



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Geológica

**Evolución magmática hidrotermal del proyecto de oro –
Cobre Arcopunco, Huachocolpa – Huancavelica, Perú**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Geólogo

AUTOR

Ángelo Aníbal BALDOCEDA DIONISIO

ASESOR

Mg. José Andres YPARRAGUIRRE CALDERÓN

Lima, Perú

2025



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Baldoceda, Á. (2025). *Evolución magmática hidrotermal del proyecto de oro – Cobre Arcopunco, Huachocolpa – Huancavelica, Perú*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Geológica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Ángelo Aníbal Baldoceda Dionisio
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	72235717
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-4630-5040
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	José Andres Yparraguirre Calderón
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	10293400
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-9121-6282
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Pedro Antonio Olivares Ballena
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06085689
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Lourdes Janet Quiñones Lavado
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06798460
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Maximiana Rojas Campos
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06562198

Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.1.11. Recursos Mineros
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Silver X Mining
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Huancavelica Provincia: Huancavelica - Castrovirreyna Distrito: Huachocolpa – Santa Ana Latitud: -13.038603° Longitud: -75.039041°
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2022 – 2024
URL de disciplinas OCDE	Geología https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.06 Geoquímica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.04 Geociencias https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.01



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
Escuela Profesional de Ingeniería Geológica

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓLOGO**

En el salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, el jueves 04 de diciembre del año 2025 siendo las 7:00 pm, en presencia de los señores docentes designados como miembros de Jurado Calificador:

Ing. PEDRO ANTONIO OLIVARES BALLENA	(Presidente De Jurado)
Mg. LOURDES JANET QUIÑONES LAVADO	(Miembro de Jurado)
Ing. MAXIMIANA ROJAS CAMPOS	(Miembro de Jurado)

Reunidos para el acto académico público de colación de la Tesis del Bach. **ÁNGHELO ANÍBAL BALDOCEDA DIONISIO**, quien sustentará la Tesis titulada: **"EVOLUCIÓN MAGMÁTICA HIDROTHERMAL DEL PROYECTO DE ORO - COBRE ARCOPUNCO, HUACHOCOLPA - HUANCAMELICA, PERÚ"**; su asesor el docente **Mg. JOSÉ ANDRÉS YPARRAGUIRRE CALDERÓN**, para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Geólogo.

Los miembros del Jurado, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas:

A SATISFACCIÓN DEL JURADO

El Jurado procedió a la calificación, cuyo resultado fue:

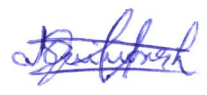
DIECISIETE (17)

Habiendo sido aprobada la sustentación de Tesis por el Jurado Calificador, el presidente recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, proponga se le otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓLOGO** al Bach. **ÁNGHELO ANÍBAL BALDOCEDA DIONISIO**

Siendo las 19:45 horas se dio por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (05) Actas originales de la Sustentación de la Tesis.

Lima, 04 de diciembre del 2025


ING. PEDRO ANTONIO OLIVARES BALLENA
PRESIDENTE DE JURADO


Mg. LOURDES JANET QUIÑONES LAVADO
MIEMBRO DE JURADO


Ing. MAXIMIANA ROJAS CAMPOS
MIEMBRO DE JURADO


Mg. JOSÉ ANDRÉS YPARRAGUIRRE CALDERÓN
MIEMBRO ASESOR



Anexo 1

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **José Andres Yparraguirre Calderón** en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen de la EP N° 000608-2025-D-FIGMMG de la tesis, cuyo título es **EVOLUCIÓN MAGMÁTICA-HIDROTERMAL DEL PROYECTO DE ORO – COBRE ARCOPUNCO, HUACHOCOLPA –HUANCAVELICA, PERÚ**, presentado por el bachiller **ÁNGHELO ANÍBAL BALDOCEDA DIONISIO** para optar el TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓLOGO.

CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 2% de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓLOGO.

Lima, 24 de octubre de 2025

Firma del Asesor

Nombres y Apellidos del asesor: **JOSÉ ANDRES YPARRAGUIRRE CALDERÓN**
DNI: 10293400

La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.

DEDICATORIA

A mis padres, Aníbal y Lesslie,

A Marianella, mi esposa, compañera de vida,

A Alejandro, mi hijo, la luz que renueva mis pasos.

AGRADECIMIENTOS

A mi alma mater, la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por brindarme una formación integral y por inculcarme el valor de la educación y de la profesión que hoy ejerzo con orgullo.

A la empresa Altitude Discoveries, por ser mi primera escuela de Geología en el ámbito laboral y por permitirme consolidar mis conocimientos en el campo.

Al Ing. Andrés Yparraguirre, por su constante orientación, seguimiento y apoyo durante el desarrollo de esta tesis.

A mi familia, especialmente a mi esposa y a mi hijo, por su apoyo incondicional, su paciencia y por ser la motivación permanente para alcanzar mis objetivos de vida.

RESUMEN

El proyecto Arcopunco es un depósito Pórfido de oro ubicado a 30km al sur de la ciudad de Huancavelica, Perú. Este sistema mineral forma parte de la franja metalogenética de epitermales de Au-Ag del Mioceno superior (XXI-A), relacionados con el sistema de fallas regional Chonta. Se encuentra hospedado en rocas volcánicas andesíticas de la Formación Apacheta, que están cortadas por múltiples stocks de composición intermedia a félsica. Uno de estos stocks fue intruido por al menos un pórfido intermineral en forma de dique. Múltiples campos de brechas freatomagmáticas e hidrotermales están asociadas con estos diques.

La mineralización porfirítica de oro y cobre, principalmente como calcopirita, está asociada a stockworks de vetillas de cuarzo gris oscuro, rodeada por una alteración de illita de composición fengítica (Mg, Fe). Sobreyaciendo a estas, ocurren vetillas de cuarzo-pirita que solamente contienen mineralización de oro.

Una fuerte sobreimposición de la alteración argílica avanzada de alunita-pirofilita-dickita forma una extensa capa arcillosa que enmascara el depósito. Este evento retrógrado se asocia con la mineralización epitermal de alta sulfuración de oro, cobre y molibdeno; que ocurre en vetillas de pirita-enargita y parches de *smear molybdenite* en fracturas.

Finalmente, la paragénesis de los eventos magmático-hidrotermales prógrados y retrógrados permiten definir un “*telescoping* o sobreimposición de eventos” del epitermal de alta sulfuración sobre el pórfido mineralizado.

Palabras clave: Arcopunco, pórfido de oro, sobreimposición de eventos, Huancavelica.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	4
LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABLAS.....	12
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	13
1.1. Planteamiento del problema	13
1.2. Formulación del problema.....	15
1.3. Objetivos.....	15
1.4. Variables	16
1.5. Hipótesis	16
1.6. Justificación del problema	16
1.7. Matriz de consistencia	18
CAPITULO 2: GENERALIDADES DE LA ZONA DE ESTUDIO	20
2.1. Ubicación y delimitación.....	20
2.2. Accesibilidad	20
2.3. Hidrografía.....	22
2.4. Clima	22
2.5. Geomorfología.....	22
CAPITULO 3: MARCO TEÓRICO.....	26
3.1. Antecedentes de la investigación.....	26
3.2. Bases teóricas	28
CAPITULO 4: CONTEXTO GEOLÓGICO.....	46
4.1. Magmatismo y vulcanismo del Cenozoico.....	46
4.2. Metalogenia	63
CAPITULO 5: METODOLOGÍA DEL ESTUDIO.....	69
5.1. Tipo y diseño de la investigación	69
5.2. Unidad de análisis.....	70
5.3. Población	70
5.4. Muestra	70
5.5. Cartografiado geológico	70
5.6. Geoquímica.....	71
5.7. Muestreo	71

5.8. Análisis de laboratorio	72
CAPITULO 6: RESULTADOS	75
6.1. Unidades litológicas	75
6.2. Alteración hidrotermal.....	83
6.3. Tipo de vetillas y mineralización.....	93
Geoquímica.....	101
6.4.....	101
CAPITULO 7: DISCUSIÓN	108
7.1. Alteración hidrotermal.....	108
7.2. Zonación geoquímica y estilos de mineralización.....	110
7.3. Cronología de los eventos magmático-hidrotermales	113
7.4. Modelo del depósito Arcopunco.....	116
CONCLUSIONES	121
RECOMENDACIONES	123
REFERENCIAS	124

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i>	Mapa de ubicación y accesibilidad del área de estudio.	21
<i>Figura 2.</i>	Franjas montañosas de Huancavelica, entre Huayraccasa y El Palomo, vista hacia el noroeste.	23
<i>Figura 3.</i>	Altiplanicie en el poblado de Pucapampa, vista hacia el oeste.	24
<i>Figura 4.</i>	Afluente en forma de “V” del poblado de Nueva Esperanza hacia el río Palccapampa, vista hacia el norte.	25
<i>Figura 5.</i>	Sección N-S con los componentes del lithocap del depósito de Au-Ag-Cu Pascua-Lama. Tomado de Hedenquist y Arribas (2022).	29
<i>Figura 6.</i>	Distribución de los principales depósitos epitermales de alta sulfuración en la región Circumpacífica. Datos de localización obtenidos de John et al. (2018).	31
<i>Figura 7.</i>	Esquema de la zonación de la alteración argílica avanzada y sus distintas génesis dentro del sistema porfirítico. Tomado de Hedenquist y Arribas (2022).	33
<i>Figura 8.</i>	Distribución global de las ocurrencias de los yacimientos y proyectos mineros con evidencias de texturas de alteración patchy-wormy.	35
<i>Figura 9.</i>	Fotografías de muestras de mano con texturas patchy-wormy. a-d: Textura wormy de pirofilita, alunita, topacio y caolinita, en una pasta microcristalina de sílice. Muestras de Oyu Tolgoi, Mongolia. e-f: Textura wormy y patchy de pirofilita y alunita, en una pasta microcristalina de sílice. Muestras de Kupfertal, distrito de Yanacocha, Perú. g-h: Textura patchy de alunita, pirofilita y diásporo, en una pasta microcristalina de sílice. Muestras de la Zanja, distrito de Yanacocha, Perú. Tomado de Jimenez (2017). Abreviaturas: Alu: alunita, Enar: enargita, Kao: caolinita, Pyro: pirofilita, Qz: cuarzo, Tz: topacio.	36
<i>Figura 10.</i>	Ubicación de los principales depósitos tipo pórfido ricos en oro. Datos obtenidos de Sillitoe (2000). Abreviaturas: BA: Bajo de la Alumbrera, C: Caspiche, CC: Cerro Casale, CCo: Cerro Corona, MC: Minas Conga, ML: Marte-Lobo y R: Refugio.	39
<i>Figura 11.</i>	Esquema del modelo descriptivo de un pórfido de oro. Tomado de Sillitoe (2000).	40
<i>Figura 12.</i>	Cronología esquemática de la secuencia típica de vetillas en (a) depósitos de pórfido Cu-Mo y (b) pórfido Cu-Au. Tomado de Sillitoe (2010)	42

- Figura 13.* Columna estratigráfica de los distritos mineros de Huachocolpa, Huancavelica y Castrovirreyna. 49
- Figura 14.* Mapa tectono-estratigráfico mostrando los bloques de Castrovirreyna y Huancavelica – Huachocolpa y sus eventos volcánicos. Abreviaturas: SFC: Sistema de fallas Chonta, SFHH: Sistema de fallas Huancavelica – Huachocolpa. 50
- Figura 15.* Brechas piroclásticas sobreyacidas por un domo andesítico, inmediaciones de la Unidad Minera Tangana. Vista hacia el norte. 55
- Figura 16.* Afloramiento de brecha piroclástica, inmediaciones de Tinquicorral. 56
- Figura 17.* Domos traquiandesíticos en el sector entre Palccahuaycco y Chosecc. A y B: afloramientos de domo traquiandesítico con flow banding moderadamente inclinado. C: muestra de mano de un domo traquiandesítico con fenocristales de feldespatos moderadamente carbonatizados. D: Traquiandesita porfirítica con fenocristales de feldespatos en una pasta microcristalina. 57
- Figura 18.* Afloramiento de lavas andesíticas (and-px) y tobas de cristales (tb-cx) intercaladas, alrededores de la mina Esperanza. 59
- Figura 19.* Diferentes ocurrencias de las unidades ígneas ricas en biotita. A: Dique cuarzo-latítico rico en biotita, inmediaciones de la UM Tangana, Recuperada. B y C: Domo dacítico con textura porfirítica y fenocristales de plagioclasas, sanidina y biotitas, alrededores de la mina María Luz. D y E: Brecha polimíctica estratificada con líticos, cristales rotos y ojos de cuarzo, norte de Tangana. 62
- Figura 20.* Mapa de las franjas metalogenéticas de los depósitos epitermales de baja, intermedia y alta sulfuración del Mioceno. 63
- Figura 21.* Mapa estructural con los principales sistemas de vetas asociados a la falla Chonta (NO-SE) y Huancavelica-Huachocolpa (N-S). Se muestra el dato radiométrico en letra negra. 67
- Figura 22.* Mapa geológico de Arcopunco. Se muestran los sondeos realizados por BVN (1997) y Altitude Discoveries (2021). 76
- Figura 23.* Sección longitudinal litológica A-A' del sondeo DDH-ARC-2021-001 (Fuente: Carlos Saban). 77
- Figura 24.* Afloramiento del principal cluster de brecha hidrotermal explorado en Arcopunco. A: brecha hidrotermal monomíctica con clastos angulosos de sílice gris, en un cemento de alunita rosada con abundantes parches de pararejalgar. B: Andesita porfirítica obliterada con textura patchy-wormy. C:

Andesita porfírica obliterada con fuerte alteración argílica, cortada por vetillas de cuarzo-pirita. 78

Figura 25. Fotomicrografías del pórfido diorítico intermineral del sondaje DDH-ARC-2021-001. LT: luz transmitida, N//: nícoles paralelos, NX: nícoles cruzados. 79

Figura 26. Dique diorítico intermineral con clastos redondeados de un pórfido temprano(?) que tiene vetillas tipo “AB” con sutura de pirita-calcopirita. 80

Figura 27. Muestras de sondajes de brechas hidrotermales y freatomagmáticas. A: brecha hidrotermal monomíctica con clastos subangulosos silicificados, cemento de alunita con oquedades de lixiviación de sulfuros, zona de óxidos. B: brecha hidrotermal monomíctica con cemento de alunita-sílice con pararejalgar en los intersticios. C: brecha freatomagmática polimíctica con clastos subangulosos a subredondeados, matriz de polvo de roca gris. D: tufisita de polvo de roca gris oscuro a verde oliva oscuro con estructura interna de laminaciones. 82

Figura 28. Mapa de alteración hidrotermal de Arcopunco y vetas. Se muestran los sondajes realizados por BVN (1997) y Altitude Discoveries (2021). 84

Figura 29. Sección longitudinal A-A’ de la alteración hidrotermal del sondaje DDH-ARC-2021-001 (Fuente: Carlos Saban). 85

Figura 30. Cuarzo residual vuggy localmente desarrollada en feeders de la alteración argílica avanzada, con protolito de andesita porfírica. Las oquedades están parcialmente rellenas con pararejalgar y se observan remanentes de vetillas de cuarzo lixiviadas. 87

Figura 31. Andesita porfírica con fuerte alteración argílica, vetillas de pirita y halos de sílice-illita gris obliterando la textura original de la roca. 88

Figura 32. Pórfido intermineral con alteración argílica intermedia, vetillas de yeso con halos de illita fengítica. Caolinita distal. Ill-phen: illita fengítica, kao: caolinita, plg: plagioclasa, gy: yeso 89

Figura 33. Muestra de sondaje con texturas de alteración patchy y wormy. A y B: textura patchy y wormy de alunita Na y dickita, cortada por vetillas tipo “C” de sulfuros lixiviados y reemplazados por óxidos de hierro. C y D: textura patchy y wormy de alunita K con oquedades de lixiviación rellenas parcialmente con pararejalgar. E: textura wormy de alunita K y dickita. F: Textura patchy de alunita K y pirofilita con aspecto brechoso, cortado por vetillas tipo “C” de pirita. G: textura wormy y patchy de alunita K, pirofilita y pirita; cortada por moderado vetilleo tipo “C” de pirita. H: textura patchy de alunita Na, caolinita y pirita, con remanentes estables de vetillas tipo “A1” de cuarzo-

magnetita. Abreviaturas: alnK: alunita potásica, alnNa: alunita sódica, dk: dickita, prf: pirofilita, py: pirita y sfs: sulfuros. 91

Figura 34. Sección longitudinal A-A' de texturas de alteración del sondaje DDH-ARC-2021-001 (Fuente: Carlos Saban). 92

Figura 35. Muestras de sondaje de vetillas tempranas. A: Relaciones de corte entre vetillas del tipo “EB”, “EBT” y “A” en el pórfido intermineral. B: Stockwork de cuarzo-magnetita tipo “A1” con mineralización de Au-Cu, cortada por vetilla de cuarzo tipo “A” con bajo contenido metálico. C: Vetillas de cuarzo-magnetita tipo “A1” con bordes lixiviados y sobreimpuesta por la alteración argílica avanzada. D: Vetilla de anhidrita con bordes de yeso. 94

Figura 36. Fotomicrografías de calcopirita aurífera del DDH-ARC-2021-001. A la derecha, pirita cúbica formada a partir de la calcopirita. A la izquierda, pirita anhedral. cpy: calcopirita, py: pirita. LR: luz reflejada. 95

Figura 37. Tramos de sondaje ricos en molibdenita. A: Remanentes de cristales de molibdenita hipógena parcialmente lixiviada por silicificación. B: Venilla milimétrica de molibdenita con una alteración de sílice-arcillas-pirita sobreimpuesta. C: Vetilla tipo “AB” con mineralización de molibdenita-calcopirita-pirita. Abreviaturas: cpy: calcopirita, Mo: molibdenita, Py: pirita y mb: mica blanca. 96

Figura 38. Fotomicrografías de molibdenita hipógena del DDH-ARC-2021-001. A la derecha se observa el mineral con hábito hojoso. A la izquierda, se presenta como hebras. LR: luz reflejada, mo: molibdenita, py: pirita. 96

Figura 39. Muestras de sondaje de vetillas de cuarzo bandeado A. Vetilla de cuarzo con sutura de pirita y bordes de sílice, ligeramente ondulada, cortando vetillas de cuarzo tempranas. B. Vetilla de cuarzo con pirita y bordes de sílice, cortando vetilla de pirita y cortada por venilla de sílice gris. 97

Figura 40. Muestras de sondaje de vetillas de pirita con enargita. A. Vetilla de pirita tipo “C” con enargita de grano fino en sus bordes. B. Venillas finas de pirita tipo “C” cortadas por vetillas paralelas de pirita-enargita-carbonato tipo “E”. C. Vetillas de pirita-enargita cortadas por local venilleo de pirita con bordes de covelina e inyección de carbonato-pirita-enargita tipo “E”. 99

Figura 41. Fotomicrografías de enargita de los sondajes históricos de BVN. A la derecha, vetilla de pirita tipo “C” reemplazada por enargita con trazas de esfalerita. A la izquierda, cristales de enargita asociados a pirita y rutilo (elipses verdes). LR: luz reflejada. en: enargita, ef: esfalerita, py: pirita. Tomado de Canepa (2012). 100

Figura 42. Muestra de sondaje con smear molybdenite en fracturas. 100

- Figura 43.* Gráficos boxplot de elementos volátiles (Hg, As, Sb y Bi) de los ensambles de alteración hidrotermal de Arcopunco. Eje X en escala logarítmica. alnNa: alunita Na, alnNa/K: alunita Na/K, dk: dickita, ill: illita K, illfeng: illita fengítica, mont: kao: caolinita, montmorillonita, prf: pirofilita, 104
- Figura 44.* Gráfico de dispersión de Au, Cu y As, mostrando las tendencias de los tres estilos de mineralización de Arcopunco. Los valores de As continúan sobre los 1000 ppm. 105
- Figura 45.* Gráficos boxplot de elementos metálicos (Au, Cu y Mo) de los ensambles de alteración hidrotermal de Arcopunco. Eje X en escala logarítmica. alnNa: alunita Na, alnNa/K: alunita Na/K, dk: dickita, ill: illita K, illfeng: illita fengítica, mont: kao: caolinita, montmorillonita, prf: pirofilita, 106
- Figura 46.* Gráficos boxplot de elementos mayores (Al, Ca, K, Mg y Na) de los ensambles de alteración hidrotermal de Arcopunco. Eje X en escala logarítmica. alnNa: alunita Na, alnNa/K: alunita Na/K, dk: dickita, ill: illita K, illfeng: illita fengítica, mont: kao: caolinita, montmorillonita, prf: pirofilita, 107
- Figura 47.* Sección longitudinal A-A' con las zonas de mineralización del sondaje DDH-ARC-2021-001 e históricos de BVN. Se muestra la distribución geoquímica del Au, Cu, As y elementos trazas importantes en la zonación de los sistemas pórfido y epitermal. 112
- Figura 48.* Cuadro modificado de alteraciones hidrotermales de Corbett y Leach (1998). Se muestra la evolución magmático-hidrotermal de Arcopunco. En la tabla 3 se hace referencia a la numeración de los eventos. 115
- Figura 49.* Diagrama espacio-tiempo de un sistema magmático-hidrotermal tipo pórfido-epitermal. Tomado de Gustafson et al. (2004). 117
- Figura 50.* Diagrama de profundidad-presión con las gradientes de presión correspondientes en la evolución de un sistema magmático-hidrotermal. Se muestran plotados los datos obtenidos por Muntean y Einaudi (2000) de las vetillas de los pórfidos de oro de la franja Maricunga. Abreviaturas, mt: magnetita y qz: cuarzo 118
- Figura 51.* Esquema de las profundidades de emplazamiento del espectro de los depósitos tipo pórfido. Tomado de Sillitoe (2017). 119

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. *Matriz de consistencia de la investigación.*

Tabla 2. *Datos geocronológicos recopilados para el estudio.*

Tabla 3. *Resumen de los evento hidrotermales del proyecto Arcopunco.*

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

La región de Huancavelica ha sido históricamente reconocida por su potencial minero, albergando importantes distritos como, por ejemplo, Santa Bárbara -el tercer yacimiento de mercurio más grande del mundo-, Castrovirreyna -mina polimetálica explotada desde la época colonial, Huachocolpa -minas Caudalosa Chica y Recuperada- y Julcani. Tradicionalmente, la actividad minera en esta región se ha centrado en la explotación de vetas de Ag-Pb-Zn en sistemas hipotermales, mesotermales y epitermales de intermedia sulfuración.

No obstante, el descubrimiento del proyecto Picomachay en 1995, un epitermal de alta sulfuración con mineralización de oro, reveló el potencial minero para la existencia de otros sistemas minerales más complejos en la región. Este hallazgo, junto con el desarrollo de otros proyectos de la misma tipología como Corihuarmi, Bethania y Minasnioc, ha motivado el interés de las empresas juniors y mineras por explorar yacimientos de oro en epitermales de alta sulfuración y pórfidos de cobre.

Uno de estos casos es el proyecto Arcopunco, que comprende una extensa zona de alteración argílica avanzada de alunita-dickita-pirofilita asociada a centros volcánicos de la Formación Apacheta. Fue inicialmente explorado por Compañía de Minas Buenaventura SAA en 1997-1998, quienes se enfocaron en la búsqueda de mineralización aurífera en la zona de óxidos. Conceptualizaron el proyecto como un epitermal de alta sulfuración con mineralización alojada en brechas hidrotermales silicificadas con leyes de hasta 1.7 g/t de oro. No obstante, las perforaciones permitieron evidenciar texturas tipo “gusano” (Vidal et al. 1997), con las mismas características que habían sido vistas en Tantahuatay 2 (Tosdal 1996 en Noble et al. 2011), que fueron entendidas como parte

transicional entre los sistemas epitermales y pórfidos, abriendo la posibilidad de encontrar mineralización de cobre en profundidad. Los resultados obtenidos (3.1 MT @ 0.4 g/t Au) no fueron considerados económicamente viables en su momento, y la compañía abandonó el proyecto sin investigar a mayores profundidades.

Abierta la posibilidad de encontrar un pórfido a profundidad, Braeval Mining Corp. adquirió el proyecto y realizó una serie de estudios técnicos internos, entre los que destaca el informe de Richard Sillitoe, quien propuso la existencia de un pórfido de oro “telescopado” similar a los sistemas de la franja Maricunga en Chile (Muntean y Einaudi, 2001). Otros enfoques por especialistas como Rubén Padilla, Alberto Ríos, y por empresas como Rio Tinto y Antofagasta PLC, sugirieron un sistema pórfido-epitermal con mineralización profunda de Au-Cu-Mo debajo de un lithocap; mientras que algunos geólogos lo consideran como la raíz de un epitermal de alta sulfuración erosionado.

A pesar de estas propuestas, el proyecto Arcopunco no ha sido objeto de una reinterpretación por falta de perforación profunda y análisis integrales de geoquímica y espectroscopía infrarroja que permitan definir con certeza el sistema mineral al cual corresponde. Esta incertidumbre ha generado un vacío técnico en una zona de gran interés económico. En consecuencia, persiste la problemática de no contar con un modelo geológico actualizado y validado que oriente futuras estrategias de exploración en el proyecto.

