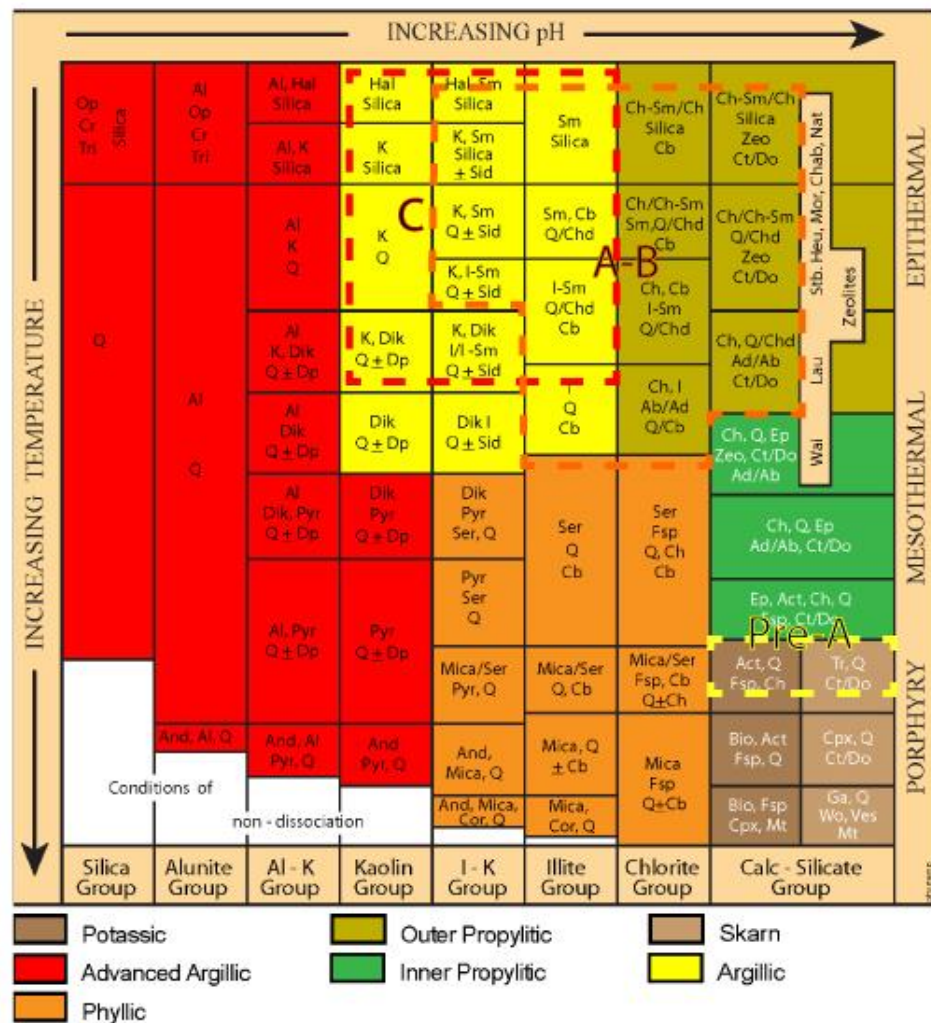
El depósito Ayawilca presenta una distribución mineralógica de minerales de temperatura alta hacia la base del Pucará y Ayawilca central con un ensamble po-sph(+Fe)+/-cp, adicionalmente existen zonas tanto en Ayawilca Oeste y Sur donde la cp logra ascender mediante fallas cerca al núcleo del anticlinal. Si bien el estadio C se encuentra en las zonas de masivos de sulfuros, el ensamble Cb-Gn+/-Sulfosales Ag-Sph(-Fe) es más abundante en los bordes de los cuerpos masivos de mineralización.

Al igual que otros depósitos asociados a un sistema hidrotermal como Colquijirca (Bendezú & Fontboté, 2009), el Cu se encuentra proximal a las zonas más calientes y Zn-Pb-Ag-Mn en zonas más distales. La distribución mineralógica puede ser usado para incrementar los targets de exploración debido a que estos vectorizan el posible centro del sistema de la mineralización. (Fontboté, Kouzmanov, Chiaradia, & Pokrovski, 2017). Adicionalmente se pudo observar que la abundancia de la Sph(+Fe) respecto a la Sph (-Fe) es notoria en las partes más profundas ya que el primer estadio se formó en condiciones más calientes y el tercero habría más interacción con aguas superficiales (Sack and Ebel 2006).

4.2.2. Alteraciones Hidrotermales

La alteración en los depósitos CRD es relativamente reducida en relación a otros depósitos asociados a un sistema pórfido, debido a que muchas veces el contacto entre la roca hospedante y la mineralización es abrupta y esta alteración es complicada de distinguir o suele ser muy sutil (Peter K. Megaw, 1999).

Figura 33 *Minerales de alteración asociados a los estadios de mineralización del Proyecto Ayawilca.*



Se ha diferenciado tres principales asociaciones mineralógicas, que presenta relación con la distribución de los estadios de mineralización y su superposición.

La asociación Mag-chl+/-act-tr se encuentra como relictos de las primeras interacciones de la roca con los fluidos hidrotermales, evidenciando condiciones básicas y temperatura superior a 350°C reportado para el qz del estadio A por (Harlaux, 2019), también se evidencia talco en la parte alta de Ayawilca Oeste lo que evidenciaría una zona de relativa menor temperatura.

Considerando temperaturas de 250-300 para el estadio A y ~200°C para el estadio C (Benites, Torró, & Vallance, Ore mineralogy of the In-bearing Ayawilca Zn-Ag-Sn-Cu project, Pasco, Peru, 2019)(Nakamura y Shima, 1982), sumado a un continuo aumento de pH para los últimos estadios, se pueden observar dos asociaciones en ambas zonas: La asociación K-Dik+/-Cb-I y Cb-Sm-I-K+/-Chl. La asociación K-Dik-Qz+/-Cb-I es más acida y de mayor temperatura respecto a la segunda, por lo que se encuentra alejados a las zonas más mineralizadas con sulfuros, evidenciando una superposición de los estadios de mineralización. La mineralización de zinc está asociada a alteración argílica avanzada (caolinita y dickita) en las rocas carbonatadas hospedantes (El Rassi y Ross, 2019; Peralta et al., 2019).

La asociación Cb-Sm-Chl+/-K-I-Sílica está más extendida, donde las minerales más ácidos como K-Sid+/-dik se encuentra más cerca de las zonas de sulfuros y Cb-Sm-I-Chl en los bordes lo que evidenciaría un tránsito menor de los fluidos hidrotermales.

La distribución del cuarzo cristalizado en drusas se encuentra las zonas de sulfuros masivos, generalmente en la base del pucara o zonas cercanas al núcleo del anticlinal, la sílice amorfa (sílica) esa ubicada en zonas de borde, lo que también refleja las variaciones de temperatura. La precipitación de sílice amorfa en los niveles de corteza poco profunda y baja temperatura varia de <100-150° C y la cristalización de cuarzo sobre los 180° C (Corbett, 2018).

Los carbonatos más cercanos a las zonas económicas con sulfuros de zinc tienden a ser de tonalidad beige (+Fe), mientras que las que están más alejadas presentan colores blanquecinos, Los carbonatos de Fe-Mn coexisten con caolinita e illita, mientras que los carbonatos mixtos de Ca-Mn-Mg-Fe (rodocrosita-

ankerita-kutnahorita-dolomita) ocurren con illita-clorita, y carbonatos de Ca-Mg (dolomita-calcita) ocurren con clorita y minerales calcosilicatos. Esta zonación es interpretada por el producto de la movilidad decreciente de Fe-Mg y Mn a Ph progresivamente más alto (Townley, 2001).

En un análisis mineralógico por difracción de rayos X realizado por (Quispe Cardenas, 2020) Se ha distinguido 3 tipos de asociaciones: chl + tal ± act ± tr (skarn retrogrado dolomítico), sph(+Fe) + po + asp + mg (baja sulfuración) y k + cb de Fe-Mn-Mg + dik + py (sulfuración intermedia).

4.2.3. Roca Hospedante

Las secuencias calcáreas del Grupo Pucará son conocidas como un buen metalotecto en la parte Central del Perú (San Vicente - Shalipayco). Los fluidos migran de fuentes calientes a través de la permeabilidad del control de estructuras hasta encontrar la roca carbonatada favorable para la mineralización (Megaw, 1988).

Las calizas son rocas reactivas ante la interacción de fluidos hidrotermales, la mineralización se desarrolla en un proceso casi simultaneo a la disolución del carbonato y deposición del sulfuro, este mecanismo de reemplazamiento está respaldado por evidencia de que los fluidos migran a través de intrusiones o minerales previamente formados, hacia los sitios de crecimiento del yacimiento (Megaw 1990).

La precipitación del primer estadio se dio en condiciones de baja fugacidad de S, posteriormente las condiciones fueron cada vez más acidas hasta tener ensambles de IS en el estadio C, esto debido a que la roca caja progresivamente fue perdiendo su capacidad como buffer.

Las filitas carbonáceas del Excelsior probablemente causaron la reducción de fugacidad de oxígeno ante el paso de los fluidos hidrotermales.

4.2.4. Control estructural

Las condiciones de permeabilidad y porosidad operan a macro y microescala, junto con la proximidad de rutas y fuentes de migración, son crucial para la ubicación de la mineralización.

Ayawilca Oeste y Sur presentan un brechamiento por disolución previo a la mineralización, una brecha monomíctica de caliza y puntualmente en Ayawilca Oeste una brecha polimíctica con clastos de arenisca y caliza en matriz calcárea que en ciertas áreas es clasto soportada, probablemente formado por colapso gravitacional en cavidades de disolución de capas de yeso y anhidrita. (Eliassen & Talbot, 2005) o disolución de kárstica. Existe evidencias de anhidrita al NE del proyecto y el cual estaría asociado a de niveles evaporíticos del Triásico - Jurásico, en la base de la formación Pucará (Rosas, Fontboté, & Tankard, 2007). Las brechas en general son de importancia económica para exploración de hidrocarburos, uranio, sulfuro, plata, oro y otros depósitos, según tengan buena porosidad y permeabilidad (Matsyendra & Anupam, 2017).