Por ello, la presente tesis se propone a reinterpretar el sistema mineralizante del proyecto Arcopunco, integrando la información histórica y actual para establecer si se trata de un sistema epitermal de alta sulfuración erosionado, un sistema transicional epitermal-pórfido o un pórfido de oro “telescopado”. Esta reinterpretación permitirá entender la metalogenia y contribuirá a optimizar los criterios de exploración en distritos mineros con características similares dentro de los Andes centrales sur.

1.2. Formulación del problema

La presente investigación buscar resolver las siguientes interrogantes:

1.2.1. Problema General

- En base a las características litológicas, hidrotermales y geoquímicas del proyecto Arcopunco, ¿a qué tipo de yacimiento corresponde, y cuál ha sido su evolución magmática-hidrotermal?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cuáles son las unidades litológicas que forman parte del sistema mineral del proyecto Arcopunco?
- ¿Cuáles son los tipos de alteración hidrotermal y estilos de mineralización del proyecto Arcopunco?
- ¿Cuál es la dispersión geoquímica primaria de los elementos metálicos y volátiles en el proyecto Arcopunco?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Principal

- Determinar el tipo de yacimiento al que corresponde el proyecto Arcopunco y su evolución magmática-hidrotermal, en base a sus características litológicas, hidrotermales y geoquímicas.

1.3.2. Objetivos Secundarios

- Determinar qué unidades litológicas forman parte del sistema mineral del proyecto Arcopunco.
- Definir las alteraciones hidrotermales y los estilos de mineralización del proyecto Arcopunco.

- Determinar la dispersión geoquímica primaria de los elementos metálicos y volátiles en el proyecto Arcopunco.

1.4. Variables

1.4.1. Variable independiente

- Unidades litológicas
- Mineralogía de alteración hidrotermal.
- Mineralogía de menas y vetillas.
- Concentraciones geoquímicas de los metales y volátiles.

1.4.2. Variable dependiente

- Temporalidad de las unidades litológicas.
- Tipos de alteración hidrotermal.
- Estilos de mineralización.
- Dispersión geoquímica primaria.
- Sistema mineralizante

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis principal

- La reinterpretación de la evolución magmática-hidrotermal del proyecto Arcopunco, en base a sus características litológicas, hidrotermales y geoquímicas, sugiere que este podría tratarse de un sistema mineral tipo pórfido de oro.

1.6. Justificación del problema

En las últimas décadas, la exploración mineral de sistemas epitermales y porfiríticos de Au-Cu se ha centrado en la identificación de anomalías de alteración, que a menudo se manifiestan en superficie a manera de extensas zonas de argilizadas que cubren u hospedan la mineralización; por ejemplo, Yanacocha en Perú (Gustafson et al. 2004),

Caspiche en Chile (Sillitoe et al. 2013), Bajo de la Alumbrera en Argentina (Guilbert, 1995), Tanamá en Puerto Rico (Cox, 1985), Lepanto y Far-Southeast en Filipinas (Hedenquist et al. 1998), Oyu Tolgoi en Mongolia (Khashgerel et al. 2009) y Grasberg en Indonesia (MacDonald y Arnold, 1994). Por esta razón el estudio de estos tipos de depósitos minerales ha sido de mucha importancia para la actividad exploratoria y tipificarlos de manera adecuada llevará a cabo exitosos programas de exploración.

En Arcopunco, la presencia notable de una alteración argílica avanzada, detectada a través de imágenes satelitales, sugirió su potencial para hospedar mineralización de oro en un ambiente epitermal de alta sulfuración, similar a lo observado en la zona norte del Perú, en el yacimiento Yanacocha. Durante las perforaciones realizadas por BVN en los años 1997-98, se encontraron texturas tipo “gusano” (Vidal et al. 1997), como las vistas en Tantahuatay 2 (Tosdal 1996 en Noble et al. 2011) indicando la transición del sistema epitermal al pórfido de cobre en profundidad. Debido a que los sondeos realizados por BVN interceptaron algunas zonas porfiríticas sin alteración obliterante, la exploración en profundidad fue detenida.

El equipo de exploraciones de la compañía Altitude Discoveries desarrolló un programa de exploración que buscaba confirmar el tipo de yacimiento y determinar su potencial mineral a una mayor profundidad. De esta manera, la reconceptualización de Arcopunco fue de una manera distinta a lo que se realizó con anterioridad.

A pesar de que la región Huancavelica es un antiguo distrito minero enfocado a una mineralización polimetálica en sistemas hipotermales, mesotermales y epitermales de intermedia a baja sulfuración, varios prospectos de alta sulfuración han sido considerados (Noble et al. 1999), y los descubrimientos de Picomachay, Corihuarmi, Bethania y Minasnioc, dieron soporte a esto. Sin embargo, estos sistemas epitermales podrían también estar relacionados a pórfidos de Cu y Au-Cu tal como se encontró en los distritos

de Yanacocha y Cerro Corona; o corresponder solamente a pórfidos de Au, como Minas Conga y la franja Maricunga; lo cual, es el planteamiento de hipótesis de la presente tesis.

1.7. Matriz de consistencia

Esta herramienta, empleada para establecer relaciones entre los diferentes elementos de la presente investigación, muestra la concordancia entre estos, lo que garantiza que la planificación y organización del estudio dirijan a la obtención efectiva de los resultados esperados (Tabla 1).

Tabla 1. Matriz de consistencia de la investigación.

“EVOLUCIÓN DEL SISTEMA MAGMÁTICO-HIDROTHERMAL DEL PROYECTO ARCOPUNCO, HUACHOCOLPA-HUANCAVELICA, PERÚ”			
PROBLEMAS DE LA INVESTIGACIÓN	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS	VARIABLES
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	
En base a las características litológicas, hidrotermales y geoquímicas del proyecto Arcopunco, ¿a qué tipo de yacimiento corresponde, y cuál ha sido su evolución magmática-hidrotermal?	Determinar el tipo de yacimiento al que corresponde el proyecto Arcopunco y su evolución magmática-hidrotermal, en base a sus características litológicas, hidrotermales y geoquímicas.	La reinterpretación de la evolución magmático-hidrotermal del proyecto Arcopunco, en base a sus características litológicas, hidrotermales y geoquímicas, sugiere que este podría tratarse de un sistema tipo pórfido de oro.	• Variable independiente - Unidades litológicas - Mineralogía de alteración hidrotermal. - Mineralogía de menas y vetillas - Concentraciones geoquímicas de metales y volátiles. • Variable dependiente - Temporalidad de las unidades litológicas. - Tipos de alteración hidrotermal. - Estilos de mineralización. - Dispersión geoquímica primaria. - Sistema mineralizante.
Problemas específicos	Objetivos específicos		
¿Cuáles son las unidades litológicas que forman parte del sistema mineral del proyecto Arcopunco?	Determinar qué unidades litológicas forman parte del sistema mineral del proyecto Arcopunco.		
¿Cuáles son los tipos de alteración hidrotermal y estilos de mineralización del proyecto Arcopunco?	Definir las alteraciones hidrotermales y los estilos de mineralización del proyecto Arcopunco.		
¿Cuál es la dispersión geoquímica primaria de los elementos metálicos y volátiles en el proyecto Arcopunco?	Determinar la dispersión geoquímica primaria de los elementos metálicos y volátiles en el proyecto Arcopunco.		

CAPITULO 2: GENERALIDADES DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1. Ubicación y delimitación

La zona de estudio se encuentra ubicada en la región centro-sur del Perú y está comprendida en un sistema WGS84 18S entre las coordenadas proyectadas 8°540,000N a 8°575,000N y 480,000E a 520,000E (Figura 1). Abarca la zona NE del cuadrángulo de Castrovirreyna (hoja 27m). El proyecto se encuentra a una altitud entre los 5,100 a 3,500 m.s.n.m.

De acuerdo con la división política del país, el proyecto Arcopunco se encuentra en la región Huancavelica, en el límite de las provincias de Huancavelica y Castrovirreyna, en los distritos de Huachocolpa y Santa Ana, respectivamente.

2.2. Accesibilidad

El acceso a la zona de estudio se logra desde la ciudad de Lima, por vía terrestre, siguiendo la Carretera Panamericana Sur hasta la ciudad de Pisco, y luego, por la carretera Libertadores hasta el poblado de Rumichaca. En este poblado existe un desvío de carretera asfaltada hacia el pueblo Santa Inés, seguido de otro desvío asfaltado hacia el Abra de Chonta, lugar desde donde se toma una carretera afirmada directa hacia el proyecto Arcopunco (Figura 1).

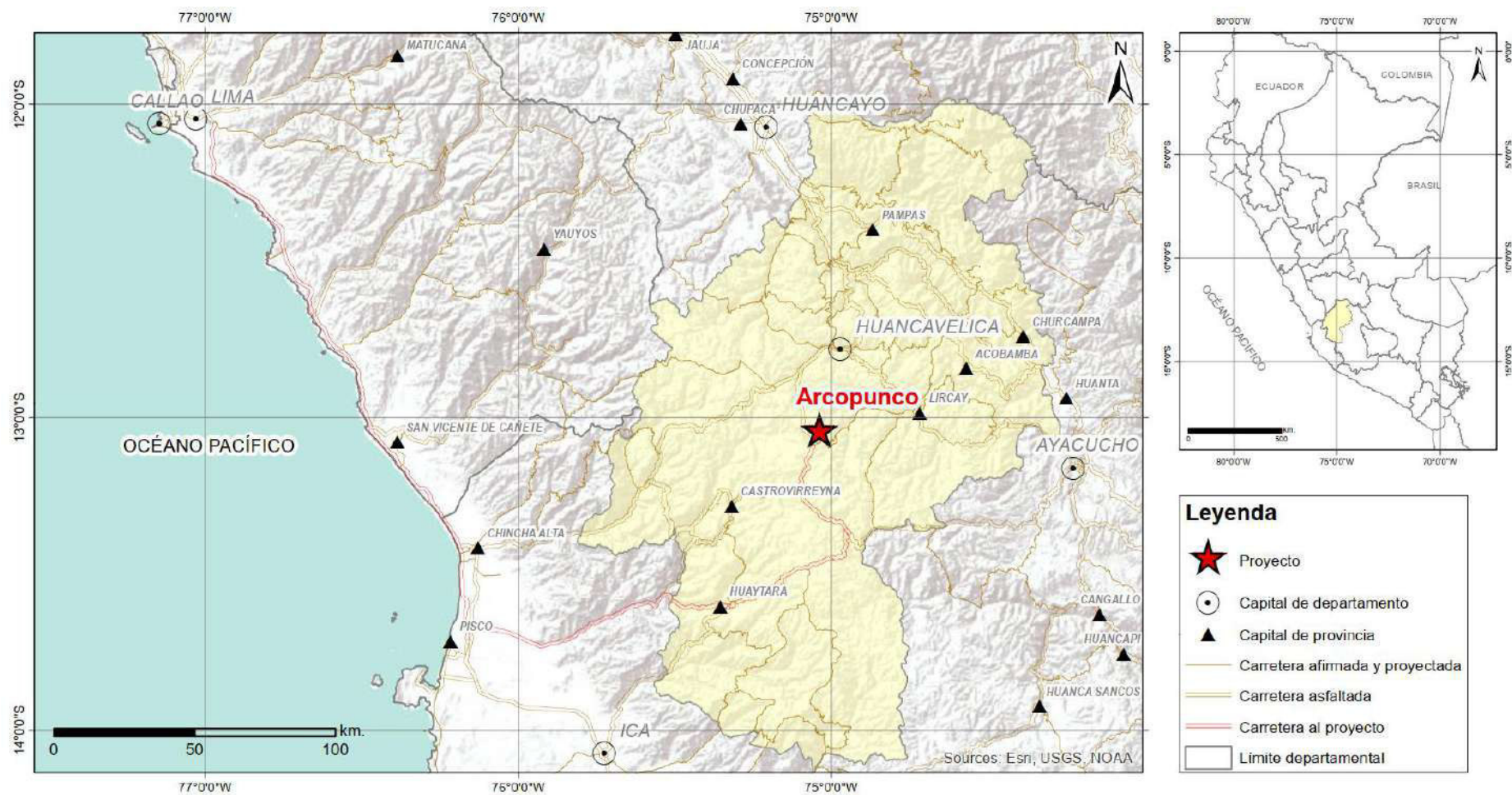


Figura 1. Mapa de ubicación y accesibilidad del área de estudio.

2.3. Hidrografía

En el área de estudio el río Pucapampa tiene el mayor curso fluvial y desemboca en el Océano Atlántico. Su nacimiento se ubica en el abra de Chonta y posee un recorrido sinuoso en una extensa llanura aluvial que se extiende hasta Plazapata. En conjunto con sus afluentes el río Pucapampa tiene un drenaje de tipo dendrítico.

2.4. Clima

De acuerdo con la elevación topográfica de la zona, el clima es generalmente frío con temperaturas que bajan hasta los 2°C. Existen zonas montañosas entre los 4800 a 5100 m.s.n.m que constituyen nevados donde la temperatura desciende por debajo de los 0°C.

Se presentan dos temporadas climáticas características. Entre los meses de diciembre – abril, las precipitaciones pluviales son copiosas y están acompañadas de tormentas eléctricas; mientras que, en los meses de mayo – noviembre, el tiempo es despejado con escasas lluvias, sequías, fuertes heladas y vientos de gran velocidad.

2.5. Geomorfología

El modelado del relieve actual de la zona de estudio fue influenciado por los eventos tectónicos, volcánicos y de geodinámica externa; así como, las propiedades físicas y químicas de las distintas litologías. Se han identificado cinco unidades geomorfológicas en los alrededores de la zona de estudio.

2.5.1. Montañas (cordilleras)

Esta unidad está conformada por cadenas montañosas escarpadas que tienen cotas desde 4800 m a 5100 m de altitud. Esta geoforma está principalmente asociada a rocas ígneas subvolcánicas que están afectadas por procesos de alteración hidrotermal. Los principales picos montañosos son el nevado Carhuarazo (5180m.) y los cerros El Palomo (5150m.),

Pucapunta (5120m.), Huayraccasa (4950m., figura 2), Arcopunco (5092m.) y Tangana (5050m.).



Figura 2. Franjas montañosas de Huancavelica, entre Huayraccasa y El Palomo, vista hacia el noroeste.

2.5.2. Altiplanicies

Esta unidad se encuentra por encima de los 4300 m de altitud y se caracteriza por relieves suaves constituidos por extensas pampas, colinas y cerros que no exceden los 300 m de altura. Esta geoforma está principalmente asociada a tobas y toba-brechas con intercalaciones de cenizas, en las cuales su matriz deleznable permite su fácil erosión. Las principales altiplanicies se ubican en los alrededores de los poblados de Pucapampa (Figura 5), Santa Ana y Astohuaraca.

2.5.3. Laderas

Estas geoformas constituyen los declives inmediatos a las cadenas montañosas y también los flancos de los valles fluviales. Sus pendientes son diversas variando desde 30° a 70° lo cual está generalmente influenciado por la litología (Figura 3).

Las laderas en montañas de rocas ígneas tienen pendientes que varían de 30° a 60° y, en algunos casos, cuando los cuerpos subvolcánicos están dispuestos subhorizontalmente se forman acantilados con laderas muy empinadas (~70°).



Figura 3. Altiplanicie en el poblado de Pucapampa, vista hacia el oeste.

2.5.4. Valles fluviales y glaciales

Esta unidad se caracteriza por tener un relieve negativo y formas de “V” para valles fluviales y de “U” en el caso de los glaciales. El río Pucapampa – Astobamba es un extenso y amplio valle generado por la erosión glacial de las cadenas montañosas adyacentes. El río Palccapampa, que tiene su curso al lado del poblado Huachocolpa; junto con sus afluentes forman valles fluviales en “V” con altitudes entre 3650 m a 4200 m (Figura 4).



Figura 4. Afluente en forma de “V” del poblado de Nueva Esperanza hacia el río Palccapampa, vista hacia el norte.

CAPITULO 3: MARCO TEÓRICO

3.1. Antecedentes de la investigación

Los primeros trabajos de reconocimiento mineral en la zona centro sur del Perú fueron realizados por el Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEM, 1971) que identificó a Arcopunco como un prospecto de cobre, pero sin información adicional con respecto a su mineralización.

Posteriormente, BVN tomó el proyecto y realizó trabajos de exploración entre los años 1997-98, mediante los cuales, pudo definir que Arcopunco era un sistema epitermal de alta sulfuración con mineralización de oro. Realizó una campaña de perforación diamantina de 3,581 metros, en 14 sondajes, que tuvo como objetivo la zona central del proyecto constituida de brechas hidrotermales silicificadas con leyes de hasta 1.7g/t de oro. Debido al enfoque de interceptos a corto alcance, los sondajes no profundizaron a más de 300 metros por debajo de la superficie. Los resultados obtenidos fueron de 3.1MT @ 0.4 g/t Au, que no fueron económicamente rentables en la década de los años noventa. Adicionalmente, Vidal et al. (1997) evidenciaron texturas tipo “gusano” con características similares a las reportadas en Tantahuatay 2 (Tosdal 1996 en Noble et al. 2011) pero, dada a la profundidad de su ocurrencia, explorar para un objetivo de pórfido por debajo de estas no fue favorable.

En el año 2012, el proyecto fue tomado por Braeval Mining Corp., quien llevó a cabo un programa de muestreo de roca y relagueos de 10 de los 14 sondajes diamantinos anteriormente ejecutados por BVN. Para Braeval, Arcopunco era la raíz de un *lithocap* que contenía mineralización de oro en un epitermal de alta sulfuración sobreimpuesto a un *stockwork* de un centro porfirítico de cobre (Redwood, 2013). Durante este tiempo, se realizaron una serie de visitas técnicas; entre las más importantes está la de Richard

Sillitoe, quien propuso un pórfido de oro “telescopado” que podría ser similar a los sistemas porfiríticos ricos en oro de la franja Maricunga. Por otro lado, Rubén Padilla y Alberto Ríos dieron soporte a la idea de un sistema pórfido-epitermal “telescopado” con mineralización de Au-Cu-Mo en profundidad. En consecuencia, decidieron realizar dos fases de exploración. La primera, consistía en trabajos de magnetometría y polarización inducida para mapear la alteración destructora de magnetita y la posible ocurrencia de este mineral asociada a un pórfido de cobre; así como, definir los sulfuros y disseminados en profundidad. La segunda, era un programa de perforación de 7000 metros en 10 sondajes con objetivo a un pórfido de cobre. Lamentablemente, ninguno de estos programas de exploración se llevó a cabo porque Braeval abandonó sus proyectos en Huancavelica por externalidades y no se pudo confirmar la existencia de un pórfido en profundidad.

Desde el año 2021 hasta la actualidad Altitude Discoveries tiene el proyecto bajo un acuerdo con los propietarios de las concesiones. Su objetivo es evaluar la existencia de uno o varios focos porfiríticos con mineralización de oro. Para ello realizó un programa de exploración que consistió en una cartografía geológica a escala 1:5000, relogueo de los 14 sondajes históricos de BVN, reinterpretación de la geoquímica histórica de superficie de BVN y Braeval, y ensayos de espectroscopía de luz infrarroja de onda corta a todos los taladros históricos del proyecto. Por último, con la finalidad de evaluar el potencial en profundidad, se ejecutó un único sondaje diamantino de 852.50 metros que cuenta con información geoquímica y de espectroscopía de luz infrarroja de onda corta del taladro completo.

3.2. Bases teóricas

3.2.1. *Lithocaps*

Un *lithocap* es un horizonte litológico permeable con una fuerte alteración de cuarzo residual rodeada por ensambles mineralógicos de argílica avanzada hipógena (Sillitoe, 1995) y un *steam heated* en sus partes más someras (Figura 5). Se forma a partir de fluidos ácidos magmáticos-hidrotermales que se condensan dentro de la zona freática e interactúan con las aguas meteóricas (Hedenquist y Taran, 2013, Hedenquist y Arribas, 2022).

Las zonas de cuarzo residual, típicamente con textura oquerosa (*vuggy silica*), son generadas por la removilización de aluminio a un pH suficientemente bajo como para inhibir la formación de alunita (Stoffregen, 1987). Esta última conforma la alteración argílica avanzada hipógena con zonaciones de alunita a dickita y raíces de pirofilita (Cooke et al, 2017; Hedenquist y Arribas, 2022). La mineralización es comúnmente hospedada en la *vuggy silica* debido a su relativa alta permeabilidad primaria (ej., Iwato en Nansatsu; Izawa and Cuningham, 1989; Yanacocha; Teal y Benavides, 2010).

En las partes más someras del *lithocap*, cercanas a la superficie, se forma el *steam heated*, que es una alteración argílica avanzada de aspecto pulverulento, de baja temperatura y formada en la zona vadosa por encima del nivel freático de las aguas subterráneas (Sillitoe 2015). El fluido hidrotermal original es un vapor con contenido de H₂S y CO₂, en el cual el gas de azufre se condensa en la zona vadosa, se oxida y genera ácido sulfúrico que aporta la acidez al medio (Hedenquist y Arribas, 2022) para la formación de las capas de caolinita, alunita, ópalo y calcedonia.

El interés en los *lithocaps* se basa en su potencial de hospedar una mineralización de estilo epitermal de alta sulfuración; por ejemplo, Pascua-Lama, Chile y Argentina (Chouinard et al, 2005), o ser estériles y estar sobreimpresos a una mineralización de pórfido como

en Perol, Perú (Hedenquist y Arribas, 2022). Por ello, se destaca que estos horizontes de alteración argílica avanzada tienen una relación espacial, temporal y genética con los depósitos epitermales de alta sulfuración y pórfidos.

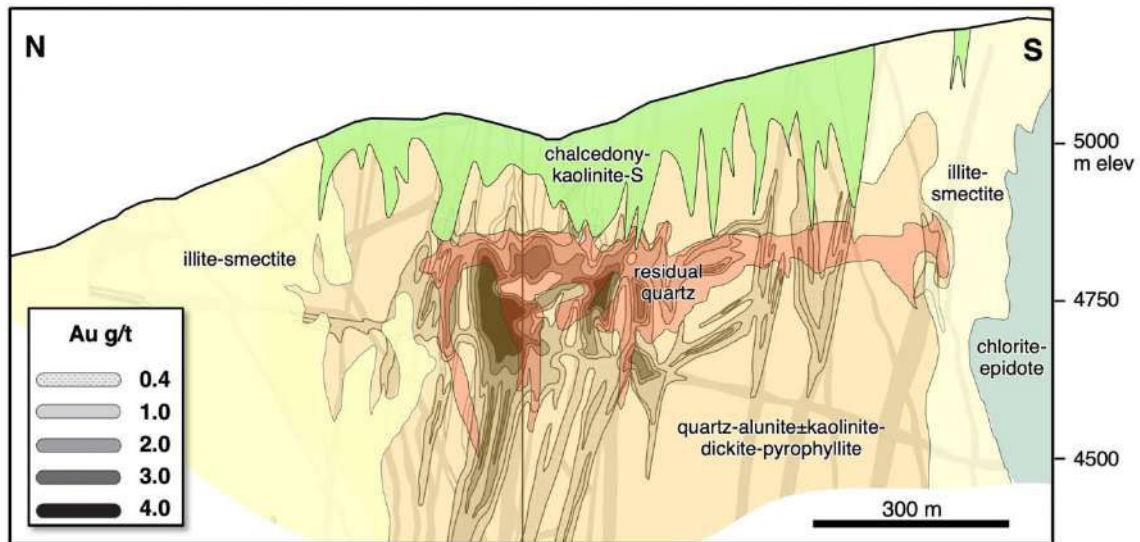


Figura 5. Sección N-S con los componentes del lithocap del depósito de Au-Ag-Cu Pascua-Lama. Tomado de Hedenquist y Arribas (2022).

3.2.2. *Epitermales de alta sulfuración*

Los depósitos epitermales de alta sulfuración (HS, por sus siglas en inglés) han sido el principal blanco exploratorio por mineralización de oro en todo el mundo. Su distribución es correspondiente con las grandes franjas porfiríticas en el cinturón Circumpacífico (Figura 6) y, por su relevancia como dotador de metales preciosos, se han realizado diversos estudios para definir su génesis (Arribas, 1995; Hedenquist et al. 1998), clasificación (Sillitoe, 1999; Hedenquist et al. 2000) y asociación con *lithocaps* y pórfidos de Cu-Au en profundidad (Hedenquist et al. 1998; Hedenquist et al. 2001).

La formación de estos depósitos se da a partir de fluidos de naturaleza ácida y generalmente oxidada (en algunos casos reducida; por ejemplo, Julcani, en Perú), en condiciones en las cuales el azufre se presenta con estado de oxidación +6 o +4 en forma de SO_4^{2-} o SO_2 (Camprubí y Albinson, 2006), típicos de sistemas volcánicos-hidrotermales ácidos adyacentes a exhalaciones volcánicas (Hedenquist et al. 2000). Las zonas mineralizadas se asocian a centros verticales o subhorizontales de *vuggy silica*, brechas hidrotermales y vetas que gradan exteriormente a alteraciones de cuarzo-alunita, caolinita e illita/montmorillonita (Hedenquist, 1987). Los minerales de mena son esencialmente de un estado de sulfuración alto a muy alto (Einaudi et al. 2003), siendo los más comunes portadores de la mineralización de Cu-Au la enargita, luzonita (polimorfo de menor temperatura de la enargita), famatinita, covelita, calcosina y tenantita-tetraedrita.

En Perú, los principales depósitos epitermales de alta sulfuración son Yanacocha (48 Moz Au), Pierina (14 Moz Au) (Teal y Benavides, 2010; Rainbow et al, 2005) y Lagunas Norte (17 Moz Au); este último presentando el mineral en cuarcitas con alteración argílica avanzada (Cerpa et al. 2013).

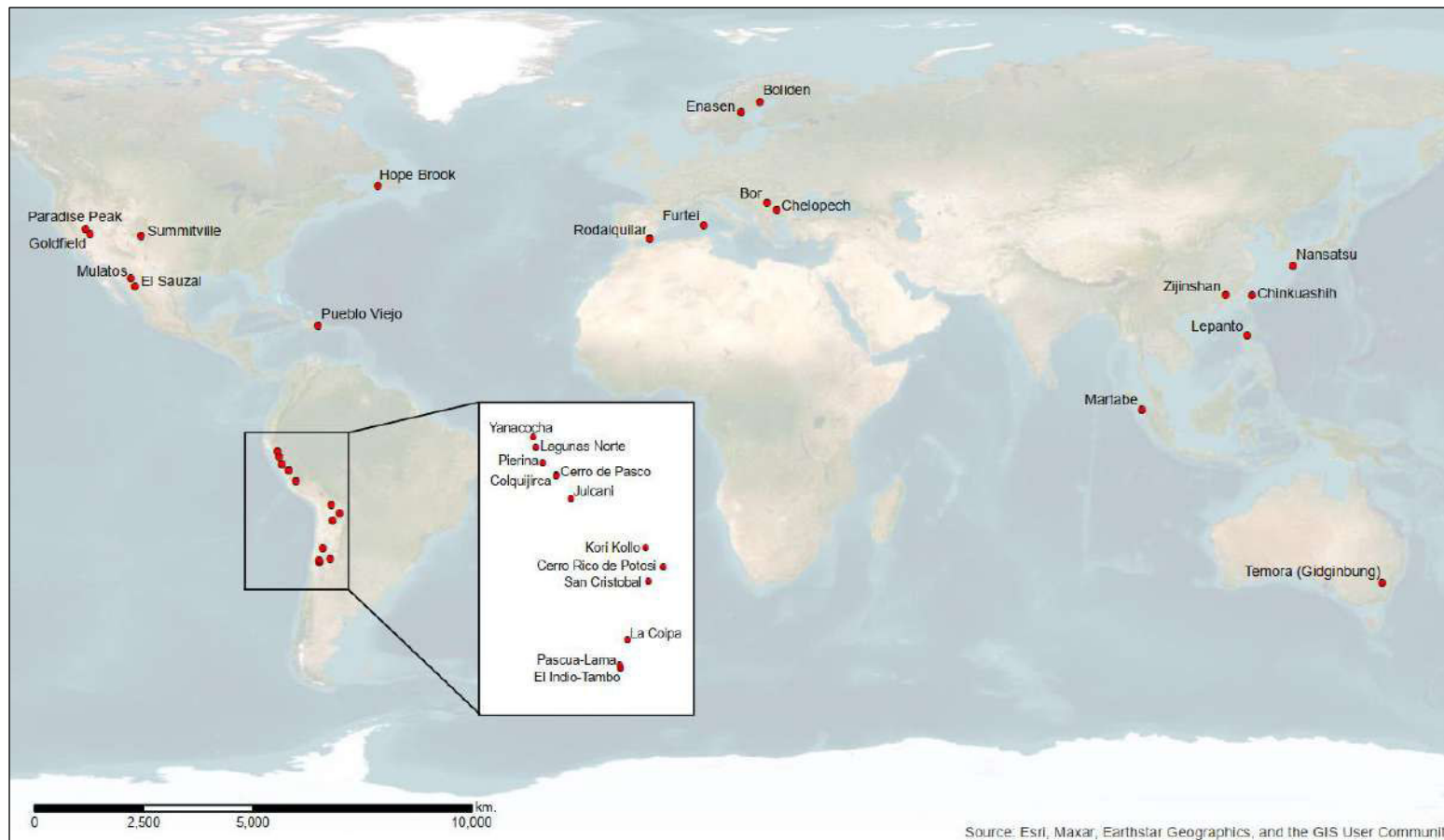


Figura 6. Distribución de los principales depósitos epitermales de alta sulfuración en la región Circumpacífica. Datos de localización obtenidos de John et al. (2018).

3.2.3. *Transición pórfido-epitermal*

La transición entre los ambientes epitermales y porfiríticos es evidenciada por la presencia de pirofilita-alunita profunda en las texturas *patchy-wormy* (Pinto, 2002; Gustafson et al. 2004; figura 7). A pesar de que es un criterio de exploración mundialmente aceptado, aún es un tema que continúa siendo muy estudiado debido a sus implicaciones en la exploración de *lithocaps* y depósitos telescopados.

Arribas (1995) y Hedenquist et al. (1998) fueron los primeros en documentar de manera detallada la relación espacial y temporal que había entre los depósitos epitermales y pórfidos en Lepanto–Far Southeast, Filipinas. Además, a partir de datos geoquímicos y geocronológicos, pudieron determinar que también existe una relación genética entre la alteración argílica avanzada y la potásica, postulando que ambas derivan del mismo proceso magmático-hidrotermal.

Muntean y Einaudi (2001) observaron que en los distritos mineros de Refugio, Aldebarán y La Pepa había una proximidad entre la mineralización aurífera de epitermales de alta sulfuración con depósitos de pórfidos de oro. Sus estudios en inclusiones fluidas de las vetillas tipo “A” y cuarzo negro bandeado determinaron que estos pórfidos se emplazaron a profundidades someras entre los 1.6 a 0.2 km y que, además, sus *lithocaps* se formaron a partir de un fluido hidrotermal coetáneo al que dio lugar a la alteración potásica, análogamente al modelo de Lepanto-Far Southeast.

En los Andes centrales del Perú, la transición pórfido-epitermal se evidenció por la alteración de cuarzo-alunita-pirofilita con texturas *patchy-wormy* que han sido ampliamente registradas en sistemas epitermales de alta sulfuración con proximidad a pórfidos de cobre; por ejemplo, Kupfertal, distrito de Yanacocha (Pinto, 2002 y Gustafson et al. 2004).

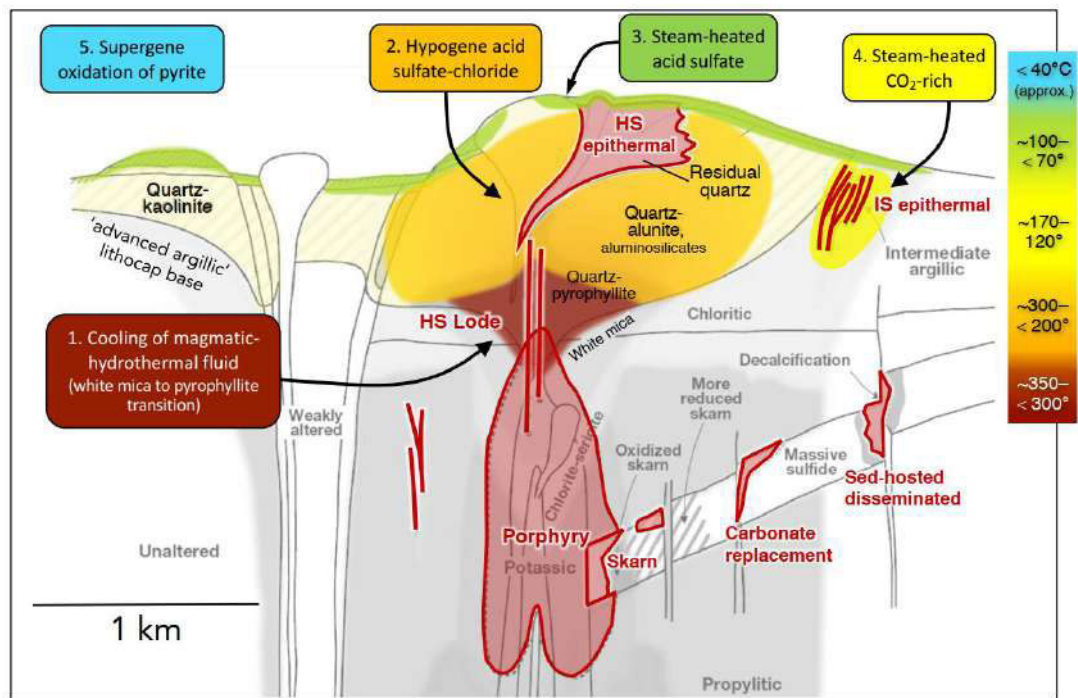


Figura 7. Esquema de la zonación de la alteración argílica avanzada y sus distintas génesis dentro del sistema porfíritico. Tomado de Hedenquist y Arribas (2022).

3.2.4. *Texturas patchy y wormy*

Las texturas *patchy* y *wormy*, originalmente nombradas texturas agusanadas y en parche, o moteada y ovoide, respectivamente, por Noble et al. (2011), han sido evidenciadas en las partes profundas o bases de las alteraciones argílicas avanzadas (Jimenez, 2017) en epitermales de alta sulfuración y pórfidos de Cu-Au alrededor del mundo (Figura 8). En Perú, fueron inicialmente reportadas en los depósitos de Tantahuatay 2 (Tosdal 1996 en Noble et al. 2011), Arcopunco (Vidal et al. 1997) y Yanacocha (Pinto, 2002 y Gustafson et al. 2004); como texturas obliteradas de alteración hidrotermal generadas por una silificación incipiente que forma los parches subredondeados a irregulares de aluminio-silicatos y sulfatos (alunita-pirofilita-dickita), que en muchos casos están acompañados de sulfuros (pirita, enargita, covelita y calcosina) (Figura 9).

La primera propuesta genética fue dada por Noble et al. (2011) quien, en base a observaciones texturales, mineralógicas y reológicas, plantea que las texturas ovoides y moteadas se formaron a partir de fluidos o vapores magmáticos de alta temperatura que, al interactuar con las rocas volcánicas, producen un fluido en alto desequilibrio compuesto de un gel silíceo y ovoides líquidos de aluminio-silicatos y sulfatos. De las dos fases inmiscibles, con carácter viscoelástico, la rica en sílice se solidificará primero para luego dar lugar a la cristalización de la fase rica en arcillas y sulfatos.

Por otro lado, Jimenez (2017), utilizando la distribución mineralógica y la geoquímica de estas texturas, explica que la formación de las *patchy-wormy* ocurren en cuatro etapas que implican la circulación de un fluido hidrotermal de alta temperatura, ácido, de baja presión y con contenido de flúor y cloro a través de la roca ígnea, generando permeabilidad y produciendo, paulatinamente, los aluminio-silicatos y sulfatos que darán lugar a los ovoides hasta que la textura quede completamente formada.

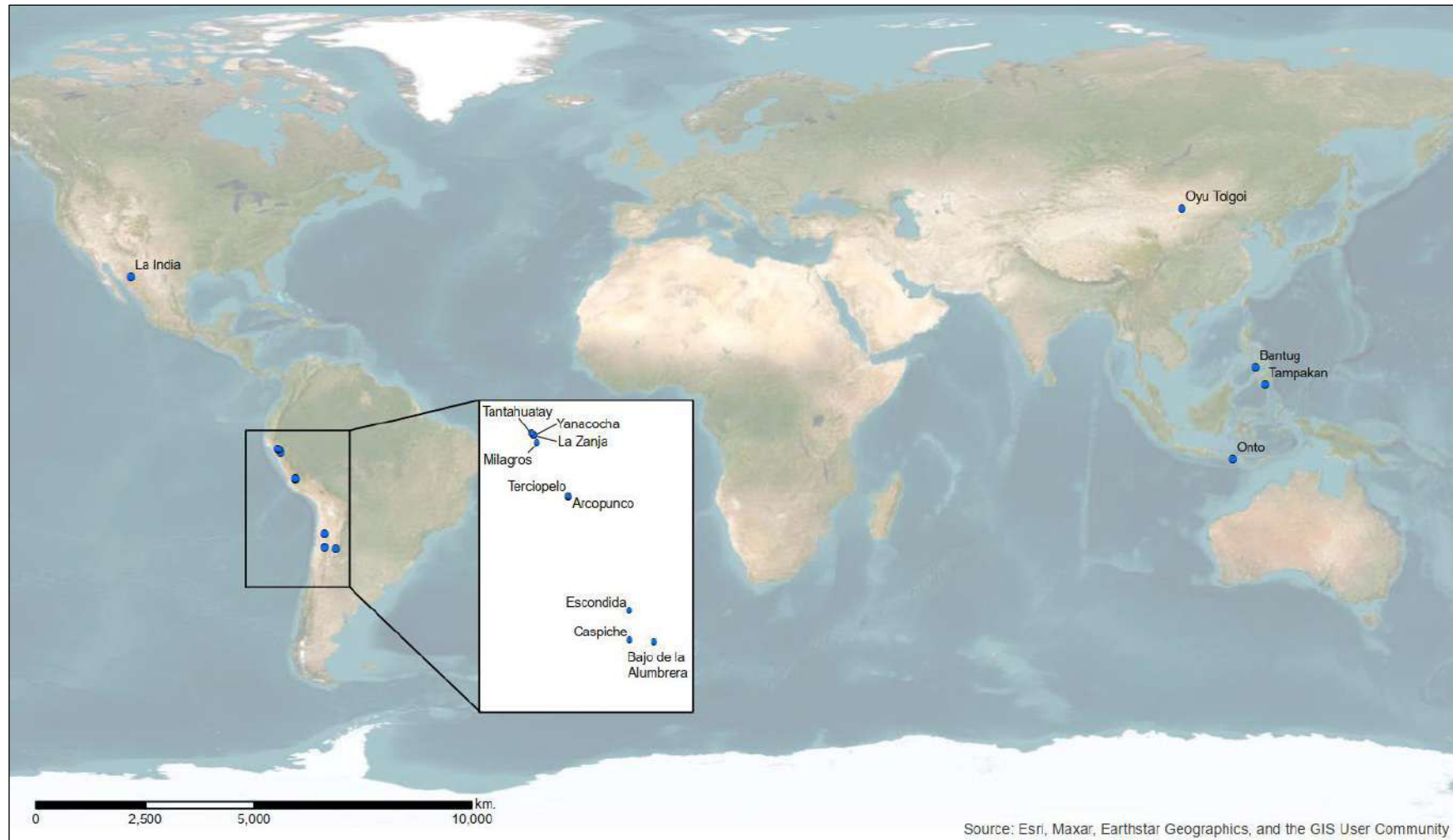


Figura 8. Distribución global de las ocurrencias de los yacimientos y proyectos mineros con evidencias de texturas de alteración patchy-wormy.

En la exploración mineral para los pórfidos de Au, las texturas *patchy-wormy* son importantes vectores en ambientes de alteración argílica avanzada. Estas texturas están frecuentemente asociadas a la mineralización de oro, así como las vetillas de cuarzo negro bandeado.

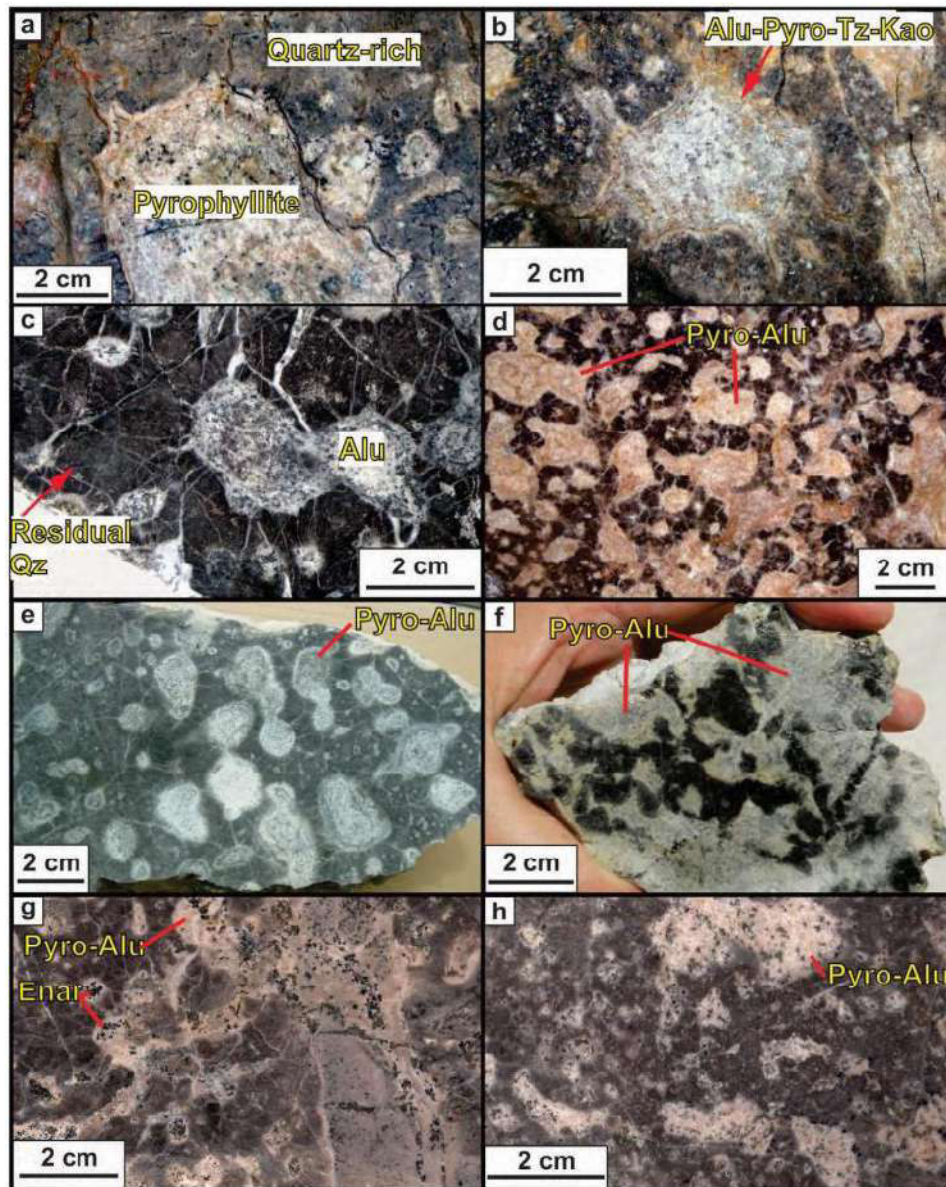


Figura 9. Fotografías de muestras de mano con texturas *patchy-wormy*. a-d: Textura wormy de pirofilita, alunita, topacio y caolinita, en una pasta microcristalina de sílice. Muestras de Oyu Tolgoi, Mongolia. e-f: Textura wormy y patchy de pirofilita y alunita, en una pasta microcristalina de sílice. Muestras de Kupfertal, distrito de Yanacocha, Perú. g-h: Textura patchy de alunita, pirofilita y diásporo, en una pasta microcristalina de sílice. Muestras de la Zanja, distrito de Yanacocha, Perú. Tomado de Jimenez (2017). Abreviaturas: Alu: alunita, Enar: enargita, Kao: caolinita, Pyro: pirofilita, Qz: cuarzo, Tz: topacio.

3.2.5. *Pórfidos de oro*

Los pórfidos de Cu-Mo (Au) son las ocurrencias minerales más buscadas a lo largo del cinturón Circumpacífico por ser las mayores fuentes de cobre y molibdeno en el mundo. Adicionalmente, se ha evidenciado que otros metales tales como el Au, Ag, Pb, Zn, Sn, W y Re están asociados a estos depósitos y pueden llegar a tener concentraciones y recuperaciones económicas (Perelló y Cabello, 1989). Particularmente, el oro ha demostrado ser subproducto, coproducto y producto principal en los pórfidos alrededor del mundo.

Las franjas metalogenéticas de los pórfidos de oro son muy restringidas espacialmente y suelen estar asociadas a epitermales de alta sulfuración (Sillitoe, 2000); por ejemplo, la franja Maricunga en Chile, Cajamarca en Perú, la Cordillera Central de Luzón en Filipinas y el arco Sudan-Banda en Indonesia (Figura 10).

Específicamente en Perú y Chile, la exploración por oro en sistemas epitermales de alta sulfuración dio lugar al descubrimiento de numerosos prospectos de pórfidos que tenían concentraciones de oro mayores a cobre; es decir, que poseen *ratios* de Cu/Au (%/ppm) menores a 0.1 y, generalmente, leyes de oro que están por encima de los 0.4 g/t de promedio (Sillitoe, 2000).

La franja Maricunga, en Chile, es la zona metalogenética más representativa en el mundo en donde se encuentran este tipo de depósitos. Por ejemplo, Aldebarán (Cerro Casale), Refugio (Verde) (Vila y Sillitoe, 1991), Marte-Lobo (Sillitoe, 2000) y Caspiche (Sillitoe et al. 2013) son algunos de los primeros pórfidos de oro y ricos en oro descubiertos que, particularmente, son parte de un espectro continuo de sistemas que varían desde los pórfidos de Cu-Au a los de solamente oro (Sillitoe, 2000). Esto fue también evidenciado por Muntean y Einaudi (2001) quienes demostraron que la variación en las

concentraciones de Au y Cu estaban en función al grado de desarrollo de la alteración potásica, vetillas tipo “A” y las vetillas de cuarzo negro bandeado en donde se hospeda la mineralización de oro.

En la franja de Cajamarca, en Perú, hay importantes ocurrencias de pórfidos ricos en oro; por ejemplo, Kupfertal (Pinto, 2002; Gustafson et al. 2004), Minas Conga (Perol y Chailhuagon) y Cerro Corona (Sillitoe, 2000); que fueron descubiertos a partir de trabajos de exploración que inicialmente fueron enfocados en la búsqueda de epitermales de alta sulfuración.

Sillitoe (2000) propuso un modelo descriptivo y genético que explica el estilo de mineralización, génesis y modelos de exploración de estos sistemas (Figura 11). Los pórfidos de oro tienen un emplazamiento somero entre los 0.5 a 1.5 km, o de 1.6 a 0.2 km (Muntean y Einaudi, 2001), de profundidad con una mineralización de oro hospedada en vetillas de cuarzo negro bandeado que se caracterizan por distribuirse de manera cilíndrica o con forma de campana con respecto a las intrusiones interminerales con geometría *pencil-shape*. Además, están compuestos por seis principales zonas de alteración que se distribuyen también de manera cilíndrica alrededor del pórfido y por encima de los intrusivos precursores; no obstante, estas alteraciones podrían tener un desarrollo muy variable hasta casi nulo dependiendo de las condiciones de formación (Muntean y Einaudi, 2001).

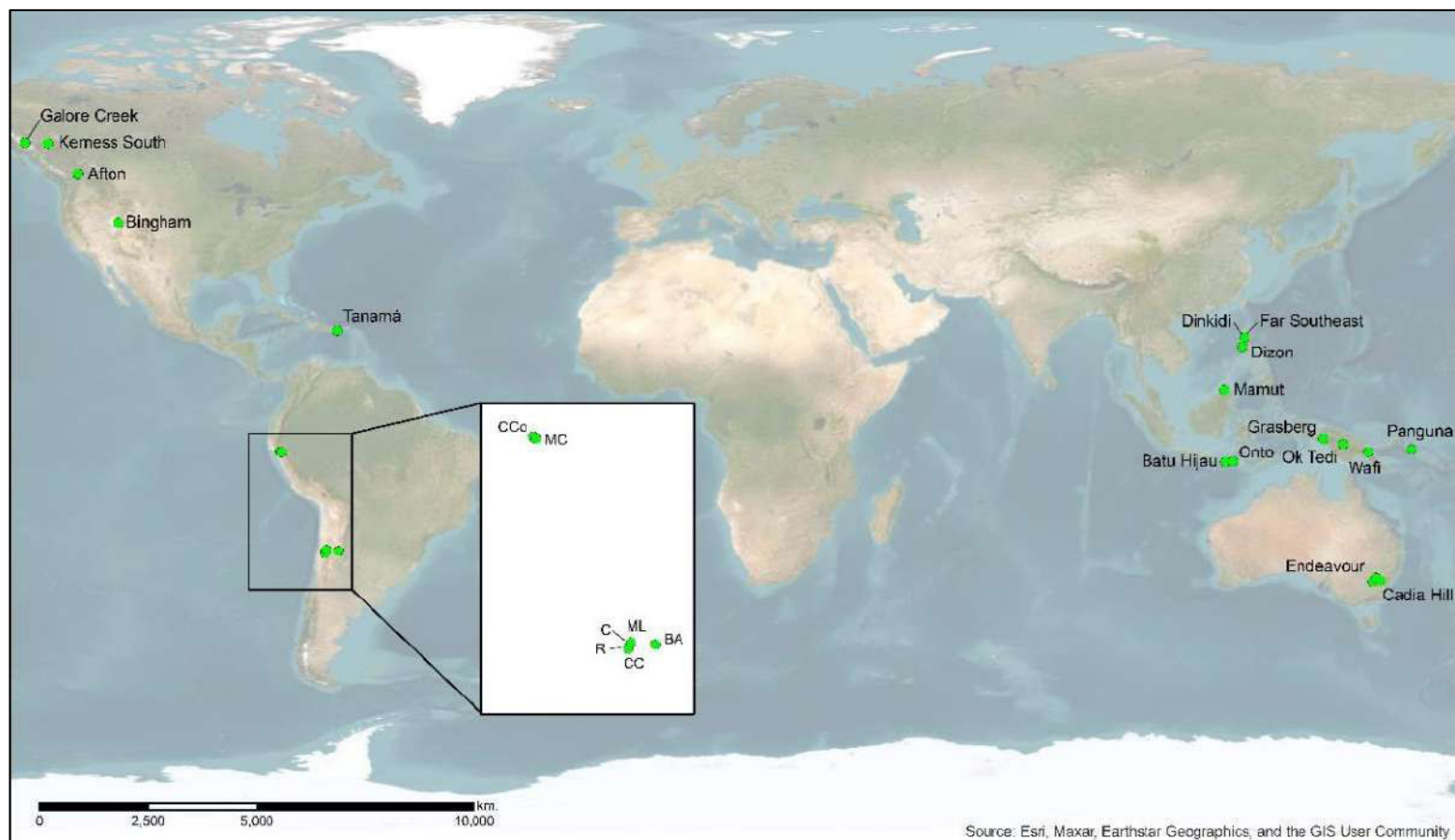


Figura 10. Ubicación de los principales depósitos tipo pórfido ricos en oro. Datos obtenidos de Sillitoe (2000). Abreviaturas: BA: Bajo de la Alumbra, C: Caspiche, CC: Cerro Casale, CCo: Cerro Corona, MC: Minas Conga, ML: Marte-Lobo y R: Refugio.