El plegamiento y formación de un anticlinal tumbado en Ayawilca Sur y anticlinal en Ayawilca Oeste sumaron la mejora de permeabilidad en ambas zonas, el fracturamiento inducido por deformación se desarrolla en escalas micro hasta más de cientos de metros (Cox, Knackstedt, & Braun, 2001). Esto se evidencia probablemente en la formación del upper manto ubicado generalmente en el contacto entre el Goyllarisquizga superior/medio y demás estructuras paralelas a la charnela del anticlinal en las areniscas del Goyllarisquizga, conocidos como saddle reef, que ante el empuje de acomodación genera alta

permeabilidad en las zonas de la charnela en plegamiento de multicapas (Cosgrove, 2015). Así también, se podría explicar el halo sin mineralización del 1er estilo en las calizas del flanco superior del plegamiento en Ayawilca Sur, ya que en un plegamiento de una roca masiva existe una superficie neutra paralelo al plegamiento a lo largo del cual no hay tensión; por lo que no se genera fracturamiento. La distribución de la deformación dentro de la curvatura del plegamiento se forma en una capa isótropa o masiva como arenisca o caliza masiva sin estratificación, la deformación se concentra en la charnela, por lo tanto, es donde se forma el fracturamiento más intenso (Cosgrove, 2015). Sin embargo, ante el plegamiento de diferentes litologías y diferentes espesores, una capa individual intentara desarrollarse según sus propias características de propiedades mecánicas y espesor. Las fajas de pliegues de empuje en márgenes convergentes hospedan los depósitos más grandes de tipo pórfido y epitermal en el mundo (Cooke et al., 2005).

Tanto Ayawilca Sur como Oeste estan en la zona de influencia de la falla de rumbo andino Colquipucro, el cual delimita el plegamiento en ambas zonas. La falla 060 de rumbo trans-andino ayudo en el entrampamiento de la mineralización en Ayawilca Sur, esta falla fue rellenada de sulfuros en su zona Oeste, de igual modo se encuentran pequeñas vetas de igual rumbo en Ayawilca Oeste. También se ha evidenciado brechas de falla en el contacto Pucará-Excélsior, así como fallas inversas de bajo ángulo con vergencia hacia el SO que superponen capas de filitas sobre caliza, estas repeticiones de calizas bajo el Excélsior suelen estar mineralizadas. Se observa un venilleo con sulfuros en el Excélsior, en algunos casos paralelo a las fallas de bajo ángulo, por lo que se

deduce que estas fallas habrían sido el conducto para la circulación de fluidos mineralizantes.

La geometría y distribución de la permeabilidad de la fractura está controlada fundamentalmente por los estados de tensión y presión del fluido, pero también puede estar influenciada por anisotropías mecánicas preexistentes en el macizo rocoso. La retroalimentación positiva entre la deformación, el flujo de fluido y la presión del fluido promueve el crecimiento impulsado por fluidos de redes de fallas, fracturas y zonas de corte vinculadas hidráulicamente. (Cox, Knackstedt, & Braun, 2001).

Si bien el aspecto estructural mejoró las condiciones para la precipitación de mineralización en Ayawilca, el continuo aporte de fluido y superposición de eventos, generó las zonas de alta ley de zinc. La complejidad del depósito es una consecuencia natural de la longevidad y fuerza del evento hidrotermal y los controles sobre la mineralización (Megaw 1990).

CONCLUSIONES

1. Se elaboro las secciones que muestran la distribución espacial de la mineralización en dos estilos: el 1ero de reemplazamiento intenso que generó masivos y semimasivos y el 2do como zonas de reemplazamiento selectivo, parches y venilleos en el Pucará, así como vetas, bandeamientos y diseminaciones en el Goyllarisquizga.
2. Ayawilca presenta un zonamiento de Cu en la parte basal del Pucara, Zn en los núcleos del anticlinal y Pb-Ag en sus flancos. El incremento de minerales de alta temperatura, como el ensamble Po-Cp aumentó progresivamente desde Ayawilca Oeste y Sur hacia Ayawilca Central, esto indicaría la posible dirección de la fuente de mineralización; en zonas debajo del cabalgamiento del Excélsior sobre el Pucará se observó un venilleo de los estadíos de mineralización A, B y C, el cual también incrementa hacia Ayawilca Central.
3. La distribución espacial de la alteración hidrotermal muestra las zonas de mayor circulación de fluido con una alteración K-Dik+/-Qz-I-Cb, generalmente en áreas del 1er estilo de mineralización. En la gradación al 2do estilo de mineralización es usual encontrar zonas con Cb-Chl-K+/-I-Silica, siendo generalmente el carbonato Fe-Mn de color beige el más cercano a las zonas de sulfuros masivos. Las zonas de relictos de las primeras interacciones con fluidos hidrotermales presentan mag-chl+/-act-tr.
4. La presencia de la secuencia carbonatada del Pucará juntamente con la complejidad estructural de la zona generó condiciones favorables para la precipitación de hasta 70 m de mineralización importante de zinc (Ayawilca Sur), predominando zonas de superposición de estadíos con ensambles cada vez más ácidos, donde el estadío "A" es económicamente más importante y abundante.
5. El plegamiento en Ayawilca Oeste juntamente con la Falla Colquipucro y un brechamiento cerca al núcleo del anticlinal generaron las condiciones de

permeabilidad óptima para el ascenso de los fluidos mineralizantes, la precipitación comenzó en la base del Pucará y ascendió continuamente cerca del eje del anticlinal y alrededores, aprovechando las fallas de cabalgamiento (fallas de bajo ángulo), así también, formaron el camino para los siguientes estadios. La precipitación progresiva creó zonas de superposición con mineralización de zinc, el cual tuvo un alcance hasta las areniscas del Goyllarisquizga en zonas aledañas al eje del anticlinal.

6. Ayawilca Sur desarrolló una evolución estructural más compleja debido a la intersección de fallas (Colquipucro y 060), brechamiento y un plegamiento más pronunciado con sus fallas de cabalgamiento; estas condiciones resultaron muy favorables para el entrapamiento del mineral y una superposición más intensa de los estadios de mineralización en el núcleo del anticlinal, por consiguiente, un área mayor con masivos de sulfuros de zinc. Así también, esta complejidad estructural permitió que el fluido pueda sobrepasar a las areniscas del Goyllarisquizga y e incluso mineralizar los horizontes calcáreos repetidos bajo el anticlinal tumbado.