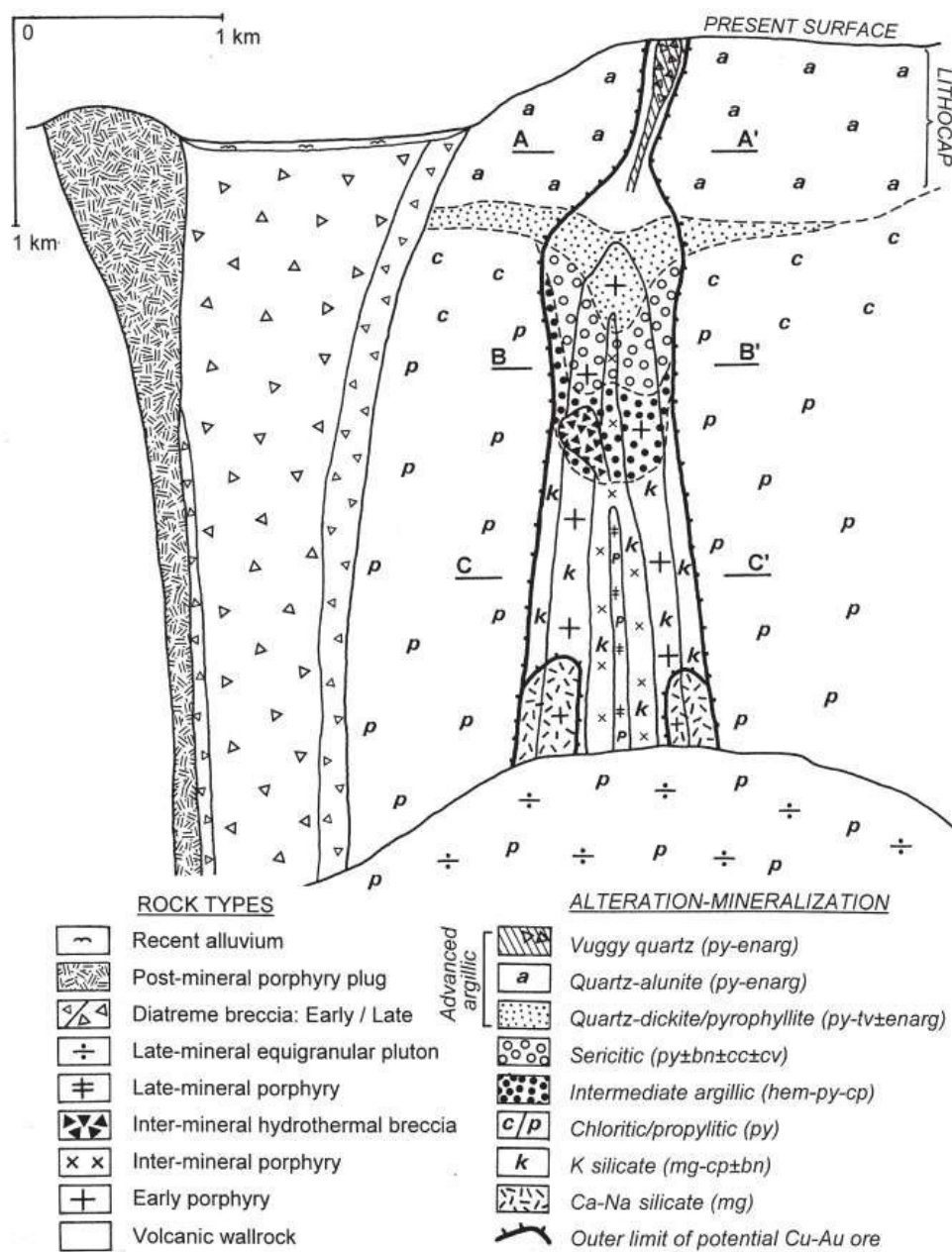


Figura 11. Esquema del modelo descriptivo de un pórfido de oro. Tomado de Sillitoe (2000).

3.2.6. *Vetillas en sistemas tipo pórfido*

Las vetillas en los pórfidos de cobre y oro se forman durante todas las etapas evolutivas del sistema magmático-hidrotermal, que corresponden a los eventos de alteración-mineralización del depósito. Fueron inicialmente clasificadas por Gustafson y Hunt (1975) y Gustafson y Quiroga (1995) en el pórfido de cobre El Salvador, Chile. Se definieron las vetillas tempranas de biotita (tipo “EB”), cuarzo granular sacaroideo con mineralización de cobre (tipo “A”); las transicionales de cuarzo-molibdenita (tipo “B”) y pirita-calcopirita (tipo “C”); y las tardías de cuarzo-pirita con halos de sericita (tipo “D”). Posteriormente, las vetillas de magnetita (tipo “M”) (Arancibia y Clark 1996), cuarzo-magnetita (tipo “A”) y cuarzo granular con sutura de pirita (“Tipo AB”) (Sutarto et al, 2015) fueron adicionadas a la literatura, característicamente en los pórfidos que tiene altos contenidos de oro (Sillitoe, 2010). De estos últimos, en la franja Maricunga, se definieron un tipo de vetilla exclusiva de este tipo de yacimientos que contienen la mineralización de oro. Estas son distintivamente bandeadas, con capas simétricas de cuarzo traslúcido y cuarzo negro (Vila y Sillitoe 1991), atribuyéndose el color de este último a las abundantes inclusiones fluidas ricas en vapor (Muntean y Einaudi 2000)

Raymond y Cernuschi (2022), en los yacimientos de Haquira y Taca Taca, mencionan un grupo de vetillas formadas en las etapas tempranas y profundas de los sistemas pórfidos, conocidas como vetillas de halos tempranos (o *early halos* en inglés), las cuales se dividen en tres tipos: (1) vetillas con halos de biotita (tipo “EDM”), descritas inicialmente en Butte (Rusk et al., 2008) y Bingham (Redmond et al., 2004) con la misma denominación, y como vetillas tipo “4” o “T4” en Los Pelambres (Atkinson et al. 1996); (2) vetillas con halos de sericita de grano grueso gris verdosas (tipo “PGS”); y (3) vetillas con halos de sericita verde de grano fino (tipo “GRS”).

Las clasificaciones se basan principalmente en la geometría, mineralogía de relleno, tipo de halos y mineralización. Además, estas muestran relaciones de temporalidad y profundidad que permiten caracterizarlas genéticamente (Figura 12; Sillitoe, 2010).

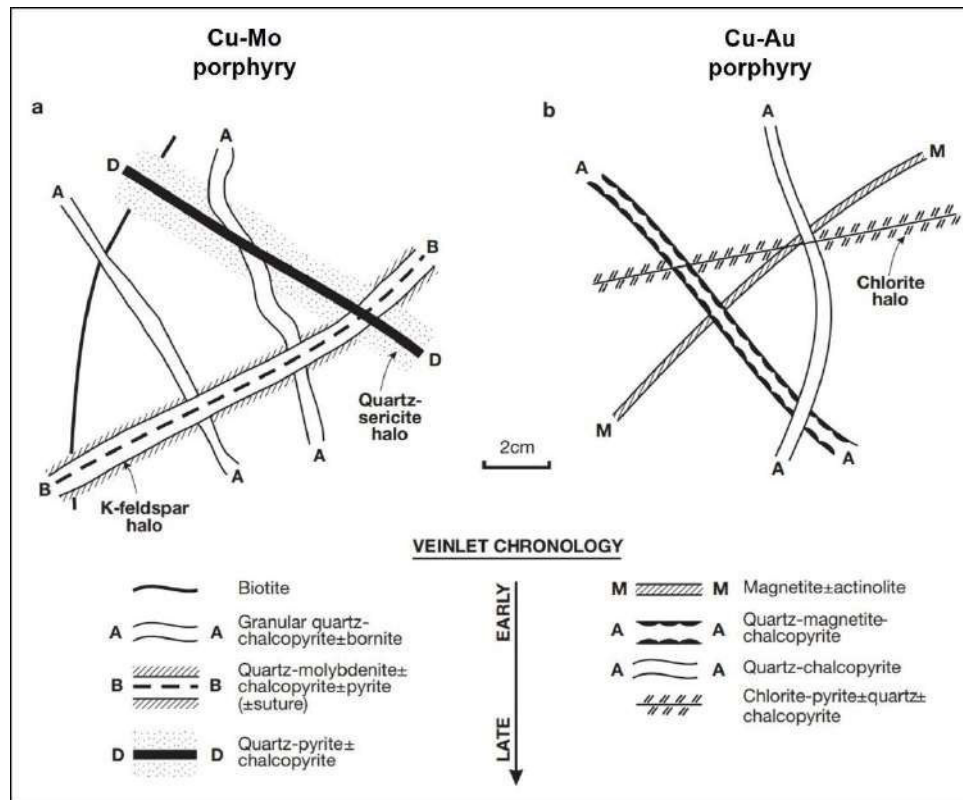


Figura 12. Cronología esquemática de la secuencia típica de vetillas en (a) depósitos de pórfido Cu-Mo y (b) pórfido Cu-Au. Tomado de Sillitoe (2010)

3.2.7. Espectroscopía de luz infrarroja de onda corta

La espectroscopía de luz infrarroja de onda corta o espectroscopía *SWIR* es una técnica directa muy utilizada en las campañas de exploración, porque permite identificar minerales de grano muy fino e indistinguibles al ojo humano, y determinar sus parámetros composicionales y térmicos (Thompson, 1999). Entre estos minerales los filosilicatos, arcillas, carbonatos, sulfatos, cuarzo y ópalo podrán ser detectados.

Esta técnica se basa en el comportamiento de las ondas del espectro electromagnético en el rango de la luz infrarroja de onda corta (1300 a 2500 nm) que son emitidas y absorbidas por determinadas moléculas de los minerales. De esta manera, este fenómeno genera un único espectro de absorción para cada mineral que sirve de firma identificadora.

Por ejemplo, en el distrito de Cu-Au Mankayan, Chang et al (2011) emplearon técnicas de espectroscopía *SWIR*, así como análisis de química mineral y geoquímica de roca total para estudiar la alunita. Sus hallazgos permitieron establecer relaciones y vectores hacia los centros intrusivos responsables de la mineralización de pórfidos.

Por otro lado, Guatame (2013) llevó a cabo investigaciones de vectorización en el depósito de Rodalquilar, centrándose en los grados de cristalinidad de la caolinita e illita/esmectita mediante análisis *SWIR*, complementados con difracción de rayos (DRX) y termogravimetría. Sus conclusiones indicaron una relación genética entre la mineralización de oro y la cristalinidad de la illita/esmectita.

Finalmente, Zhai et al (2023), empleando parámetros *SWIR* junto con análisis de química mineral, investigaron las pirofilitas del depósito de Guihu, encontrando correlaciones lineales entre la temperatura, concentración de aluminio y el cociente Na/K, lo que podría servir como guía en la búsqueda de centros porfíricos.

3.2.8. Geoquímica

La geoquímica es una herramienta que más trascendencia ha marcado en la exploración mineral y continúa siendo utilizada como una técnica para detectar anomalías de cuerpos minerales ocultos, trazar procesos hidrotermales y magmáticos, y entre otras aplicaciones.

De acuerdo con su abundancia, los elementos químicos pueden ser separados en los siguientes dos grupos:

3.2.8.1. Geoquímica de elementos mayores

Los elementos mayores son los constituyentes más abundantes de las rocas ígneas, cuyas concentraciones superan el 1% (Gill, 2010). Por ello han sido ampliamente utilizados para comprender la génesis y evolución de los principales tipos de roca. Estos son sílice (Si), aluminio (Al), calcio (Ca), sodio (Na), potasio (K), hierro (Fe), magnesio (Mg), fósforo (P) y titanio (Ti).

Estos elementos han sido frecuentemente usados para caracterizar composicional y tectónicamente rocas intrusivas y volcánicas a partir de muestras inalteradas (Rollinson y Pease, 2021); sin embargo, en la gran mayoría de prospectos mineralizados, las rocas suelen presentar distintos grados de alteración. Por esta razón, los elementos mayores también se emplean para trazar procesos hidrotermales (Halley, 2020) porque, en su mayoría, son muy móviles ante estos procesos de hidrólisis, a excepción del aluminio, fósforo y titanio que muestran un comportamiento más resistente a la removilización hidrotermal.

3.2.8.2. Geoquímica de elementos traza

Los elementos trazas son los constituyentes menos abundantes en la corteza terrestre, sus concentraciones son menores a 0.1% y tienen una sensibilidad mucho mayor a los

procesos geoquímicos que los elementos mayores. Por lo tanto, son mejores discriminadores petrológicos (Rollinson y Paese, 2021).

En base a la teoría del coeficiente de partición (K_d), que indica cuantitativamente la preferencia de un elemento de permanecer o en la fase fundida o en la red cristalina de un mineral, los elementos trazas pueden dividirse en dos grupos. Los elementos compatibles que tienen preferencia a pertenecer en las fases cristalinas, y los elementos incompatibles que tienen afinidad a la fase fundida. Estos comportamientos pueden explicarse a partir del tamaño del radio iónico y la cantidad de carga iónica del elemento (Bernal y Railsback, 2008; Gill, 2010).

Adicionalmente, los elementos incompatibles se dividen en los siguientes subgrupos. 1) Los elementos litófilos de gran radio iónico (*LILE*, por sus siglas en inglés) que poseen un radio iónico muy grande que no les permite ser parte de los principales minerales formadores de roca; y 2) los elementos de alto potencial iónico (*HFSE*, por su siglas en inglés) que tienen un alto cociente de carga/radio que los hace inestables en la red cristalina debido a una alta intensidad del campo electrostático de cada ion, y por ende, forman parte de las rocas ígneas con mayor grado de diferenciación magmática.

CAPITULO 4: CONTEXTO GEOLÓGICO

El sector central de la región Huancavelica forma parte de la franja metalogenética de depósitos epitermales de Au-Ag y Ag-Pb-Zn del Mioceno y Mio-plioceno (Carlotto et al., 2009) que, tectónicamente, se relacionan a una zona de *flat-slab* generada por un aumento en el ratio de convergencia (Manea et al. 2017) y el deslizamiento de la dorsal de Nazca bajo el margen continental andino (Rosenbaum et al., 2005).

El principal control estructural que domina en la zona de estudio es la convergencia de los sistemas de fallas Chonta (SFC) y Huancavelica-Huachocolpa (SFHH) con direcciones NW-SE y N-S, respectivamente (Rodríguez, 2008).

La estratigrafía es predominantemente volcánica con diversas secuencias piroclásticas y subvolcánicas depositadas durante el Eoceno superior al Mio-plioceno con una notable migración SW-NE del arco volcánico (Morche et al., 1996). Las rocas ígneas del vulcanismo Mioceno y Mio-plioceno, que abarcan la zona de estudio, han sido ampliamente estudiadas en cuanto a su edad (McKee et al., 1975), tectónica (McKee y Noble, 1982; Noble et al., 1999) y metalogenia (Noble y McKee, 1999). Estas rocas volcánicas sobreyacen en discordancia angular a las rocas sedimentarias de los grupos Pucará y Goyllarisquiza (Figura 13).

4.1. Magmatismo y vulcanismo del Cenozoico

Los episodios volcánicos ocurridos durante el Cenozoico fueron divididos en cuatro grupos en base a sus edades radiométricas, relaciones estratigráficas y tectónicas (McKee y Noble 1982). Se reconocen dos grandes bloques tectono-estratigráficos en donde se han desarrollado casi restringidamente cada uno de estos eventos volcánicos. El bloque Castrovirreyna tiene la forma de una cuenca elongada NW-SE con una extensión aproximada de 140 x 35 km²; limitada al oeste por el Batolito de la Costa y al este por el

sistema de fallas Chonta, que lo separa del Bloque Huancavelica – Huachocolpa. Este último tiene una extensión de 95 x 25 km² estando limitado al norte por un bloque de rocas sedimentarias mesozoicas, al este por el sistema de fallas Huancavelica-Huachocolpa, y al sur por la intersección de este último con el sistema de fallas Chonta (Figura 14).

Las dataciones fueron realizadas, en su mayoría, por el método K-Ar en biotitas, plagioclasas y sanidinas para las rocas ígneas; y mica blanca y alunita para la alteración hidrotermal asociada a la mineralización. Pocas muestras fueron analizadas por el método Ar-Ar (Tabla 2).

4.1.1. Vulcanismo del Eoceno medio – Oligoceno (40 – 30 Ma)

Este episodio está representado por una secuencia de rocas volcánicas de brechas dacíticas, tobas silíceas y volcanoclásticas (McKee y Noble 1982) atribuidas a las formaciones Tantará y Sacsaquero (Morche et al. 1996 y Cereceda et al. 2021). Sus afloramientos son estratificados con alto a bajo ángulo de buzamiento hacia el suroeste, y están restringidos en el bloque de Castrovirreyna.

La Formación Tantará está compuesta de aproximadamente 300 metros (Cereceda et al, 2021) de brechas piroclásticas violáceas a rojizas, polimícticas con matriz tobácea andesítica e intercaladas con delgados niveles de toba de cristales y lavas andesíticas. En los alrededores del abra Chonta y al oeste de la mina María Luz, los afloramientos están estratificados en potentes bancos, con dirección andina y buzamientos de 40° a 70° hacia el suroeste. Esta unidad está discordantemente sobre un nivel de areniscas rojizas a grises y calizas lacustrinas asignadas por Morche et al. (1996) a la Formación Casapalca. En base a los estudios geocronológicos de K-Ar en biotita realizados por Noble et al. (1979), la base de esta formación está datada en 41.2 y 40.9 Ma; es decir, el Eoceno medio.

La Formación Sacsaquero está dispuesta sobre la Formación Tantarà en aparente concordancia y subyace en discordancia angular a la Formación Castrovirreyna del Mioceno inferior (Cereceda et al, 2021). Al noreste de El Palomo, la secuencia es muy bien estratificada con dirección andina y buzamientos de 30° a 50° hacia el suroeste, y tiene un espesor aproximado de 400 metros. Litológicamente, de la base hacia el tope, consiste en intercalaciones de tobas de cristales grises, niveles de limoarcillitas rojizas, tobas de cristales y cenizas rojizas; cortadas por un sill de andesita porfirítica de color violáceo oscuro y delgados niveles de basaltos amigdaloidales. A pesar de que no se cuenta con una datación radiométrica, su posición estratigráfica le atribuye una edad del Eoceno superior – Oligoceno.

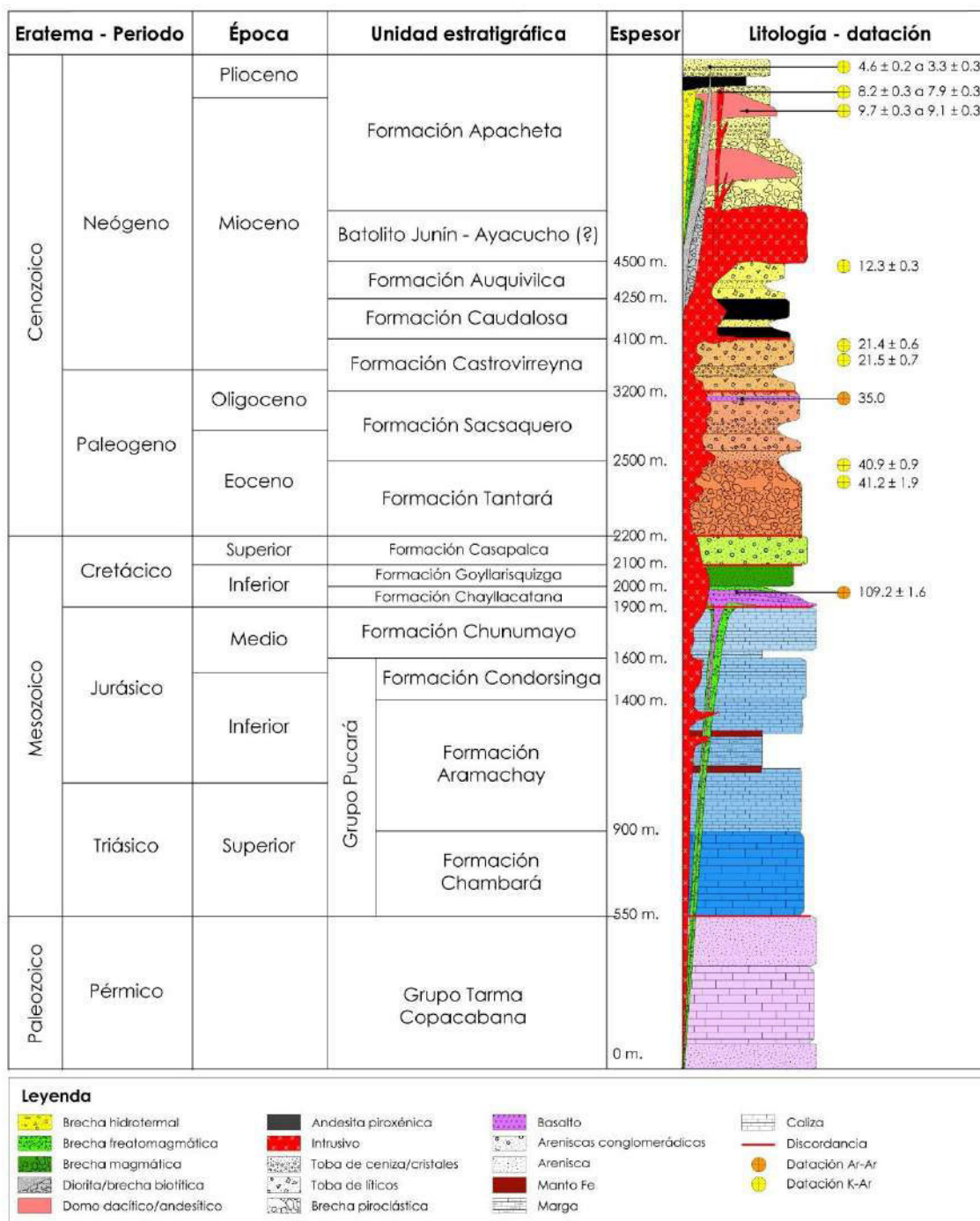


Figura 13. Columna estratigráfica de los distritos mineros de Huachocolpa, Huancavelica y Castrovirreyna.