RECOMENDACIONES

1. Las zonas que evidencian plegamientos ligeros, fallas paralelas a las principales y fallas de cabalgamiento en profundidad son zonas de exploración para ampliar el recurso de Ayawilca, si bien podrían no ser mineralización de alta ley de zinc, estas zonas presentarían el segundo estilo de mineralización generalmente con un alto tonelaje, por lo que se recomienda ejecutar sondajes de exploración.
2. Ayawilca es un proyecto de exploración avanzado, por lo que cuenta con una amplia base de datos; asimismo, Tinka Resources tiene concesiones con características estructurales y litológicas parecidas; por ende, se recomienda implementar y desarrollar Machine Learning en la exploración venidera y sus nuevos targets.
3. Para un estudio detallado de las alteraciones en el proyecto Ayawilca, se recomienda realizar un programa de procesamiento hiperespectral de imágenes de core completo en un conjunto de sondajes representativos, esto a fin de obtener una data más detallada acorde a las nuevas tecnologías; además, ante una eventual implementación de Machine Learning, estos datos serían un elemento más para una mejor interpretación.
4. Ayawilca se encuentra en un ambiente de acortamiento, donde el factor estructural jugó un rol importante, por ende, se recomienda realizar análisis de esfuerzos para mejorar comprensión y generar nuevos targets en el depósito y aledaños.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benavides, C. (1999). Orogenic Evolution of the Peruvian Andes. The Andean Cycle. Special Publication no. 7, 61-107.
- Bendezú Juárez, R. (2007). Shallow polymetallic and precious metal mineralization associated with a Miocene diatreme-dome complex: the Colquijirca district in Peruvian Andes. 105-115.
- Bendezú, R., & Fontboté, L. (2009). Cordilleran Epithermal Cu-Zn-Pb-(Au-Ag) Mineralization in the Colquijirca District, Central Peru: Deposit-Scale Mineralogical Patterns. *Economic Geology*, v. 104.
- Benites, D., Torró, L., & Vallance, J. (2019). Ore mineralogy of the In-bearing Ayawilca Zn-Ag-Sn-Cu project, Pasco, Peru.
- Benites, D., Torró, L., & Vallance, J. (2021). Geology, mineralogy, and cassiterite geochronology of the Ayawilca Zn Pb Ag In Sn Cu deposit, Pasco, Peru. Springer.
- Carlotto, V., Cardenas, J., Reitsma, M., & Rodriguez, R. (2010). Las Edades de la formación ene y del Grupo Mito:. Propuesta de Cambios en la Cartografía Regional: Abancay-Cisco-Sicuani.
- Catchpole, H., Kouzmanov, K., Putlitz, B., Hun Seo, J., & Fontboté, L. (2015). Zoned Base Metal Mineralization in a Porphyry System: Origin and Evolution of Mineralizing Fluids in the Morococha District, Peru. *Economic Geology*, 39-71.
- Corbett, G. (2018). Epithermal Gold-Silver and Porphyry Copper-Gold Exploration.
- Cosgrove, J. (2015). The association of folds and fractures and the link between folding, fracturing and fluid flow during the evolution of a fold-thrust belt: A brief review. Geological Society London Special Publications.

- Cox, S., Knackstedt, M., & Braun, J. (2001). Principles of structural Control on Permeability and Fluid Flow in Hydrothermal Systems. *Economic Geology*.
- De Berríos, O. G. (2009). Enfoques epistemológicos que orientan la investigación de 4to. nivel. *Vision Gerencial*, 47-54.
- Eliassen, A., & Talbot, M. (2005). Solution-collapse breccias of the Minkinfjellet and Wordiekammen formations, central Spitsbergen, Svalbard: a large gypsum paleokarst system. *Sedimentology*, 775-794.
- Fontboté, L. (2019). Cordilleran Polymetallic Deposits as a Class in Porphyry Systems: Exploration implications. SEG-SGA-UNESCO Latino American Metallogeny Course.
- Fontboté, L., Kouzmanov, K., Chiaradia, M., & Pokrovski, G. (2017). Sulfide Minerals in Hydrothermal Deposits. *Elements*.
- Fossen, H. (2010). *Structural Geology*. New York: Cambridge.
- Harlaux, M. (2019). Fluid inclusion study of the early pyrrhotite mineralization stage from the Ayawilca Zn-In-Ag-Sn deposit. Internal unpublished report, 22.
- Herail, G., Jaillard, E., Monfret, T., & Diaz Martinez, E. (2000). Tectonic evolution of the Andes of Equador, Peru, Bolivia and northernmost Chile.
- Herrmann, W., Blake, M., & Doyle, M. (2001). Short Wavelength Infrared (SWIR) Spectral Analysis of Hydrothermal Alteration Zones Associated with Base Metal Sulfide Deposits at Rosebery and Western Tharsis, Tasmania, and Highway-Reward, Queensland. *Economic Geology*, 939–955.
- Martin Andreas, W. (2006). Evolution of the Western Cordillera and coastal margin of Peru: evidence from low-temperature thermochronology and geomorphology. ETH Zurich Research Collection.