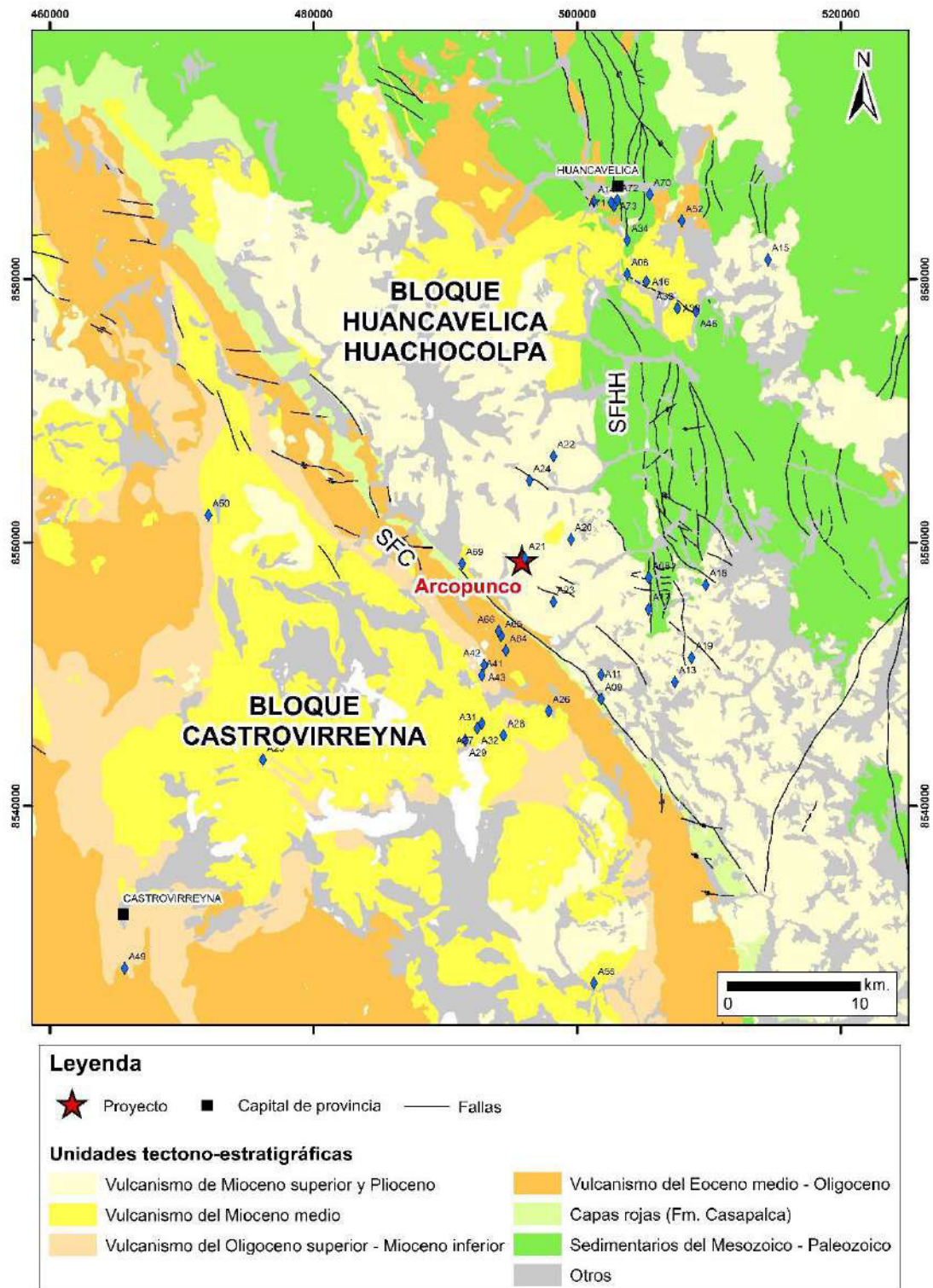


Figura 14. Mapa tectono-estratigráfico mostrando los bloques de Castrovirreyña y Huancavelica – Huachocolpa y sus eventos volcánicos. Abreviaturas: SFC: Sistema de fallas Chonta, SFHH: Sistema de fallas Huancavelica – Huachocolpa.

Tabla 2. Datos geocronológicos recopilados para el estudio.

ID	XX	YY	Método	Mineral	Edad (ma)	Error (±)	Referencia
A01	-13.35	-74.62	K/Ar	Moscovita	1.9	0.08	Noble y McKee, 1982
A02	-13.37	-74.64	K/Ar	Biotita	1.96	0.1	Noble y McKee, 1982
A03	-13.37	-74.34	K/Ar	Biotita	2.23	0.3	Noble y McKee, 1982
A04	-13.34	-74.44	K/Ar	Biotita	2.34	0.2	Noble y McKee, 1982
A05	-13.34	-74.44	K/Ar	Biotita	2.76	0.3	Noble y McKee, 1982
A06	-12.84	-74.97	K/Ar	Biotita	3.3	0.3	McKee et al. 1986
A07	-13.36	-74.55	K/Ar	Biotita	3.5	0.2	Noble y McKee, 1982
A08	-13.05	-74.95	K/Ar	Biotita	3.7	0.2	McKee et al. 1975
A09	-13.13	-74.98	K/Ar	Biotita	3.8	0.2	McKee et al. 1975
A10	-13.39	-74.63	K/Ar	Biotita	3.9	0.2	Noble y McKee, 1982
A11	-13.12	-74.98	K/Ar	Biotita	4.6	0.2	McKee et al. 1975
A12	-13.35	-74.63	K/Ar	Biotita	6	0.2	Noble y McKee, 1982
A13	-13.12	-74.93	K/Ar	Moscovita	6.4	0.2	Bruha, 1983
A14	-12.79	-74.99	K/Ar	Biotita	6.7	0.6	McKee et al. 1986
A73	-12.79	-74.97	Ar-Ar	Adularia	7.09	0.11	Wise, 2004
A72	-12.79	-74.97	Ar-Ar	Adularia	7.63	0.08	Wise, 2004
A15	-12.83	-74.87	K/Ar	Biotita	7.7	0.3	McKee et al. 1986
A16	-12.85	-74.95	K/Ar	Plagioclasa	7.8	1.2	McKee et al. 1986
A17	-13.07	-74.95	K/Ar	Biotita	7.9	0.3	Noble y McKee, 1999
A18	-13.06	-74.91	K/Ar	Biotita	8.2	0.3	McKee et al. 1975
A19	-13.11	-74.92	K/Ar	Biotita	9.1	0.3	McKee et al. 1975
A20	-13.02	-75.00	K/Ar	Moscovita	9.4	0.3	Noble et al. 1999*
A69	-13.04	-75.08	Ar-Ar	Biotita	9.45	0.19	Wise y Noble 2001
A21	-13.04	-75.04	K/Ar	Alunita	9.5	0.3	Noble y McKee, 1999
A22	-12.97	-75.02	K/Ar	Biotita	9.7	0.3	McKee et al. 1975
A23	-13.07	-75.02	K/Ar	Biotita	10.1	0.3	McKee et al. 1975
A24	-12.98	-75.03	K/Ar	Biotita	10.4	0.3	McKee et al. 1975
A25	-13.18	-75.22	K/Ar	Alunita	11.1	0.3	Noble y McKee, 1999
A26	-13.14	-75.02	K/Ar	Alunita	11.5	0.4	Noble y McKee, 1999
A27	-13.15	-75.07	K/Ar	Plagioclasa	12	0.3	McKee y Noble, 1982
A28	-13.16	-75.05	K/Ar	Biotita	12.2	1	McKee y Noble, 1982
A29	-13.16	-75.08	K/Ar	Biotita	12.3	0.3	McKee y Noble, 1982
A30	-15.83	-72.75	K/Ar	-	13.8	0.3	Noble et al. 1974
A31	-13.15	-75.07	K/Ar	Biotita	13.9	0.4	Noble et al. 1974
A32	-13.15	-75.07	K/Ar	Biotita	14.1	0.4	McKee y Noble, 1982
A33	-12.87	-74.93	K/Ar	Biotita	15.1	1.12	McKee y Noble, 1982
A34	-12.82	-74.97	K/Ar	Biotita	16.5	0.3	McKee et al. 1986
A35	-13.24	-74.30	K/Ar	Sanidina	17.3	0.2	McKee y Noble, 1982
A36	-13.29	-74.31	K/Ar	Plagioclasa	18.3	0.6	McKee y Noble, 1982
A37	-15.28	-72.40	K/Ar	-	18.9	0.4	Noble et al. 1974
A38	-15.24	-72.28	K/Ar	-	19.1	0.3	Noble et al. 1974
A39	-12.87	-74.93	K/Ar	Plagioclasa	19.6	0.8	McKee y Noble, 1982

Continuación de la tabla 2.

ID	XX	YY	Método	Mineral	Edad (ma)	Error (±)	Referencia
A40	-13.01	-74.75	K/Ar	Plagioclasa (ligera)	20.8	3.9	McKee y Noble, 1982
A41	-13.12	-75.07	K/Ar	Biotita	21.4	0.6	Noble et al. 1974
A42	-13.11	-75.07	K/Ar	Biotita	21.4	0.6	McKee y Noble, 1982
A43	-13.11	-75.07	K/Ar	Biotita	21.5	0.7	McKee y Noble, 1982
A44	-12.98	-74.73	K/Ar	Biotita	21.6	0.8	Noble et al. 1974
A45	-12.98	-74.73	K/Ar	Plagioclasa	21.6	1.3	McKee y Noble, 1982
A46	-12.87	-74.92	K/Ar	Sanidina	21.7	0.3	McKee y Noble, 1982
A47	-12.98	-74.73	K/Ar	Biotita	21.7	0.3	McKee y Noble, 1982
A48	-13.01	-74.75	K/Ar	Plagioclasa (pesada)	22.9	0.8	McKee y Noble, 1982
A49	-13.32	-75.32	K/Ar	Biotita	23.1	0.9	McKee y Noble, 1982
A50	-13.01	-75.26	K/Ar	Sanidina	25.8	0.3	McKee y Noble, 1982
A51	-12.21	-76.50	K/Ar	Biotita	26.9	0.4	McKee y Noble, 1982
A52	-12.81	-74.93	K/Ar	Biotita	27.1	0.9	McKee y Noble, 1982
A53	-12.21	-76.50	K/Ar	Plagioclasa	30.5	1.6	McKee y Noble, 1982
A54	-12.40	-75.31	K/Ar	Plagioclasa	31.1	6	Noble et al. 1979
A55	-13.33	-74.99	K/Ar	Biotita	31.2	0.9	Noble et al. 1979
A56	-12.49	-75.63	K/Ar	Sanidina	34.9	0.7	Noble et al. 1979
A71	-12.79	-74.98	Ar-Ar	Plagioclasa	35		Wise, 2004
A57	-12.44	-75.68	K/Ar	Plagioclasa, cuarzo	35.2	1.8	Noble et al. 1979
A58	-12.02	-75.50	K/Ar	Sanidina	36.7	1	Noble et al. 1979
A59	-12.78	-75.52	K/Ar	Plagioclasa	38	1.9	Noble et al. 1979
A60	-12.60	-74.95	K/Ar	Plagioclasa	39.2	1.1	Noble et al. 1979
A61	-11.56	-76.30	K/Ar	Plagioclasa, cuarzo	39.8	1.9	Noble et al. 1979
A62	-12.01	-75.48	K/Ar	Biotita	39.8	1	Noble et al. 1979
A63	-12.14	-76.58	K/Ar	Plagioclasa, cuarzo	40.2	4	Noble et al. 1979
A64	-13.10	-75.05	K/Ar	Biotita	40.9	1.2	Noble et al. 1974
A65	-13.09	-75.05	K/Ar	Biotita	40.9	0.9	Noble et al. 1979
A66	-13.09	-75.06	K/Ar	Biotita	41.2	1.9	Noble et al. 1979
A67	-12.14	-76.58	K/Ar	Biotita	41.3	0.5	Noble et al. 1979
A68	-13.42	-74.91	K/Ar	Plagioclasa	41.4	1.9	Noble et al. 1979
A70	-12.78	-74.97	Ar-Ar	Plagioclasa	109.2	1.6	Noble et al. 2001

*Las coordenadas originales no fueron mencionadas en el texto original; las indicadas en esta tabla son una aproximación en base a la ubicación de las vetas Tinquicorral.

4.1.2. Vulcanismo del Oligoceno superior y Mioceno inferior (27 – 19 Ma)

Las rocas que conforman este episodio volcánico corresponden a la Formación Castrovirreyna y se restringen en gran parte al bloque homónimo, aunque McKee y Noble (1982) reportaron tobas riolíticas con edades de 27.1 ± 0.9 , 21.7 ± 0.3 y 19.6 ± 0.8 Ma al sureste de la ciudad de Huancavelica, estas fueron asignadas a las formaciones Pampachacra y Rumichaca por Romero y Torres (2003). Esto podría dar la idea de que el vulcanismo de esta época se extendió por los bloques Castrovirreyna y Huancavelica – Huachocolpa, y que el bajo grado de deformación y exhumación de este último bloque permitiría la preservación de las rocas volcánicas del Mioceno Superior – Plioceno sobre los depósitos de este vulcanismo.

La Formación Castrovirreyna, cartografiada por Morche et al. (1996) en los alrededores del abra Chonta, sobreyace en discordancia angular a la Formación Sacsaquero. Los afloramientos adyacentes a la laguna Pulloc, constan de una secuencia estratificada de aproximadamente 250 metros de espesor (Cereceda et al. 2021) de brechas piroclásticas, tobas de cristales y líticos de color gris con abundantes biotitas y limoarcillitas rojizas con ocasionales niveles de tobas de cristales. Las dataciones radiométricas realizadas por McKee y Noble (1982), K-Ar en biotitas, dan edades de 25.8 ± 0.3 , 21.5 ± 0.7 y 21.4 ± 0.6 Ma que permiten asignarle la edad de Oligoceno superior – Mioceno inferior.

4.1.3. Vulcanismo del Mioceno medio (15 – 12 Ma)

Sus afloramientos al norte del lago Choclococha fueron reconocidos por McKee y Noble (1982) quienes la denominaron la Toba Choclococha, que posteriormente fue cartografiada como la Formación Auquivilca (Cereceda et al. 2021). Esta unidad sobreyace en discordancia angular a la Formación Castrovirreyna e infrayace discordantemente a un paquete de lavas de andesitas piroxénicas de la Formación Caudalosa. Litológicamente está constituida de tobas de cenizas amarillentas intercaladas

con depósitos sedimentarios de origen volcánico. Las rocas de esta unidad están datadas, por K-Ar en biotitas, en 13.9 ± 0.4 Ma (Noble et al. 1974), 14.1 ± 0.4 , 12.3 ± 0.3 , 12.2 ± 1 y 12 ± 0.3 Ma (McKee y Noble 1982) lo que permite asignarle a este vulcanismo una edad de Mioceno medio.

4.1.4. Magmatismo y vulcanismo del Mioceno superior – Plioceno (10 – 3 Ma)

El magmatismo y vulcanismo ocurrido durante este intervalo de tiempo es parte de una serie de eventos tectónicos que desencadenaron el emplazamiento de rocas intrusivas, complejos volcánicos y sistemas hidrotermales relacionados al sistema de fallas Chonta. Sus productos volcánicos están limitados en el bloque Huancavelica – Huachocolpa y asignados a la Formación Apacheta (Morche et al. 1996; Valdivia y Raymundo, 2003; Cereceda et al. 2021). A pesar de que esta unidad litoestratigráfica ha sido afectada por al menos cuatro eventos tectónicos (Rodríguez, 2008) su grado de deformación es bajo, lo que ha llevado a pensar que se encuentra sobreyaciendo un hipotético batolito no exhumado (nombrado Batolito Junín-Ayacucho en el presente trabajo) lo que genera una expresión de deformación similar a las rocas depositadas e intruidas por el batolito de la Costa (McKee y Noble, 1982).

La Formación Apacheta, cartografiada por Morche et al. (1996) en el cuadrángulo de Huachocolpa, está formalmente dividida en tres miembros (Cereceda et al. 2021) y su depositación ocurrió a lo largo del Mioceno superior y Plioceno. Dado que la cartografía a escala regional no brinda mucho detalle en cuanto las litologías de esta formación, se describirá esta unidad en base al mapeo del distrito.

4.1.4.1. Brechas piroclásticas Tinquicorral

Esta subunidad aparentemente representa la base de la Formación Apacheta. En la zona de Tangana y Tinquicorral se encuentra una sección expuesta de aproximadamente 500

metros de espesor con una estratificación norte-sur y buzamientos horizontales a ligeramente inclinados 20° hacia el este y oeste, que gradualmente se va ocultando hacia el sur debajo de tobas de cristales y cenizas (Figura 15). En las inmediaciones de la Planta Recuperada y la mina Teresita, los afloramientos son escasos y se encuentran cortados y cubiertos en gran parte por domos y brechas de domos de composición andesítica que pertenecen al Complejo Manchaylla.

Litológicamente las brechas piroclásticas son bien soldadas, de composición andesítica, violáceas a rojizas, polimícticas, con clastos de formas subangulares a irregulares con tamaños milimétricos a decimétricos y alteración propilítica (Figura 16); intercaladas con domos andesíticos gris violáceos con textura porfirítica a afanítica.

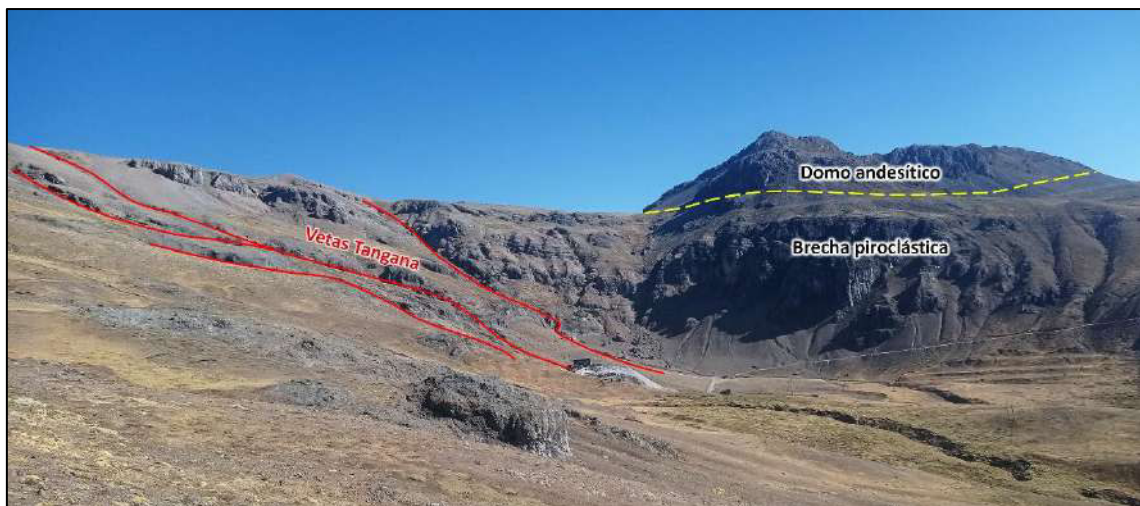


Figura 15. Brechas piroclásticas sobreyacidas por un domo andesítico, inmediaciones de la Unidad Minera Tangana. Vista hacia el norte.

En el distrito minero Huachocolpa, esta subunidad es la principal roca caja de los sistemas de vetas debido a su naturaleza soldada y comportamiento frágil ante la deformación. En las proximidades a las estructuras mineralizadas, esta secuencia presenta una alteración

de sericita a illita y silicificación pasando gradualmente a una zona distal de clorita-esmectita.



Figura 16. Afloramiento de brecha piroclástica, inmediaciones de Tinquicorral.

Los bloques de composición riodacíticos de estas brechas fueron datados por K-Ar en biotitas dando edades de 10.4 ± 0.3 Ma y 10.1 ± 0.3 Ma (McKee et al. 1975), lo que sugiere que el emplazamiento de estas brechas sería más joven que los 10 Ma. Sin embargo, la evidencia de las formas irregulares de estos clastos de tobas riodacíticas podrían indicar que su solidificación se dio paralelamente con la formación de la brecha piroclástica argumentando a favor de una depositación entre los 10.7 y 9.8 Ma.

4.1.4.2. Domos traquiandesíticos

Las brechas piroclásticas Tinquicorral están cortadas por numerosos cuerpos subvolcánicos de composición traquiandesítica a dacítica que se encuentran ampliamente distribuidos como cuerpos aislados, alineados a estructuras kilométricas y en complejos de domos asociados a depósitos piroclásticos co-genéticos (Figura 17). A lo largo del

SFC, entre las zonas de Pucapampa y Hallazgo, se han cartografiado domos (o diques) con geometría elongada (Wise, 1999; Valdivia y Raymundo, 2003) emplazados aproximadamente a una edad de 9.45 ± 0.19 Ma, Ar-Ar en biotita (Wise y Noble, 2001), sellando las estructuras generadas durante el primer evento tectónico transtensional del Mioceno superior (Rodríguez, 2008).

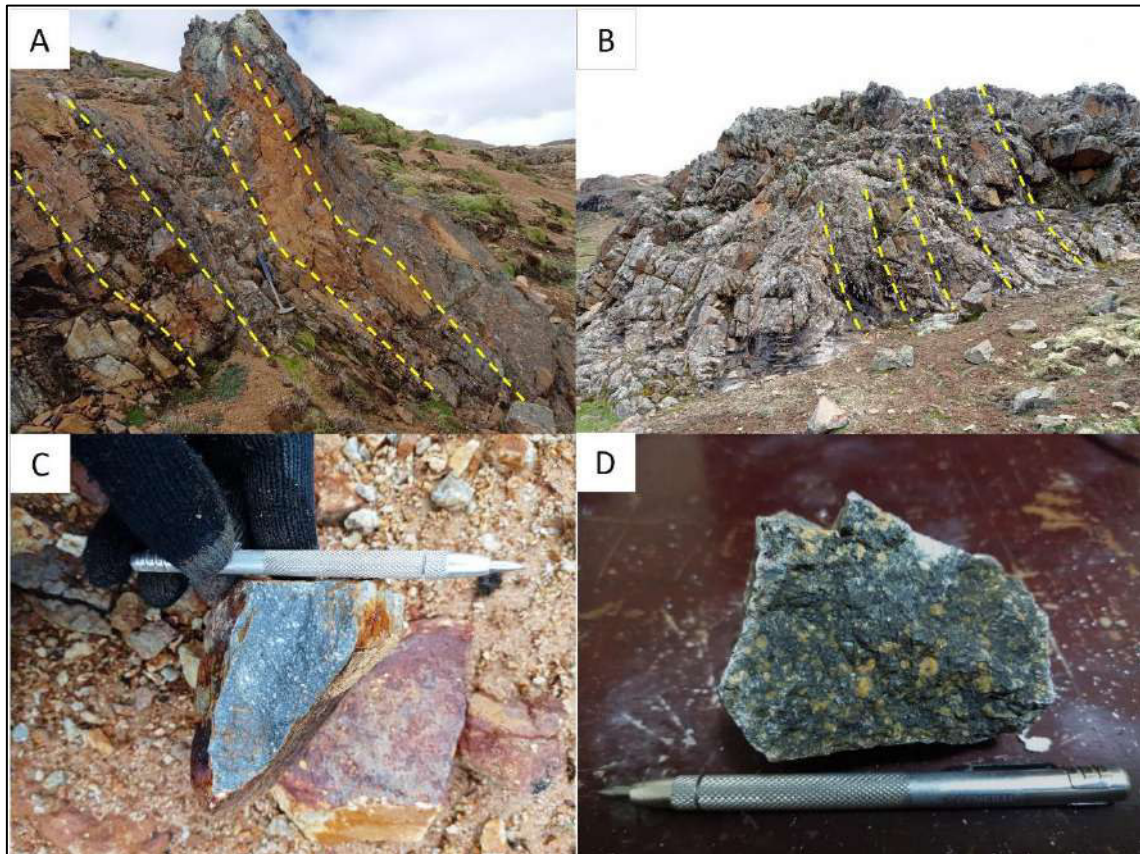


Figura 17. Domos traquiandesíticos en el sector entre Palccahuaycco y Chosecc. A y B: afloramientos de domo traquiandesítico con flow banding moderadamente inclinado. C: muestra de mano de un domo traquiandesítico con fenocristales de feldespato moderadamente carbonatizados. D: Traquiandesita porfírica con fenocristales de feldespato en una pasta microcristalina.

Los complejos de domos Chosecc y Manchaylla son grandes centros volcánicos de aspecto circular situados en el cerro Ccarhuaraso al norte de Tangana y al sureste de la Planta Recuperada, respectivamente. Consisten principalmente de varios domos traquiandesíticos y dacíticos de textura porfírica con un crecimiento endógeno multifásico, y brechas de domo marginales intercaladas con toba-brechas y de cenizas

estratificadas producto de la destrucción explosiva local de estos. Las dataciones realizadas por McKee et al. (1975), K-Ar en biotita, dan edades de 9.1 ± 0.3 Ma y 9.7 ± 0.3 Ma, respectivamente. Esto da evidencia de que su emplazamiento se dio en estructuras de apertura entre los SFC y SFHH en el primer evento tectónico del Mioceno superior.

Los domos, brechas y tobas de Chosecc y Manchaylla están cortados por estructuras con mineralización polimetálica que generan amplios halos de argilización de illita-caolinita-montmorillonita y alteración de clorita-esmectita periférica.

4.1.4.3. *Lavas de andesita rica en piroxenos*

Los afloramientos de esta unidad litológica están ampliamente distribuidos en el Distrito Minero Huachocolpa, encontrándose en su mayoría como techos remanentes sobreyaciendo a las brechas piroclásticas y domos traquiandesíticos.

Sus principales afloramientos se encuentran en la zona minera de Esperanza, Germana y Pucapunta. Se caracterizan por su color gris oscuro a negro, textura microcristalina con ocasionales plagioclasas tabulares de hasta 1 mm de tamaño, inalterado o con alteración propilítica, y magnetismo moderado a fuerte. En la mina Esperanza (Figura 18), las lavas tienen espesores de aproximadamente 50 metros y están intercalados con depósitos piroclásticos de tobas de cristales soldadas que alcanzan espesores de hasta 150 metros. Estas rocas tienen una muy notoria alteración de clorita-esmectita con ocasional hematita en las zonas someras y distales a las vetas; mientras que localmente, en profundidad, desarrollan una alteración de clorita-epidota-albita de mayor temperatura. En las cercanías a las estructuras, se presentan *stockworks* de cuarzo-pirita acompañados de una fuerte alteración argílica intermedia de illita y débil silicificación que, en el caso de las tobas de cristales soldadas, destruyen la textura original de la roca.

No se cuenta con dataciones de esta subunidad, pero su posición estratigráfica con respecto a los domos traquiandesíticos de 9.5 Ma y las estructuras mineralizadas de Esperanza de aproximadamente 6.4 Ma, considerando la misma edad que la veta Teresita (Bruha et al., 1982), permiten asignarle un rango de emplazamiento aproximado entre los 9 a 7 Ma.