- Matsyendra, K., & Anupam, S. (2017). A brief review on breccia: it's contrasting origin and diagnostic signatures. *Solid Earth Sciences*.
- Mégard, F. (1978). Etude géologique des Andes du Pérou central. *Mémoires ORSTOM*, v. 86.
- Mégard, F. (1984). The Andean orogenic period and its major structures in central and northern Peru. *Journal of the Geological Society*, 893-900.
- Megaw, P. K. (s/f). Carbonate-Hosted Pb-Zn-Ag-Cu-Au Replacement Deposits: An exploration perspective.
- MEINERT, L., DIPPLE, G., & NICOLESCU, S. (2005). World Skarn Deposits. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 299–336.
- Pfiffner, A. (2013). Mesozoic–Cenozoic Evolution of the Western Margin of South America: Case Study of the Peruvian Andes. *Geosciences*.
- Quispe Cardenas, C. (2020). Geología, geoquímica y mineralogía del yacimiento portador de indio de Ayawilca, Pasco, Perú.
- Rosas, S., Fontboté, L., & Tankard, A. (2007). Tectonic evolution and paleogeography of the Mesozoic Pucará Basin, central Peru. *Journal of South American Earth Sciences* 24.
- Rottier, B., Kouzmanov, K., Casanova, V., Wälle, M., & Fontboté, L. (2018). Cyclic Dilution of Magmatic Metal-Rich Hypersaline Fluids by Magmatic Low-Salinity Fluid: A Major Process Generating the Giant Epithermal Polymetallic Deposit of Cerro de Pasco, Peru. *Society of Economic Geologists*.
- Rottier, B., Kouzmanov, K., Wälle, M., Bendejú, R., & Fontboté, L. (2016). Sulfide Replacement Processes Revealed by Textural and LA-ICP-MS Trace Element Analyses: Example from the Early Mineralization Stages at Cerro de Pasco, Peru. *Economic Geology*, v. 111, 1347–1367.

- Sampieri, H. (2014). Metodología de la Investigación. McGRAW-HILL.
- Scherrenberg, A. F., Holcombe, R. J., & Rosenbaum, G. (2014). The persistence and role of basin structures on the 3D architecture of the Marañón Fold-Thrust Belt, Peru. ScienceDirect.
- Scherrenberg, A. F., Holcombe, R., & Rosenbaum, G. (2014). The persistence and role of basin structures on the 3D architecture of the Marañón. Journal of South American Earth Sciences.
- Sebrier, M., Lavenu, A., Fornari, M., & Soulas, J. (1988). Tectonics and uplift in Central Andes (Peru, Bolivia, and Northern Chile) from Eocene to Present: Géodynamique v.3. 85-106.
- Sillitoe, R. (2010). Porphyry Copper Systems.
- Townley, B. K. (2001). Metalogénesis: Hidrotermalismo y Modelos de Yacimientos. Geología Económica Departamento de Geología Universidad de Chile.
- Uzieda, M. F., Fontboté, L., & Kouzmanov, K. (2020). Mineralization stages at the Ayawilca Zn-Pb-In-Ag-Sn-Cu deposit, Pasco, Peru: new insights. Swiss Geoscience Meeting, 52-53.

ANEXOS

Instrumentos de Recolección de Datos



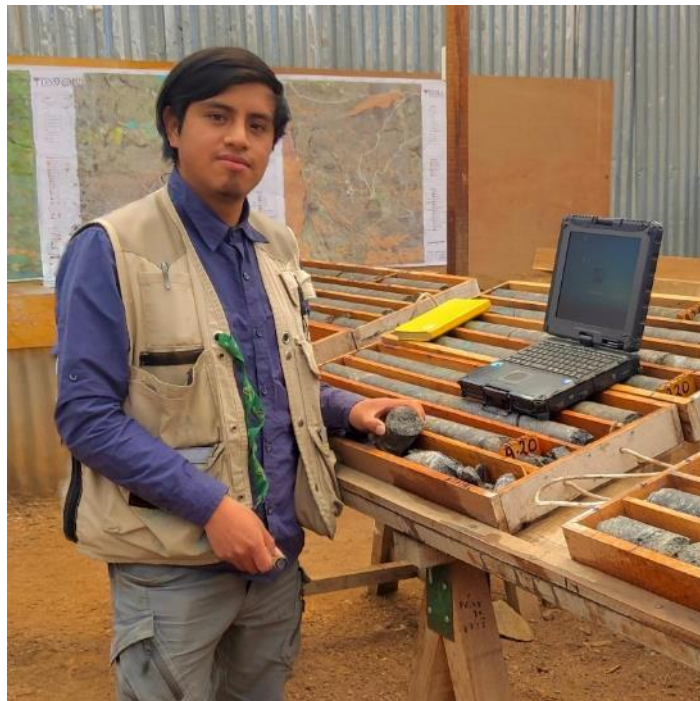
Fotografía 1: Logueo geológico de testigos de perforación.



Fotografía 2: Logueo geológico (izquierda) y lectura de dirección de estructuras con IQLogger derecha).

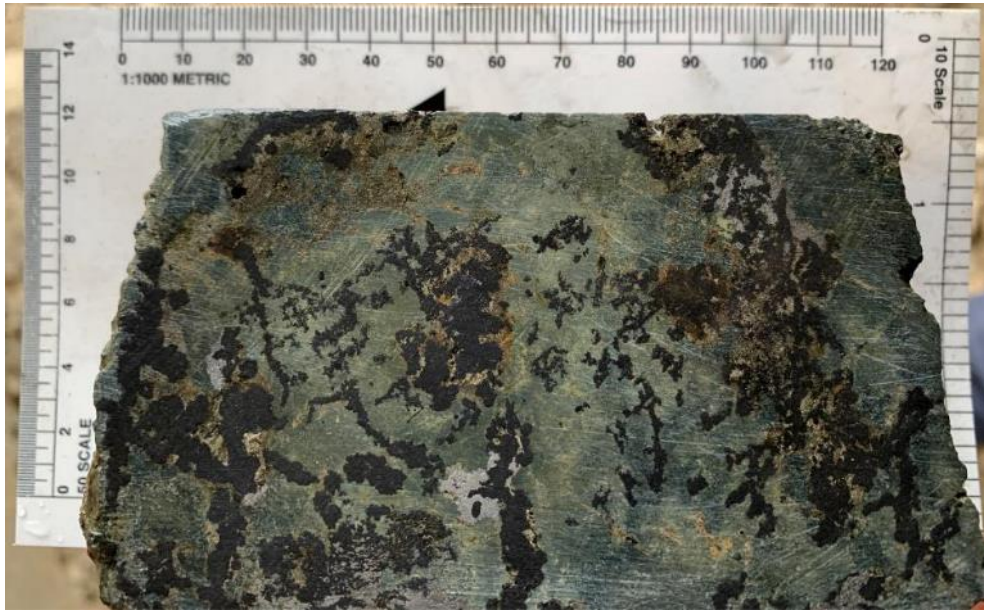


Fotografía 3: Revisión de estilos de mineralización y toma de fotografías.



Fotografía 4: Revisión de estilos de mineralización.

Registro Fotográfico de la Mineralización



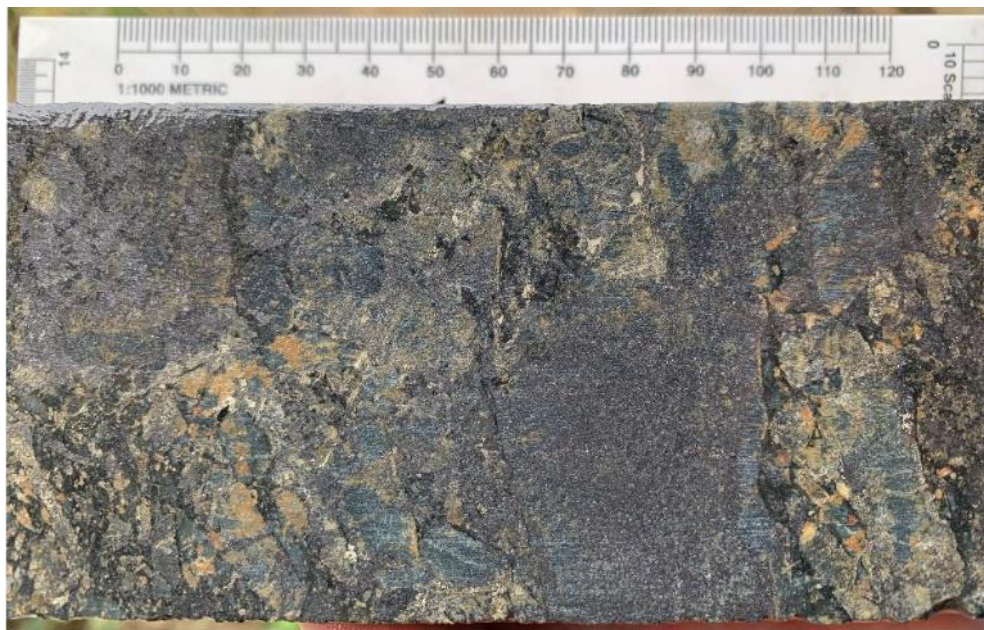
Fotografía 5: Mineralización del estadio Pre-A, magnetita pseudo-arborescente con bordes de actinolita-tremolita en una matriz cloritizada, algunos parches de arsenopirita del estadio A, segundo estilo de mineralización.



Fotografía 6: Zona de carbonatos complejos Fe-Mn con parches de magnetita (Estadio Pre-A), pirita (Estadio B) +/-esfalerita (Estadio A), segundo estilo de mineralización.



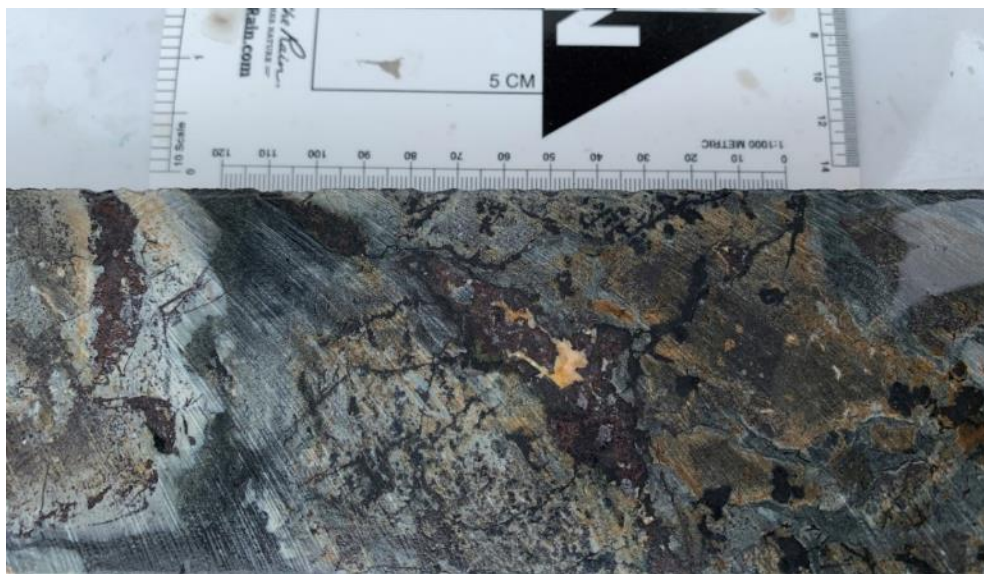
Fotografía 7: Sobreimposición de esfalerita (+Fe) sobre mineralización del estadio Pre-A (magnetita-clorita), relictos de brecha de caliza, segundo estilo de mineralización.