Figura 18. Afloramiento de lavas andesíticas (and-px) y tobas de cristales (tb-cx) intercaladas, alrededores de la mina Esperanza.

4.1.4.4. Stocks e intrusivos de composición intermedia a félsica

En la cartografía realizada se ha podido definir afloramientos de cuerpos intrusivos y subvolcánicos porfíricos de composición diorítica a granodiorítica emplazados tanto en las rocas volcánicas de la Formación Apacheta como en las sedimentarias del Grupo Pucará.

Los intrusivos mapeados en los cuadrángulos de Huachocolpa, Huancavelica y Castrovirreyna son escasos, debido a la extensa cubierta volcánica del área. Entre los más importantes se tienen a los siguientes cuerpos ígneos:

- Intrusivo Patara: Monzonita de textura fanerítica de grano medio a porfirítica con locales zonas de skarn de piroxenos y granates. Está emplazado entre las calizas del Grupo Pucará y las subunidades volcánicas de la Formación Apacheta. Su edad, K-Ar en biotita, es de 7.9 ± 0.3 Ma (Noble y McKee, 1999).
- Intrusivo Huáscar: Diorita fanerítica equigranular a porfirítica con una extensión de 2×1.5 km², alto nivel de erosión, núcleos de alteración potásica con vetillas cuarzo-magnetita y una alteración propilítica de clorita-epidota periférica. En el contacto con las calizas del Grupo Pucará formó un skarn magnésico con mineralización marginal de Zn-Pb. Su edad, K-Ar en biotita, es de 8.2 ± 0.3 Ma (McKee et al. 1975).
- Intrusivo Mauricio: Pórfido dacítico con abundantes ojos de cuarzo y fuerte alteración de muscovita a illita. Genera un leve skarn de granates en las calizas de la Formación Chunumayo.
- Intrusivo Chosecc: Monzonita porfirítica con fenocristales de plagioclasas tabulares que alcanzan los 3cm de tamaño en una pasta microcristalina de feldespato y ferromagnesianos, moderada alteración propilítica de clorita-esmectita. Su geometría es tabular y se encuentra subhorizontalmente sobre el complejo de domos homónimo.
- Intrusivo Yen: Pórfido dacítico con ojos de cuarzo y fuerte alteración de cuarzo-illita-pirita y caolinita. Está asociado a una mineralización polimetálica del tipo enrejado.

4.1.4.5. *Intrusiones subvolcánicas ricas en biotita y depósitos volcánicos asociados*

Los últimos depósitos magmáticos y volcánicos ocurrieron entre la transición del Mioceno superior al Plioceno. Estas rocas son de composición cuarzo-latítica a dacítica que se caracterizan por tener abundante biotita diseminada. Su distribución es muy amplia en todo el distrito de Huachocolpa ocurriendo como diques, domos y depósitos piroclásticos (Figura 19).

Las intrusiones biotíticas que ocurren como diques tienen una dirección noreste-suroeste que se corresponden con los paleoesfuerzos planteados por Rodríguez (2008) para el último evento tectónico del Mioceno superior. En la mayoría de los casos, estos diques cortan perpendicularmente a las estructuras y áreas mineralizadas de Tangana, Bienaventurada, Pucapunta, Blenda Rubia y Esperanza.

Los domos biotíticos ocurren en dirección paralela al SFC disponiéndose al este de los domos tranquiandesíticos.

Brechas de líticos y cristales con matriz de cenizas, con abundante biotitas del mismo tipo, se han cartografiado en gran parte del distrito de Huachocolpa. Los principales afloramientos están al norte de Pucapampa, Rescatada y al noreste de Tangana. Se presentan estratificados con buzamientos horizontales a subhorizontales sobreyaciendo discordantemente a las demás subunidades de la Formación Apacheta. Estas brechas son polimícticas con clastos subangulosos de hasta 20 cm de diámetros, fragmentos de cristales, abundantes biotitas y una matriz de ceniza gris clara.

Las dataciones realizadas por McKee et al. (1975), K-Ar en biotita, dan edades de 3.7 ± 0.2 Ma en el domo biotítico de Huamanrimpayoc, 3.8 ± 0.2 Ma y 4.6 ± 0.2 Ma en la zona de María Luz.



Figura 19. Diferentes ocurrencias de las unidades ígneas ricas en biotita. A: Dique cuarzo-latítico rico en biotita, inmediaciones de la UM Tangana, Recuperada. B y C: Domo dacítico con textura porfírica y fenocristales de plagioclasas, sanidina y biotitas, alrededores de la mina María Luz. D y E: Brecha polimíctica estratificada con líticos, cristales rotos y ojos de cuarzo, norte de Tangana.

4.2. Metalogenia

Circundante al área de estudio los estilos de mineralización más importantes registrados son del tipo hipotermal, mesotermal y epitermal de intermedia y de alta sulfuración, con sistemas asociados de skarns, reemplazamientos de carbonatos (CRD) y epitermales de baja sulfuración; que corresponden a las franjas metalogenéticas XXI-A y XXIII de depósitos epitermales de Au-Ag del Mioceno y Mio-plioceno, respectivamente. Estas franjas están aparentemente separadas por el SFC, y entre ellas se encuentra el proyecto Arcopunco (Figura 20).

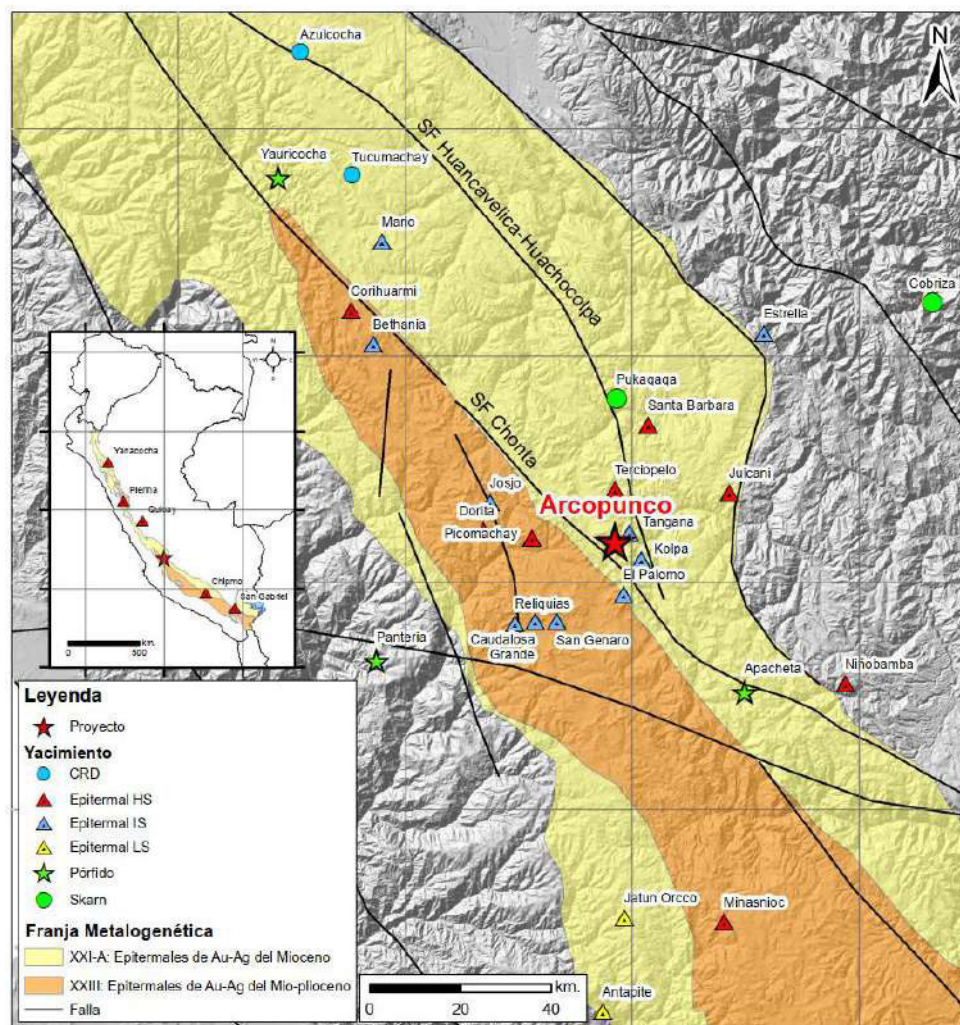


Figura 20. Mapa de las franjas metalogenéticas de los depósitos epitermales de baja, intermedia y alta sulfuración del Mioceno.

Es importante mencionar que la delimitación realizada por los diversos trabajos de INGEMMET es referencial para una escala regional; es decir, los límites de una determinada franja podrían extenderse o acortarse en algunos lugares. Por lo tanto, los estudios locales, como el presente trabajo, nos dan una perspectiva más clara de los verdaderos límites y las correcciones que dichas franjas pudieran presentar.

4.2.1. *Franja XXI-A: Epitermales de Au-Ag del Mioceno*

Esta franja se extiende a lo largo de la Cordillera Occidental del Perú entre los paralelos 5° y 17° latitud sur; estando limitada por los sistemas de fallas Conchao-Cocrachaca, Chonta y Condoroma-Caylloma en el norte, centro y sur, respectivamente. Se relaciona a los eventos de vulcanismo ocurridos durante el Eoceno al Mioceno que corresponden al Grupo Calipuy y sus equivalentes en todo el Perú. Adicionalmente, esta franja hospeda algunos de los yacimientos de oro de clase mundial; por ejemplo, Yanacocha, Lagunas Norte y Pierina (Carlotto et al. 2009).

Los principales yacimientos son del tipo epitermal de alta sulfuración que están hospedados tanto en rocas volcánicas como en sedimentarias. En el primer caso, los yacimientos de Yanacocha (12.5-11.8 Ma), Pierina (14.5 Ma), Tantahuatay, Tres Cruces, entre otros, se asocian a centros eruptivos y domos en donde se han desarrollado una alteración argílica avanzada con mineralización de Au en enargita, principalmente en las zonas de sílice residual oquerosa (Carlotto et al. 2009). El segundo caso corresponde a los yacimientos de Lagunas Norte, La Arena, Shahuindo y La Virgen; en donde la alteración argílica avanzada y la mineralización de oro se encuentran en las areniscas cuarzosa o cuarcitas de la Formación Chimú.

4.2.2. Franja XXIII: Epitermales de Au-Ag del Mio-plioceno

Esta franja metalogenética se distribuye paralelamente a los sistemas de fallas Chonta, en el centro-sur; y Condoroma-Caylloma y Chincha-Lluta, en el sur del Perú. Se caracteriza por albergar depósitos epitermales de alta sulfuración de Au-Ag y epitermales de intermedia sulfuración de Ag-Pb-Zn que tienen edades entre los 7 y 1 Ma (Carlotto et al. 2009).

En la zona de Huancavelica, esta franja se desarrolla en las unidades volcánicas de las formaciones Caudalosa y Astobamba, en el lado oeste del SFC; y la Formación Apacheta; al este. La cartografía geológica a escala 1:50 000 realizada por Valdivia y Raymundo (2003) y Cereceda et al. (2020), evidencia que estas unidades litoestratigráficas están comprendidas por centros volcánicos y domos que, en muchos casos, se ha demostrado que son favorables para hospedar la mineralización.

Los yacimientos polimetálicos de Ag-Pb-Zn ocurren como sistemas de vetas hipotermales, mesotermales y epitermales cuyas direcciones varían según su posición relativa a las fallas regionales. La cartografía de estas estructuras, así como los trabajos de Fernando J. Palero (2021), evidencian las siguientes tres tendencias de dirección (Figura 21). La primera de dirección NO-SE que corresponde al sistema de vetas mesotermales de la Unidad Minera Tangana. Estas estructuras mineralizadas también presentan vetas menores con direcciones E-O y NE-SO con evidencias de reactivaciones tectónicas (Palero, 2021). La mineralización es de Ag-Pb-Zn ocurriendo en sulfosales de plata, galena y esfalerita que están intercrecidas con rodocrosita y cuarzo. Una datación realizada por el método K-Ar en sericita da una edad 9.4 ± 0.3 Ma (Noble et al. 1999).

La segunda tendencia tiene una dirección E-O a NE-SO, que corresponde al sistema de vetas katatermales de Plata (Silver X Mining), ex-Mina Esperanza de BVN (Pérez e

Yparraguirre, 2013), y Quellomachay; que poseen una mineralización de Ag-Pb-Zn en galena argentífera y esfalerita intercrecidas con baritina, carbonatos y estibina. No se cuentan con dataciones radiométricas en este sector.

Por último, la dirección NE-SO que corresponde al sistema de vetas mesotermales-epitermales de Bienaventurada, Teresita y El Palomo; que tienen una mineralización de Ag-Pb-Zn-Cu en sulfosales y sulfuros acompañados de bandas de cuarzo (Pérez e Yparraguirre, 2013). La veta Teresita tiene una edad de 6.4 ± 0.2 Ma por el método K-Ar en sericita (Bruha et al., 1982) y las vetas de El Palomo se estima que tienen una edad de 11.5 ± 0.4 por el método K-Ar en alunita (Noble y Mckee, 1999). Estos autores también registraron una edad de 11.1 ± 0.3 Ma en la mina San Genaro bajo el mismo método radiométrico.

La mineralización de Au-Cu se da principalmente en cuerpos de brechas hidrotermales y rocas subvolcánicas, a manera de diseminados en sistemas epitermales de alta sulfuración y pórfidos. En el bloque Huancavelica-Huachocolpa están los proyectos Arcopunco y Terciopelo. El primero consta de un potencial sistema pórfido de Au con una alteración argílica avanzada de alunita-pirofilita-dickita datada en 9.5 ± 0.3 Ma, K-Ar en alunita (Noble y Mckee, 1999), en la cual, hay evidencias de texturas *patchy-wormy*. Terciopelo es un proyecto tipo pórfido-epitermal perforado en los años 2009-10 por BVN, en el cual, también se reportaron texturas “gusano” bajo un horizonte de cuarzo-alunita-pirofilita (Quiroz et al. 2010) con anomalías altas de Au, Cu y molibdeno, similar a Arcopunco.

Por otro lado, en el bloque Castrovirreyna, se tiene al proyecto Picomachay que es un epitermal de alta sulfuración en estado de exploración avanzada que cuenta con un recurso actual de 0.71 Moz (recurso medido + indicado + inferido) de oro (PAS, 2019). No existe información sobre texturas *patchy-wormy* en Picomachay.

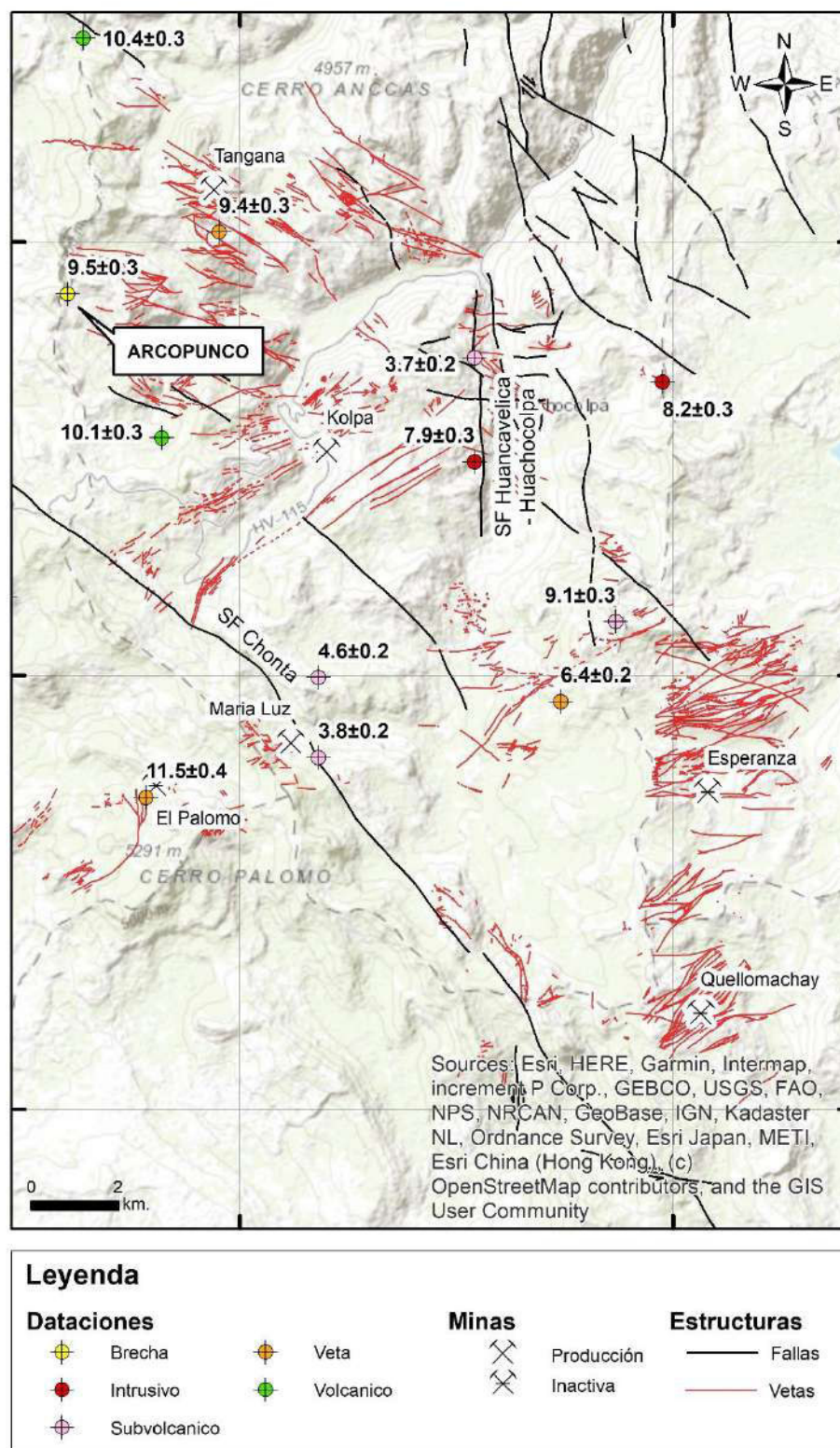


Figura 21. Mapa estructural con los principales sistemas de vetas asociados a la falla Chonta (NO-SE) y Huancavelica-Huachocolpa (N-S). Se muestra el dato radiométrico en letra negra.

Los datos geocronológicos indican que los eventos hidrotermales en los bloques Castrovirreyna y Huancavelica – Huachocolpa no ocurrieron en el mismo intervalo y que posiblemente estén temporalmente separados por una interrupción tectónica antes del Mioceno superior.

La mineralización aurífera y polimetálica del bloque Huancavelica-Huachocolpa ocurrió durante el Mioceno superior, época en la cual el SFC tuvo una cinemática sinistral (Rodríguez, 2008) que generó la apertura de estructuras romboédricas y tensionales propicias para el emplazamiento del magmatismo, fluidos hidrotermales y mineralización. El régimen, en el fracturamiento pre-vetas, fue de cizallamiento simple con una dirección principal E-W y ENE-WSW (Palero, 2021) que generó la argilización conocida en los proyectos Arcopunco y Terciopelo. Posteriormente, en la etapa de fracturamiento de vetas, las direcciones preferenciales fueron tensionales NE-SW conjugadas NW-SE y E-W que favorecieron el emplazamiento de los sistemas de vetas del distrito de Huachocolpa (Palero, 2021).

Para el cierre del sistema hidrotermal, en el Plioceno superior la cinemática del SFC fue dextral con esfuerzos N-S (Rodríguez, 2008) que generaron el emplazamiento de los diques post-minerales datados en 4.6 a 3.7 Ma (McKee et al. 1975) y reactivaciones post-vetas.

CAPITULO 5: METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

El trabajo realizado en el marco de los trabajos de exploración financiados por la compañía Altitude Discoveries, se estructuró en cuatro campañas de exploración. La primera fase se enfocó en la recopilación exhaustiva de información histórica del proyecto, incluyendo mapas geológicos, datos geoquímicos y artículos científicos, seguida del relogueo geológico de 3,566.66 metros de los 14 sondajes de BVN (2250 muestras geoquímicas) y la creación de 21 secciones geológicas a escala 1:2000. En la segunda campaña, se desarrolló una nueva cartografía geológica a escala 1:5000, con la recolección de 348 muestras para análisis geoquímico y espectroscopía SWIR, para el posterior procesamiento de datos, interpretación y definición de targets. La tercera etapa implicó la ejecución del programa de perforación de un sondaje diamantino de 852.80 metros de longitud, el logueo geológico, la elaboración de siete secciones geológicas a escala 1:4500, así como el muestreo y envío de 908 muestras de sondajes a los laboratorios. Por último, la cuarta campaña se centró en el procesamiento e interpretación de la información geoquímica y espectral, integrándola con los datos geológicos previos. De esta manera, al seguir estos pasos meticulosamente, se logró alcanzar con éxito los objetivos planteados en la presente investigación.

5.1. Tipo y diseño de la investigación

La investigación es del tipo aplicada, descriptiva y exploratoria, dirigida a resolver un problema práctico, en este caso, la identificación y caracterización de la mineralización en el proyecto Arcopunco. Esto a partir de la descripción detallada de las características geológicas y mineralógicas del proyecto, centrándose en proporcionar una visión clara de las condiciones y características del sistema mineralizado. Adicionalmente, este trabajo

reinterpreta datos históricos y explora nuevas áreas de mineralización que no fueron completamente investigadas en estudios previos.

5.2. Unidad de análisis

La unidad de análisis de este estudio está constituida de los datos geológicos obtenidos de la cartografía, geoquímica de elementos trazas y espectros de minerales de las muestras de roca y sondaje del proyecto Arcopunco.

5.3. Población

Está conformada por el conjunto de muestras de datos geológicos de las muestras de roca de superficie y sondaje del proyecto Arcopunco.

5.4. Muestra

Conformado por 348 muestras de roca de superficie y 3,158 de sondaje (908 de Altitude Discoveries y 2,250 de BVN), que dan un total de 3,506 muestras analizadas por geoquímica y por espectroscopía infrarroja de onda corta.

5.5. Cartografiado geológico

La cartografía geológica se realizó a escala 1:5000 abarcando un área total de 3,208.83 hectáreas. El método de cartografiado consistió en la toma de puntos de control con el uso de la aplicación Avenza maps. En cada punto de control se describe la litología, alteración, mineralización y estructuras asociadas.

Los afloramientos y estructuras se diseñaron en base a las descripciones tomadas en campo, y se realizó de manera digital en el software ArcGIS.

5.6. Geoquímica

Para el tratamiento estadístico de la base de datos geoquímica se utilizó las 3506 muestras de sondaje y superficie. Los análisis químicos, incluyendo los límites de detección, son diferentes para las muestras de BVN y Altitude Discoveries.

Los análisis de laboratorio de BVN se realizaron por digestión aqua regia, ensayo al fuego y vapor frío para multielemento, oro y mercurio, respectivamente; mientras que, Altitude Discoveries realizó una digestión multiácida, ensayo al fuego y vapor frío para el mismo paquete de elementos.

Todas las muestras cuentan con resultados geoquímicos completos para Au, Cu, Mo, As y mercurio. Sin embargo, para Bi y Sb más del 50% de los resultados estaban por debajo del límite de detección; y en el caso de los elementos mayores BVN no los consideró en sus análisis.

Con la finalidad de evitar sesgos en la interpretación de las concentraciones de Bi y Sb, solo se consideraron los resultados de Altitude Discoveries, ya que estos límites de detección inferiores son quinientas y cincuenta veces mayores que los actuales, lo que provocaría que todos los valores censurados fueran erróneamente considerados anómalos.

5.7. Muestreo

El método de muestreo aplicado en superficie fue de tipo rock-chip aleatorio. Se realizó mallas de 3x3, 4x4 y 5x5 en los afloramientos, tomando muestras de cada celda que posteriormente son cuarteadas para su homogenización. Se toma de 2 a 2.5 kg de muestra para su empaquetamiento.

Por otro lado, el muestreo de sondajes se realizó dividiendo el testigo en dos partes iguales utilizando una cortadora. Una mitad fue chancada con comba y empaquetada para su envío al laboratorio; mientras que la otra mitad permanece en las cajas de testigos.

5.8. Análisis de laboratorio

5.8.1. Digestión agua regia

La disolución química aqua regia es una combinación de ácido nítrico (HNO_3) y ácido clorhídrico (HCl) en un volumen de ratio de 1:3, que posee un poder de oxidación y disolución bastante fuerte (Hu y Qi 2014).

Este reactivo es muy utilizado para la exploración geoquímica por descomponer sulfuros, arseniuros, seleniuros, metales nativos (Au, Pt y Pd) y algunos minerales de Mo y wolframio. La fuerza del aqua regia puede potenciarse añadiendo Br_2 para mejorar la recuperación de Ag y Au de los sulfuros y rocas (Chao and Sanzalone, 1992).

5.8.2. Digestión multiácida

La disolución química multiácida, también llamada cuatro ácidos, es una combinación de ácido nítrico (HNO_3), ácido perclórico (HClO_4), ácido fluorhídrico (HF) y ácido clorhídrico (HCl) que es capaz de descomponer la mayoría de los minerales, incluyendo a los silicatos (Chao and Sanzalone, 1992; Zivkovic et al. 2023).