Fotografía 8: Sobreimposición de esfalerita (+Fe) sobre mineralización del estadio Pre-A (magnetita-clorita), relictos de brecha de caliza, segundo estilo de mineralización.



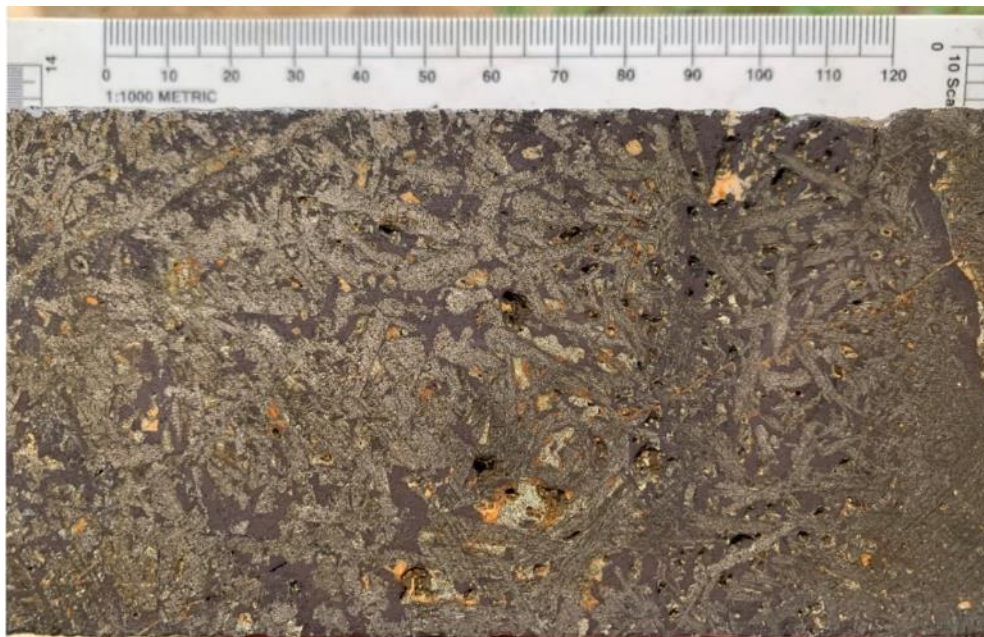
Fotografía 9: Reemplazamiento de esfalerita (+Fe) sobre los relictos de la mineralización skarn (actinolita-tremolita-magnetita), segundo estilo de mineralización.



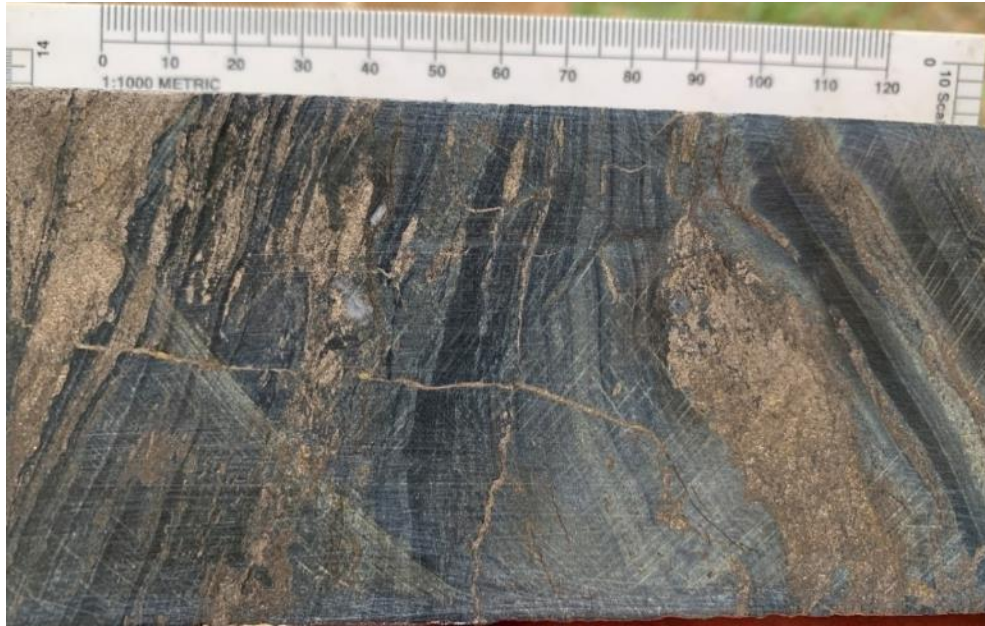
Fotografía 10: Caliza moderadamente cloritizada con venilleo de magnetita (Estadío Pre-A) con parches de esfalerita (+Fe), segundo estilo de mineralización.



Fotografía 11: Sobreimposición de pirrotita-arsenopirita (Estadío A) sobre magnetita (Estadío Pre-A) y posterior pirita (Estadío B), primer estilo de mineralización.



Fotografía 12: Masivo de pirrotita (Estadío A) con parches esfalerita (+Fe) y algunos parches de pirita (Estadío B), relictos de la textura de piroxenos del Estadío Pre-A, primer estilo de mineralización.



Fotografía 13: Reemplazamiento de magnetita (Estadio Pre-A) por pirrotita (Estadio A), relictos de caliza laminada moderadamente cloritizada, segundo estilo de mineralización.



Fotografía 14: Masivo de esfalerita (+Fe) del Estadio B con finas venillas de carbonato de Fe-Mn del Estadio C, primer estilo de mineralización.



Fotografía 15: Venilla de siderita-esfalerita (-Fe)-marcasita (Estadio C) cortando masivo de esfalerita (+Fe – Estadio A) con parches de pirita (Estadio B), primer estilo de mineralización.



Fotografía 16: Masivo de esfalerita (+Fe) con parches de esfalerita (-Fe) y siderita rellenando oquedades, primer estilo de mineralización.



Fotografía 17: Bandas y diseminación de esfalerita en arenisca cuarzosa, poca pirita y carbonato Fe-Mn intergranular, segundo estilo de mineralización.



Fotografía 18: Venilla de esfalerita (+Fe) con cristales de cuarzo, carbonato Fe-M, y pirita, moderada diseminación de sulfuros en las cajas, segundo estilo de mineralización.



Fotografía 19: Reemplazamiento selectivo de esfalerita (+Fe) en brecha de caliza metasomatisada por carbonatos de Fe-Mn, segundo estilo de mineralización.



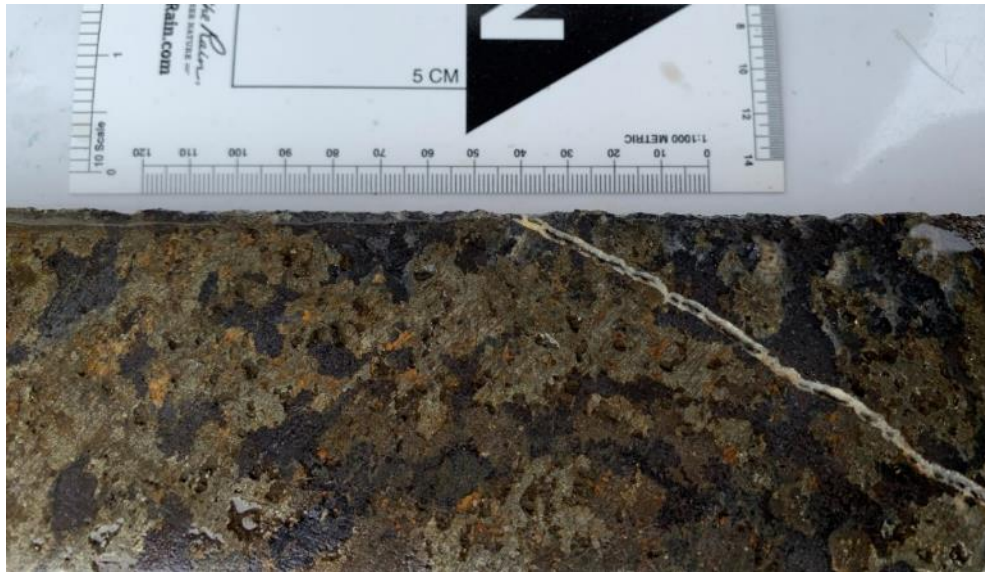
Fotografía 20:Diseminación de esfalerita (+Fe) en arenisca cuarzosa, segundo estilo de mineralización.



Fotografía 21: Estadío A, masivo de sulfuros con esfalerita y pirrotita, primer estilo de mineralización.



Fotografía 4: Sobreimposición de pirita sobre esfalerita (+Fe) y pirrotita, textura tipo vuggy, primer estilo de mineralización.



Fotografía 23: Masivo de pirita (Estadio B) con ligera textura vuggy remplazando a pirrotita y esfalerita +Fe (Estadio A), fina venilla de carbonato de Fe-Mn (Estadio C) cortando la mineralización previa, primer estilo de mineralización.



Fotografía 24: Bandas y disseminación de pirita con menor esfalerita, fina venilla de carbonato e intergranular en la arenisca, segundo estilo de mineralización.



Fotografía 25: Venilla de pirita (Estadio B) con halo gradacional de disseminación, segundo estilo de mineralización.



Fotografía 26: Estadio C, parches de esfalerita en zona de carbonatos complejos de color beige, pequeños parches de galena, segundo estilo de mineralización.



Fotografía 27: Brecha de caliza metasomatisada con parches de esfalerita (-Fe), segundo estilo de mineralización.



Fotografía 285: Caliza metasomatisada por carbonatos complejos Mn-Fe, fina disseminación de magnetita asociado a clorita, segundo estilo de mineralización.



Fotografía 6: Brecha de caliza, metasomatismo de carbonatos complejos Fe-Mn.



Fotografía 30: Masivo de esfalerita (-Fe) con carbonatos complejos de Fe-Mn, algunas zonas de moderada silisificación, primer estilo de mineralización.



Fotografía 31: Cara de una venilla de rodocrosita con pirita y algunos cristales de pirargirita, primer estilo de mineralización.



Fotografía 32: Venilleo de carbonato complejo blanco a planco pardusco, craquelando algunas zonas de la caliza, segundo estilo de mineralización.



Fotografía 337: Venilleo de carbonato blanco complejo de Mn-Fe en caliza brechada, segundo estilo de mineralización.



Fotografía 348: Venilleo de esfalerita (+Fe)-pirita en las filitas del Excelsior, algunos venilleos de cuarzo blanco metamórfico, segundo estilo de mineralización.