Esta técnica química, juntamente con la cuantificación de la espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), ofrece un alto y rápido rendimiento, bajos límites de detección y bajos costos; por lo que es una herramienta frecuentemente utilizada en la exploración geoquímica de las empresas mineras.

Para el caso de un estudio litogeoquímico, este método de digestión se ve limitado debido a que las recuperaciones en minerales refractarios, tales como el zircón y rutilo; así como, los HFSE y sulfatos de Ba, Sr y Pb (Hoops, 1964) serán relativamente bajas a comparación de la fusión por metaborato de litio. Adicionalmente, el uso de HF puede generar una pérdida en las concentraciones de Si, As, B, Ti, Nb, Ta, Ge, Sb, Sn y W por la formación de fluoruros (Chao and Sanzalone, 1992).

5.8.3. Ensayo al fuego

La técnica de ensayo al fuego, también conocida como *fire assay* en el inglés, es utilizada comúnmente en la exploración minera para la preconcentración y separación de metales preciosos (Au, Ag y PGEs) de minerales.

Hu y Qui (2014) describen que los metales preciosos se separan en un botón de Pb dentro de un crisol que posteriormente es calentando a temperaturas muy altas ($\sim 1000^{\circ}\text{C}$) para formar una escoria que se desecha. Luego, al enfriar, este botón se separa y se oxida para dar un gránulo oro que se puede disolver para el análisis cuantitativo.

Es recomendable analizar una gran cantidad de muestra para obtener una mejor exactitud y precisión; así como, evitar el “efecto pepita” (Hu y Qi, 2014). Para este estudio se utilizaron 100g de muestra.

5.8.4. Espectrometría absorción atómica (AAS)

En la exploración mineral el método de absorción atómica es generalmente utilizado para cuantificar las concentraciones de los metales preciosos que han sido preconcentrados por el método del ensayo al fuego. Su funcionamiento consiste en la medición de la cantidad de energía luz ultravioleta y visible absorbida por un elemento. Este proceso es llamado absorbancia, el cual tiene una relación lineal con la concentración del analito.

La espectrometría de absorción atómica a la llama consiste en el paso de una solución de muestra hacia una llama que está orientada hacia un haz de luz. Los átomos en llama permanecerán en su estado fundamental y serán capaces de absorber luz en la longitud de onda de la fuente de luz (Beaty y Kerber, 1993).

5.8.5. Espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES)

Una de las primeras técnicas de espectrometría de plasma acoplado (ICP) es la espectrometría de emisión óptica ICP (ICP-OES), también conocida como espectrometría de emisión atómica ICP (ICP-AES), que utiliza una fuente de luz con una temperatura de 6000 a 10000K (Rollinson y Pease, 2021). Este método es ampliamente utilizado para medir la mayoría de los elementos de la tabla periódica con límites de detección bajos y buena precisión en varios órdenes de magnitud.

5.8.6. Espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS)

La espectrometría de masas ICP utiliza el principio homónimo, en el cual, las muestras de roca disueltas son ionizadas y, de acuerdo con su masa atómica, son separadas en respuesta a las fuerzas magnéticas ejercidas por un potente electroimán (Rollinson y Pease, 2021). Este método analítico es usado ampliamente para análisis elementales e isotópicos; siendo capaz de cuantificar niveles ultra trazas o con límites de detección muy bajos en el rango de partes por trillón (ppt).

5.8.7. Espectroscopía de luz infrarroja de onda corta (SWIR)

La espectroscopía de luz infrarroja es una técnica directa muy utilizada en las campañas de exploración porque permite identificar minerales que no pueden ser visualmente diferenciados. Se basa en el comportamiento de las ondas del espectro electromagnético en el rango de luz infrarroja de onda corta (1300 a 2500 nm) que son emitidas y absorbidas por determinadas moléculas de los minerales. Este fenómeno genera un único espectro de absorción para cada mineral.

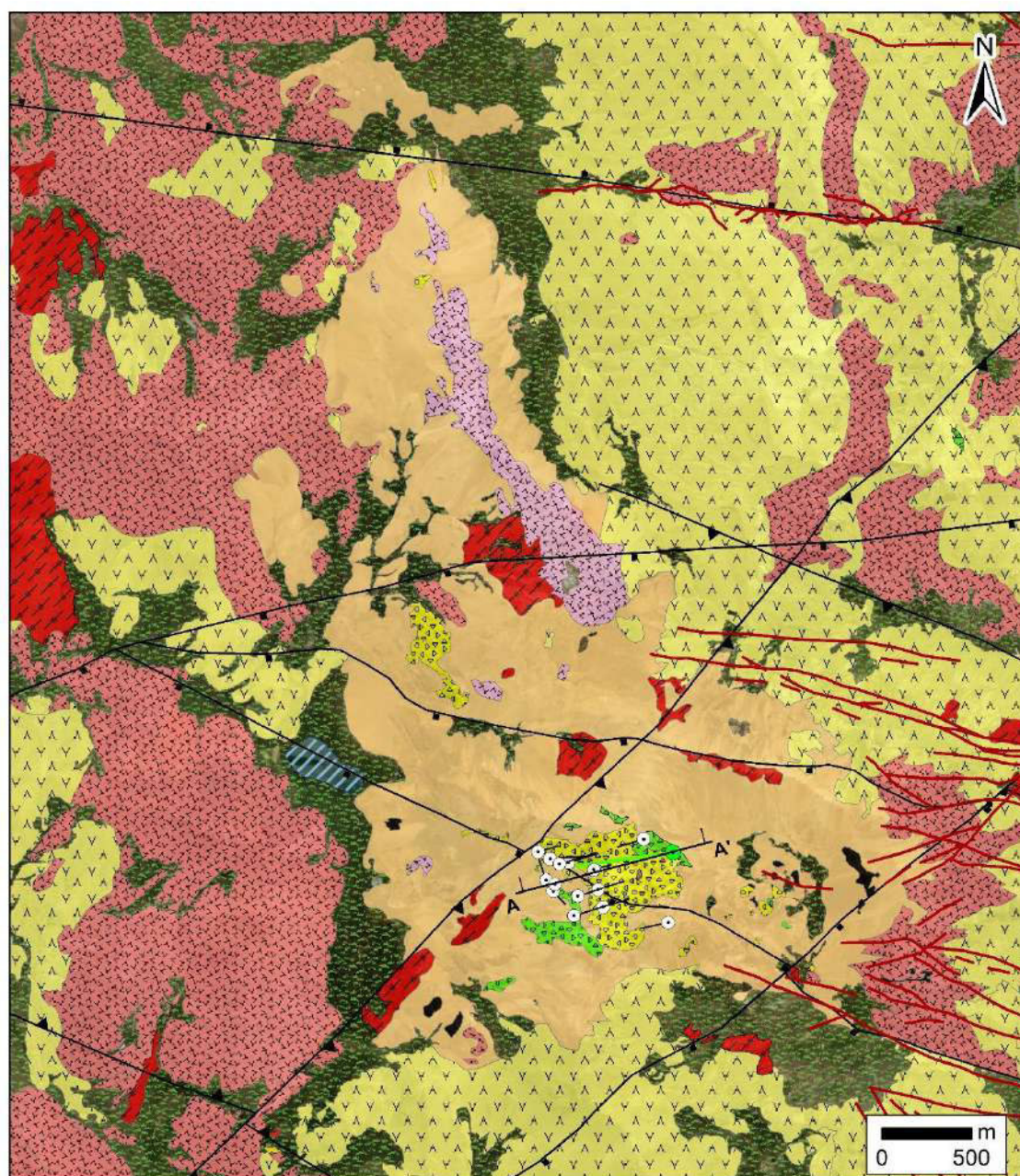
CAPITULO 6: RESULTADOS

6.1. Unidades litológicas

La base litológica del proyecto Arcopunco está constituida por múltiples intrusiones de alto nivel, emplazadas por encima de los 2 km de profundidad, que se formaron en el techo de un hipotético Batolito (McKee y Noble 1982). Estas rocas hipoabisales, y sus brechas relacionadas, están divididas en diferentes etapas con respecto a la mineralización, basándose en las relaciones de corte, alteraciones, vetillas y leyes.

El sistema magmático-hidrotermal de Arcopunco está hospedado en la Formación Apacheta a través de fallas conjugadas de dirección noreste-suroeste y este-oeste en las que se encuentran muy bien alineados pórfidos interminerales y tardíos que cortan a una andesita porfirítica. Centros de brechas hidrotermales y freatomagmáticas ocurrieron durante el evento de alteración argílica avanzada. Todo esto fue sellado por un domo dacítico que, debido a las reactivaciones tectónicas post-minerales, se encuentra parcialmente preservado en el sector norte del proyecto (Figura 22 y 23).

A continuación, se describen las unidades litológicas definidas en el proyecto en orden cronológico de emplazamiento.



Leyenda

Domo Dacítico	Intrusivo Diorítico	Domo Andesítico	Falla inversa
Brecha Hidrotermal	Andesita porfirítica	Fm. Apacheta	Falla normal
Brecha Freatica	Andesita Piroxénica	Bofedal	Vetas
		Laguna	BVN
		Sección A-A'	Altitude

Figura 22. Mapa geológico de Arcopunco. Se muestran los sondajes realizados por BVN (1997) y Altitude Discoveries (2021).

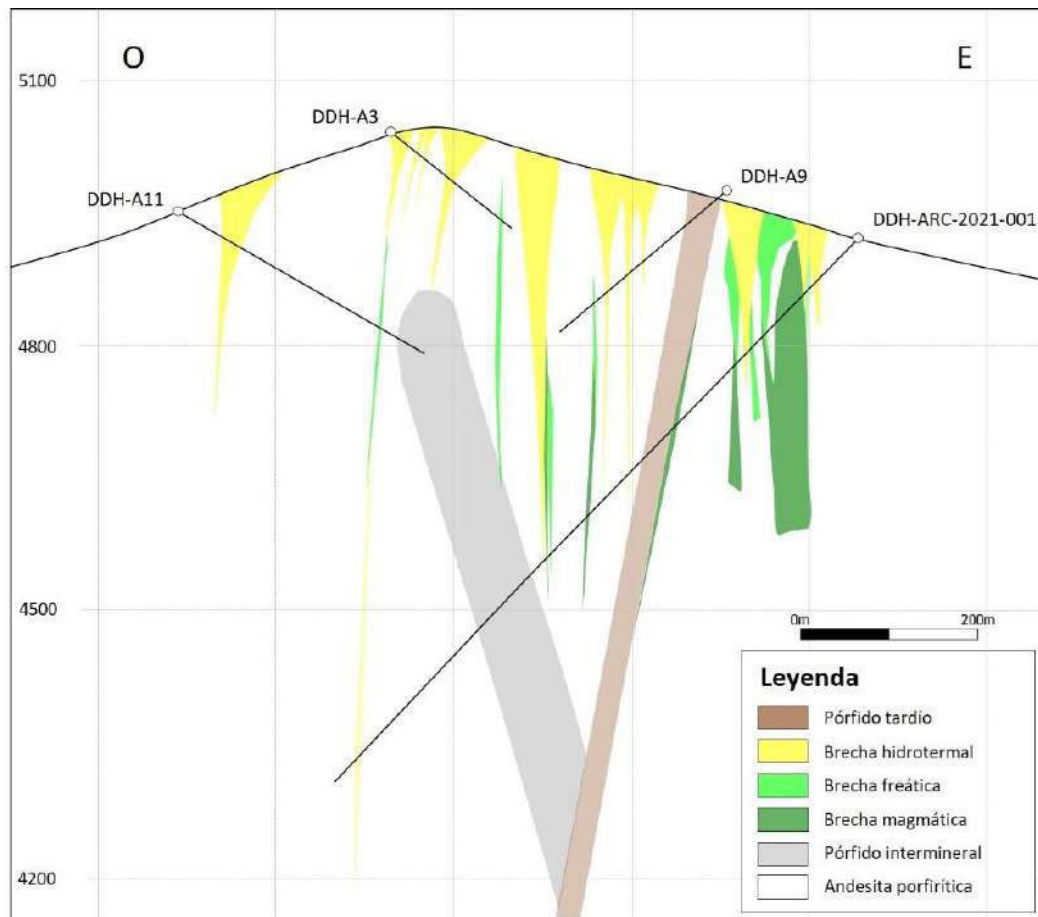


Figura 23. Sección longitudinal litológica A-A' del sondaje DDH-ARC-2021-001 (Fuente: Carlos Saban).

6.1.1. Andesita porfírica

La andesita porfírica ocurre como una roca ígnea de techo plano de 6 x 5 km² emplazada en las autobrechas de la Formación Apacheta. Comúnmente se presenta argilizada y obliterada, preservando su textura original solo en las zonas con menor intensidad de alteración.

Inmediatamente debajo de los núcleos brecha hidrotermal, la andesita porfírica muestra texturas de alteración tipo *patchy-wormy* (Figura 24), acompañadas, ocasionalmente, con estructuras menores de textura de cuarzo residual *vuggy* y porosidad móldica.

En las zonas de contacto con el pórfido intermineral se desarrollaron *stockworks* de cuarzo gris oscuro que contienen la principal mineralización del proyecto. En las partes altas del sistema, un moderado vetilleo de cuarzo-pirita y pirita-enargita cortan a esta roca.

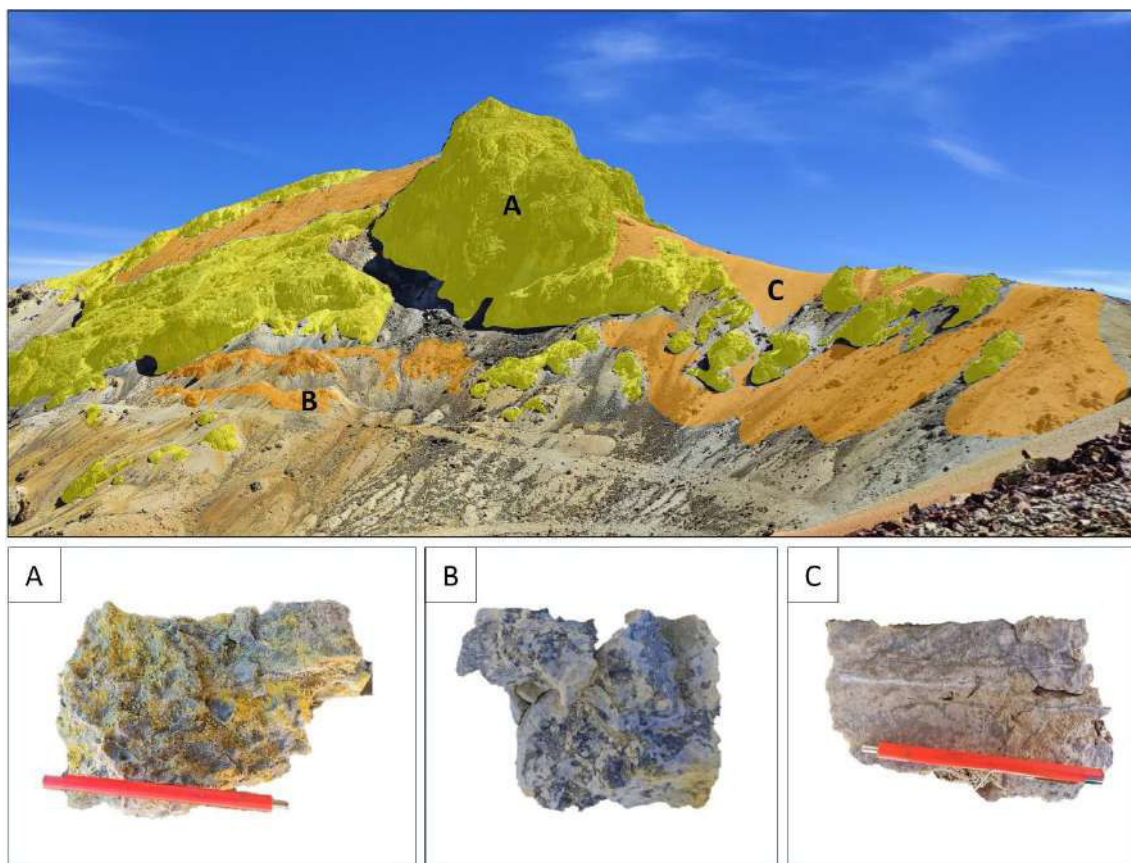


Figura 24. Afloramiento del principal cluster de brecha hidrotermal explorado en Arcopunco. A: brecha hidrotermal monomíctica con clastos angulosos de sílice gris, en un cemento de alunita rosada con abundantes parches de pararejalgar. B: Andesita porfirítica obliterada con textura patchy-wormy. C: Andesita porfirítica obliterada con fuerte alteración argílica, cortada por vetillas de cuarzo-pirita.

6.1.2. Pórfido diorítico intermineral

Este pórfido intermineral se caracteriza por tener un textura porfirítica con fenocristales de plagioclasas alterados a illita/esmectita, biotitas parcialmente reemplazadas por fengita e illita fengítica en sus planos de clivaje; menor feldespato K con débil alteración de illita K y una matriz cristalina con fuerte alteración de caolinita-sericita con pirita (Figura 25).

Este pórfido está cortado por múltiples generaciones de vetillas. Escasas vetillas de biotita secundaria están cortadas por vetillas de yeso con halos de biotita secundaria y fengita, y estas a su vez, son cortadas por escasas vetillas de cuarzo granular, pirita y menor pirita-sericita.

En el sondaje DDH-A11 se reconoció xenolitos de un pórfido posiblemente temprano, con vetillas de cuarzo y sutura de pirita tipo “AB” (Figura 26). En las zonas de contacto con la andesita porfírica, se desarrollaron halos de hasta unos 40 m de ancho de *stockwork* de cuarzo gris oscuro con mineralización de oro y cobre.

La geometría de contacto vista en la cartografía geológica de superficie y sondajes le atribuyen la forma de diques.

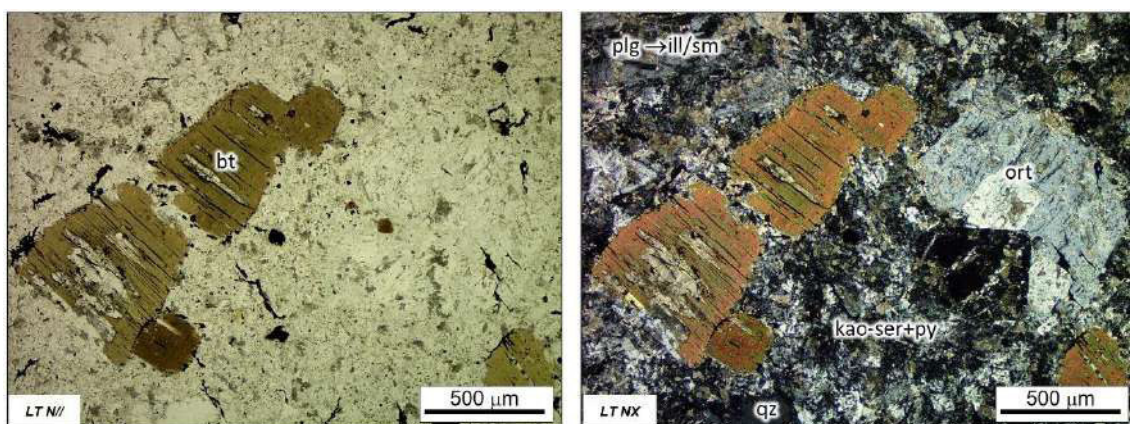


Figura 25. Fotomicrografías del pórfido diorítico intermineral del sondaje DDH-ARC-2021-001. LT: luz transmitida, N//: nicoles paralelos, NX: nicoles cruzados.



Figura 26. Dique diorítico intermineral con clastos redondeados de un pórfido temprano(?) que tiene vetillas tipo “AB” con sutura de pirita-calcopirita.

6.1.3. Pórfidos tardíos

Corresponden a intrusiones tardías y de menor relevancia que cortan a las unidades litológicas anteriormente descritas. Suelen encontrarse débilmente alterados con escasas venillas de pirita.

6.1.4. Brechas hidrotermales y freatomagmáticas

Las brechas hidrotermales ocurren en conjuntos o *clusters* de cuerpos verticales a subverticales, emplazados durante la etapa epitermal. Estas brechas tienen una extensión de hasta 1.8 x 0.7 km² y sus raíces profundizan al menos 500 metros por debajo de la superficie, gradando paulatinamente a un ambiente dominado por brechas freáticas y freatomagmáticas, y estas a su vez a brechas magmáticas.

Las brechas de naturaleza hidrotermal son frecuentemente monomícticas, con clastos líticos subangulosos de la andesita porfirítica silicificada y cemento de sílice, alunita, pirofilita y dickita; con diseminaciones de pirita, pararejalgar y ocasionalmente enargita, las cuales también puede formar parte del cemento (Figura 27A y B).

Por otro lado, las brechas freatomagmáticas son polimícticas, con clastos líticos subredondeados de distintas fases intrusivas con alteraciones argílica, silicificación y filica; también poseen clastos juveniles con bordes de corrosión. La matriz es de polvo de roca gris oscura que, a menudo, se encuentra argilizada a illita-esmectita con aspecto blanquecino (Figura 27C).

En el DDH-ARC-A06 se identificaron canales de tufisita, brecha freática muy fina, gris oscura a parda oscura cortando a la andesita porfirítica argilizada (Figura 27D).

Noble & McKee (1999) dataron, por el método de K-Ar, una alunita del centro de brecha hidrotermal de Arcopunco que dio una edad de 9.5 ± 0.3 Ma para la formación de estas en el evento de alteración argílica avanzada.

6.1.5. Domo dacítico

El evento de formación de domos corresponde al último pulso magmático que selló el sistema mineral de Arcopunco. Esto se evidencia con el sondaje DDH-A14, donde un domo dacítico corta todas las unidades litológicas y, en superficie, el domo tiene una disposición tabular subhorizontal al norte del proyecto. Estas observaciones confirman la relación de corte y superposición de los domos respecto a las unidades litológicas previas.

Esta roca se encuentra débilmente argilizada, conservando la textura porfirítica original. Su mejor exposición está en la zona norte del proyecto, en donde se puede observar un cuerpo tabular de roca gris oscura con fenocristales de plagioclasas tabulares inmersos en una pasta microcristalina de cuarzo, feldespatos y ferromagnesianos.

Debido a los movimientos tectónicos postminerales, los domos dacíticos se encuentran como techos remanentes sobre las rocas argilizadas.

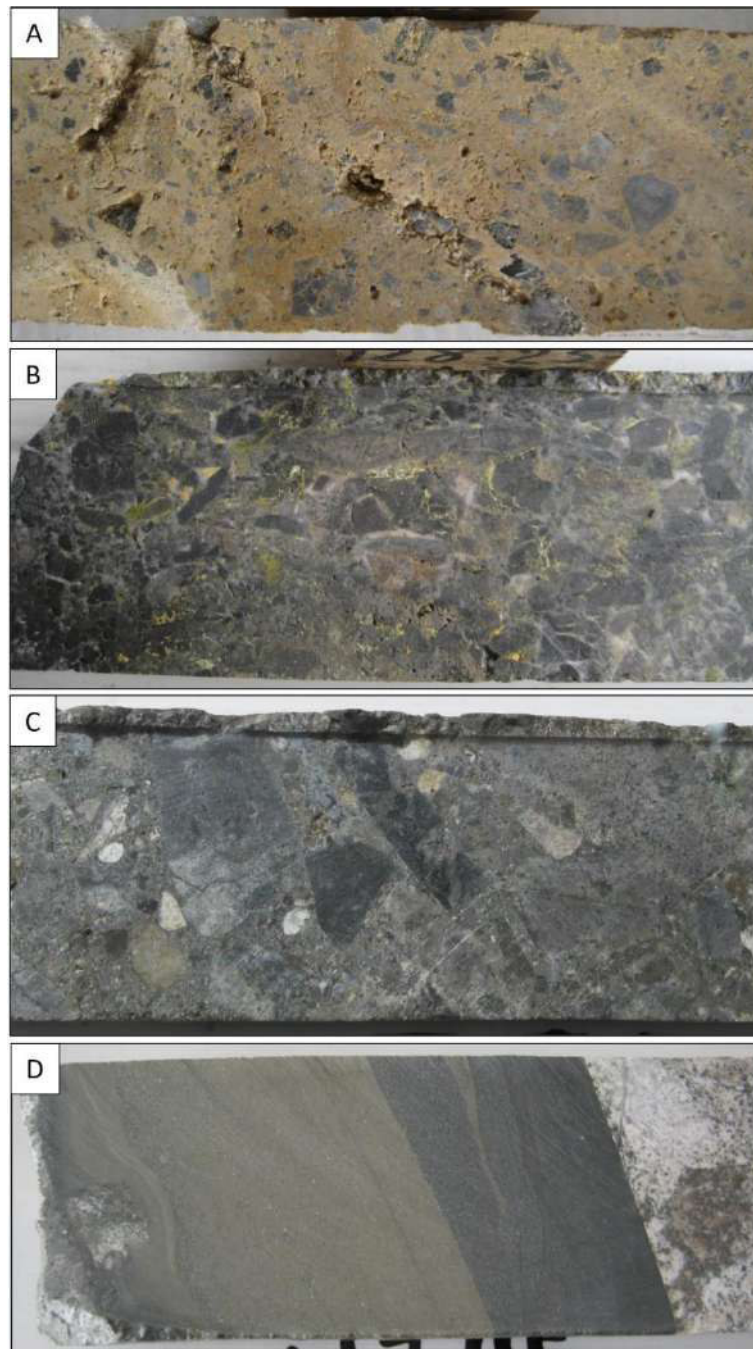


Figura 27. Muestras de sondajes de brechas hidrotermales y freatomagmáticas. A: brecha hidrotermal monomíctica con clastos subangulosos silicificados, cemento de alunita con oquedades de lixiviación de sulfuros, zona de óxidos. B: brecha hidrotermal monomíctica con cemento de alunita-sílice con pararejalgar en los intersticios. C: brecha freatomagmática polimíctica con clastos subangulosos a subredondeados, matriz de polvo de roca gris. D: tufisita de polvo de roca gris oscuro a verde oliva oscuro con estructura interna de laminaciones.

6.2. Alteración hidrotermal

Las alteraciones hidrotermales que predominan en Arcopunco son del tipo argílica, que abarcan una extensión de 6 x 5 km² de extensión y una profundidad de 800 m. Alteran a la gran mayoría de los pórfidos, brechas hidrotermales y freatomagmáticas. Estas alteraciones se presentan zonificadas desde núcleos ácidos de argílica avanzada con alunita-pirofilita-dickita, rodeados de halos proximales de caolinita-illita de la argílica intermedia, a halos distales de illita-esmectita de la alteración argílica. En el pórfido intermineral se observa una alteración filica de fengita remanente, reemplazada por illita de composición fengítica. Fuera del área del proyecto, la alteración distrital es de illita-clorita que está asociada al emplazamiento de los sistemas de vetas (Figura 28 y 29).

Los análisis de espectroscopía SWIR, a través del TerraSpec ASD, fueron realizados tanto en muestras de superficie como de sondajes, con la finalidad de obtener una mayor resolución de los minerales que conforman los diferentes eventos de alteración hidrotermal. Esta información, complementada con las observaciones macroscópicas y geoquímicas, permitió determinar diez ensambles mineralógicos de alteración diferenciados principalmente por el grado de hidrólisis y su contenido de metales y volátiles.

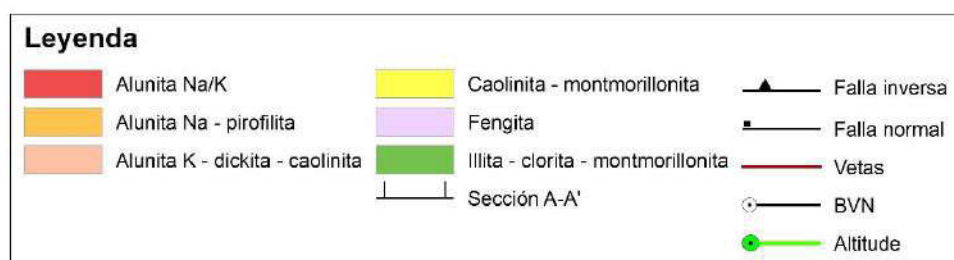
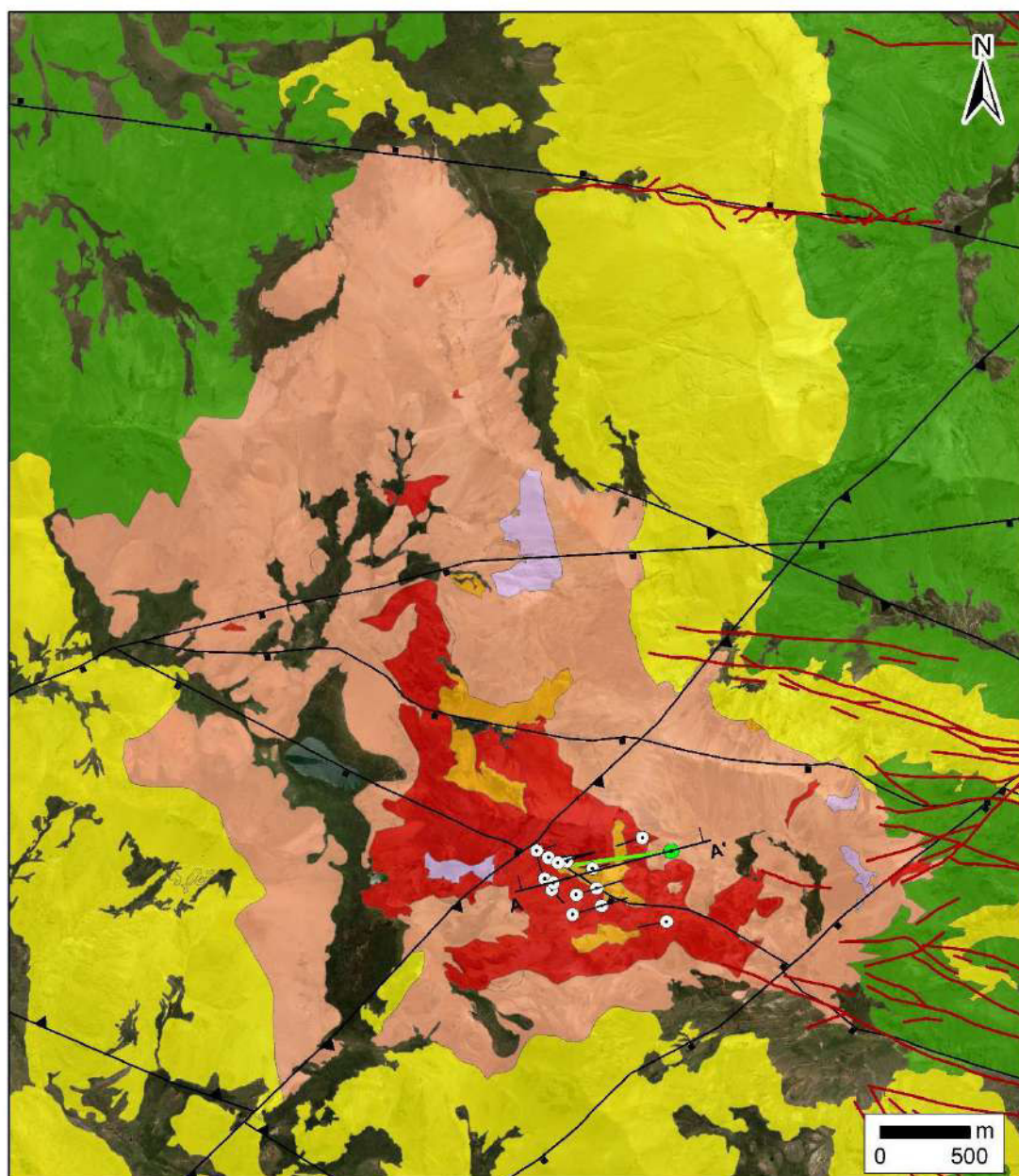


Figura 28. Mapa de alteración hidrotermal de Arcopunco y vetas. Se muestran los sondajes realizados por BVN (1997) y Altitude Discoveries (2021).

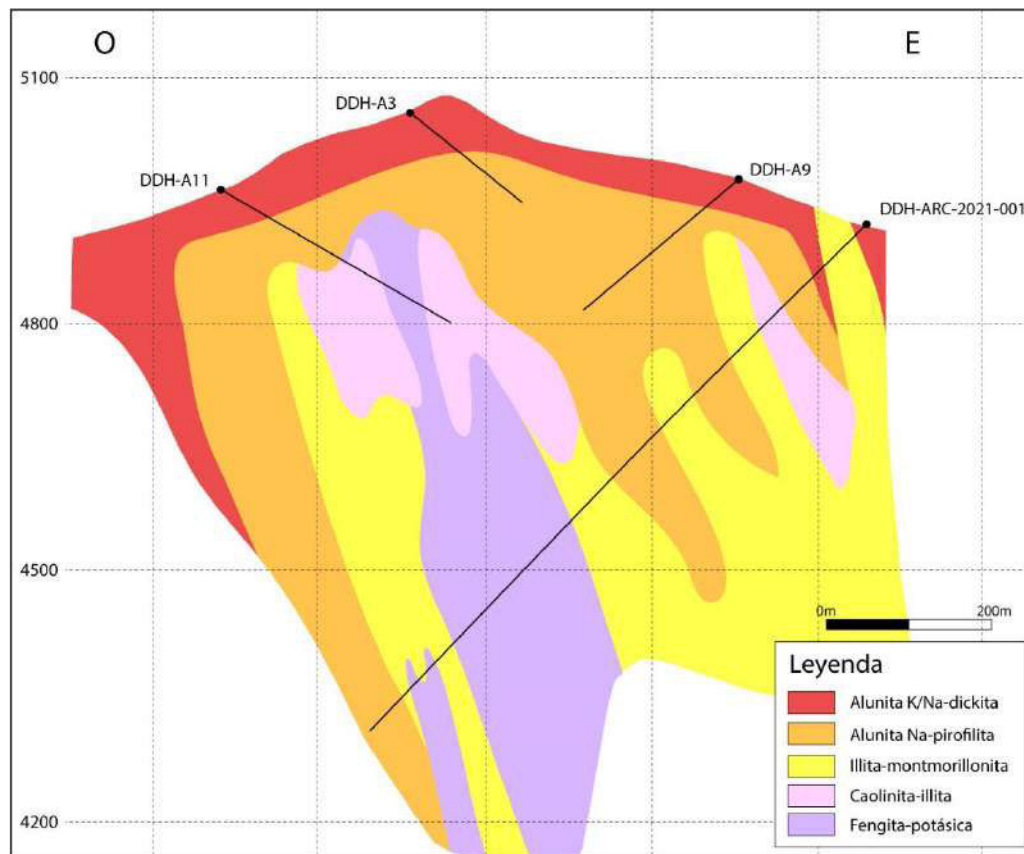


Figura 29. Sección longitudinal A-A' de la alteración hidrotermal del sondaje DDH-ARC-2021-001 (Fuente: Carlos Saban).

6.2.1. Alteración Argílica avanzada

La argílica avanzada representa el evento de mayor acidez en el sistema mineral. Esta alteración forma una extensa capa arcillosa compuesta de alunita potásica (K), alunita sódica (Na), pirofilita y dickita.

Se caracteriza por ser destructiva debido a que genera una hidrólisis avanzada a extrema con un reemplazamiento o lixiviación total de los minerales formadores de roca.

Las texturas de alteración más importantes son las *patchy* y *wormy* que se encuentran aflorando por debajo del cluster de brecha hidrotermal. Estas se disponen en forma de anillo alrededor del pórfido intermineral, y profundizan hasta los 800 m de profundidad.

Presentan diferentes grados de intensidad y, en algunos casos, los ovoides de alunita contiene sulfuros diseminados.

La alteración argílica avanzada se subdivide en los siguientes cuatro ensambles mineralógicos.

6.2.1.1. *Alunita Na – pirofilita*

Este ensamble contiene alunita Na, pirofilita y trazas de zunyita y topacio. Estos minerales indican temperaturas entre los 300 a 400°C y una acidez de aproximadamente 1 de pH. Se encuentran en la raíz de la alteración argílica avanzada, subyaciendo al ensamble de alunita Na/K – dickita. Suele presentarse como cemento de las brechas hidrotermales y reemplazando en su totalidad a la andesita porfírica.

6.2.1.2. *Alunita Na/K – dickita*

En este ensamble ocurre el reemplazo de la alunita Na por alunita K, así como la presencia de dickita con menor pirofilita. La transformación de alunita Na a K es un proceso que ocurre debido al incremento de acidez (pH de 1 a 0.4) por la propia formación de este mineral (Wang et al. 2021). Esto, junto con la disminución de la temperatura, menor a 300°C, que favorece la formación de dickita, inhibe la producción de alunita Na y favorece la ocurrencia de alunita potásica.

Esta alteración ocurre de manera cilíndrica alrededor del pórfido intermineral, alterando a la andesita temprana y convirtiendo su textura porfírica inicial en una textura *patchy-wormy*. En la zonas de los conductos de la alteración, se pueden encontrar texturas de hidrólisis extrema como el cuarzo residual vuggy ocasionalmente acompañado de diásporo, pH cercano a 0.01 (Figura 30).



Figura 30. Cuarzo residual vuggy localmente desarrollada en feeders de la alteración argílica avanzada, con protolito de andesita porfírica. Las oquedades están parcialmente rellenas con pararejalgar y se observan remanentes de vetillas de cuarzo lixiviadas.

6.2.1.3. Alunita K – dickita – caolinita – illita

Este ensamble corresponde a temperaturas menores a 200°C y una acidez de 0.4 de pH.

Se dispone como una capa subhorizontal rodeando el ensamble de alunita Na/K – dickita y su extensión abarca la totalidad del proyecto.

En los espectros SWIR es frecuente encontrar a la illita como un mineral remanente asociado a esta alteración.

6.2.2. Alteración Argílica

La argílica representa el evento de menor temperatura del sistema mineral. Esta alteración tiene una amplia distribución vertical y lateral en forma de anillo alrededor de los focos porfíricos.

Se caracteriza por ser destructiva, reemplazando la textura original de la roca por illita-montmorillonita acompañada de sílice (Figura 31). En su mayoría esta alteración se encuentra como remanentes debido a su destrucción por la alteración argílica avanzada, lo que dificulta su distinción macroscópicamente.

La alteración argílica está representada por un ensamble mineralógico.

6.2.2.1. *Illita K – montmorillonita*

Este ensamble corresponde a temperaturas entre los 150 a 200°C y una acidez aproximada de 3-4 pH. Las illitas de este ensamble están sobreimpuestas por abundante alunita K – dickita y, en menores cantidades, caolinita.

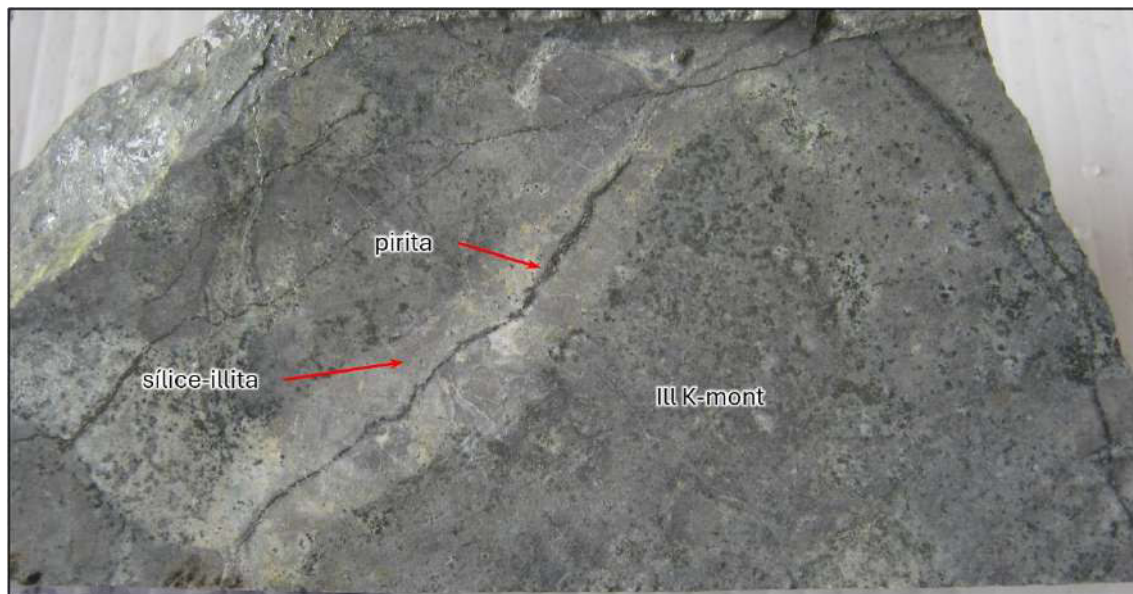


Figura 31. Andesita porfirítica con fuerte alteración argílica, venillas de pirita y halos de sílice-illita gris obliterando la textura original de la roca.

6.2.3. *Alteración Argílica intermedia*

La argílica intermedia representa un evento hidrotermal de temperatura moderada (150-350°C) y pH ligeramente ácido (3 a 4). Esta alteración tiene la geometría de embudo con sus raíces en el pórfido intermineral, zonificándose verticalmente desde illita fengítica a caolinita-dickita-illita y caolinita-montmorillonita.

La alteración argílica intermedia se subdivide en tres ensambles mineralógicos.

6.2.3.1. *Illita fengítica ± montmorillonita*

Este ensamble mineralógico se produce en el proceso de acidificación de la alteración filica del pórfido.

Se presenta de manera pervasiva y estructuralmente controlada. La primera es coincidente con la fengita, debido a que la illita se originó aprovechando la química de la alteración filica; mientras que la segunda, ocurre en los halos de las vetillas de yeso reemplazando a la biotita secundaria y fengita (Figura 32). El yeso se muestra comúnmente con una textura de crecimiento fibrosa, y se interpreta que su origen es hidrotermal a partir de la hidratación hipógena de la anhidrita.

6.2.3.2. *Caolinita – dickita – illita*

Este ensamble se formó a temperaturas entre los 200 a 300°C y un pH ácido (3 a 4). Se caracteriza por reemplazar exclusivamente a los fenocristales de plagioclasas, manteniendo la textura original de la roca (Figura 32).

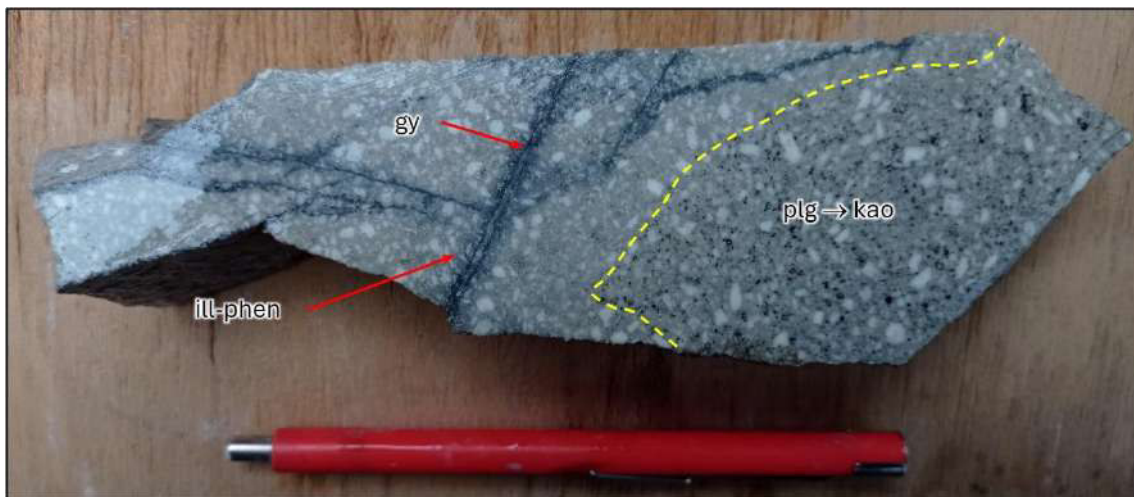


Figura 32. Pórfido intermineral con alteración argílica intermedia, vetillas de yeso con halos de illita fengítica. Caolinita distal. Ill-phen: illita fengítica, kao: caolinita, plg: plagioclasa, gy: yeso

6.2.3.3. *Caolinita – montmorillonita*

Este ensamble se produce por el enfriamiento de los fluidos que generaron la alteración de caolinita-dickita-illita. Las condiciones de formación fueron de temperaturas menores a los 200°C y sin variaciones en el pH.

6.2.4. *Alteración Fílica*

La alteración fílica representa el evento de mayor temperatura del sistema mineral. Fue detectada por los análisis de espectroscopía SWIR en pequeños afloramientos argilizados del pórfido diorítico intermineral que aún conservaban su mineralogía de alteración original de fengita. En los sondeos, se observa que la fengita es totalmente reemplazada por la illita fengítica. Su distribución se restringe a las proximidades del pórfido intermineral, asociada a los *stockworks* de cuarzo gris oscuro con mineralización de oro-cobre.

6.2.5. *Texturas patchy-wormy*

Las texturas *patchy-wormy* en Arcopunco fueron reportadas inicialmente por Vidal et al. (1997) y presentan similitudes con las observadas en Tantahuatay 2 (Tosdal 1996 en Noble et al. 2011), sugiriendo la existencia de un pórfido de cobre en profundidad.

El mapeo geológico indica que estas texturas de alteración se extienden desde la superficie, aflorando bajo el clúster de brechas hidrotermales, hasta una profundidad de 800 metros, obliterando una parte significativa de la andesita porfirítica.

Los minerales asociados a estas texturas incluyen alunita, dickita y pirofilita, con menor presencia de zunyita y diásporo en la zonas de mayor temperatura y acidez, respectivamente. Suelen estar acompañados por pirita, pararejalgar y, ocasionalmente, enargita, sobreimponiéndose a vetillas y mineralización temprana de oro-cobre (Figura 33).

La distribución de estas texturas es cilíndrica, alrededor del pórfido diorítico intermineral (Figura 34), predominando la textura *patchy* sobre la *wormy*, situándose la primera en niveles más profundos que la segunda, lo cual contrasta con lo propuesto por Pinto (2002) y Gustafson et al (2004).

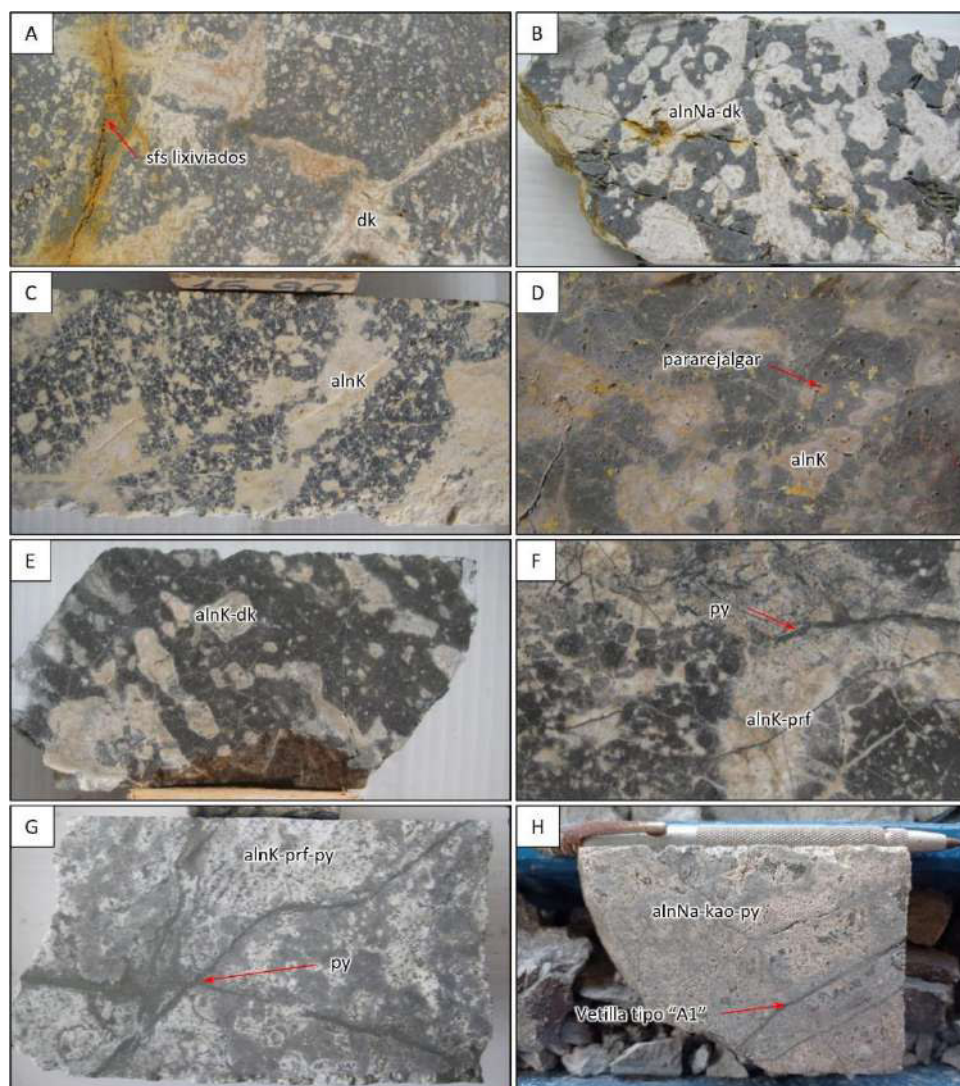


Figura 33. Muestra de sondaje con texturas de alteración *patchy* y *wormy*. A y B: textura *patchy* y *wormy* de alunita Na y dickita, cortada por vetillas tipo “C” de sulfuros lixiviados y reemplazados por óxidos de hierro. C y D: textura *patchy* y *wormy* de alunita K con oquedades de lixiviación rellenas parcialmente con pararejalgar. E: textura *wormy* de alunita K y dickita. F: Textura *patchy* de alunita K y pirofilita con aspecto brechoso, cortado por venillas tipo “C” de pirita. G: textura *wormy* y *patchy* de alunita K, pirofilita y pirita; cortada por moderado vetilleo tipo “C” de pirita. H: textura *patchy* de alunita Na, caolinita y pirita, con remanentes estables de vetillas tipo “A1” de cuarzo-magnetita. Abreviaturas: alnK: alunita potásica, alnNa: alunita sódica, dk: dickita, prf: pirofilita, py: pirita y sfs: sulfuros.

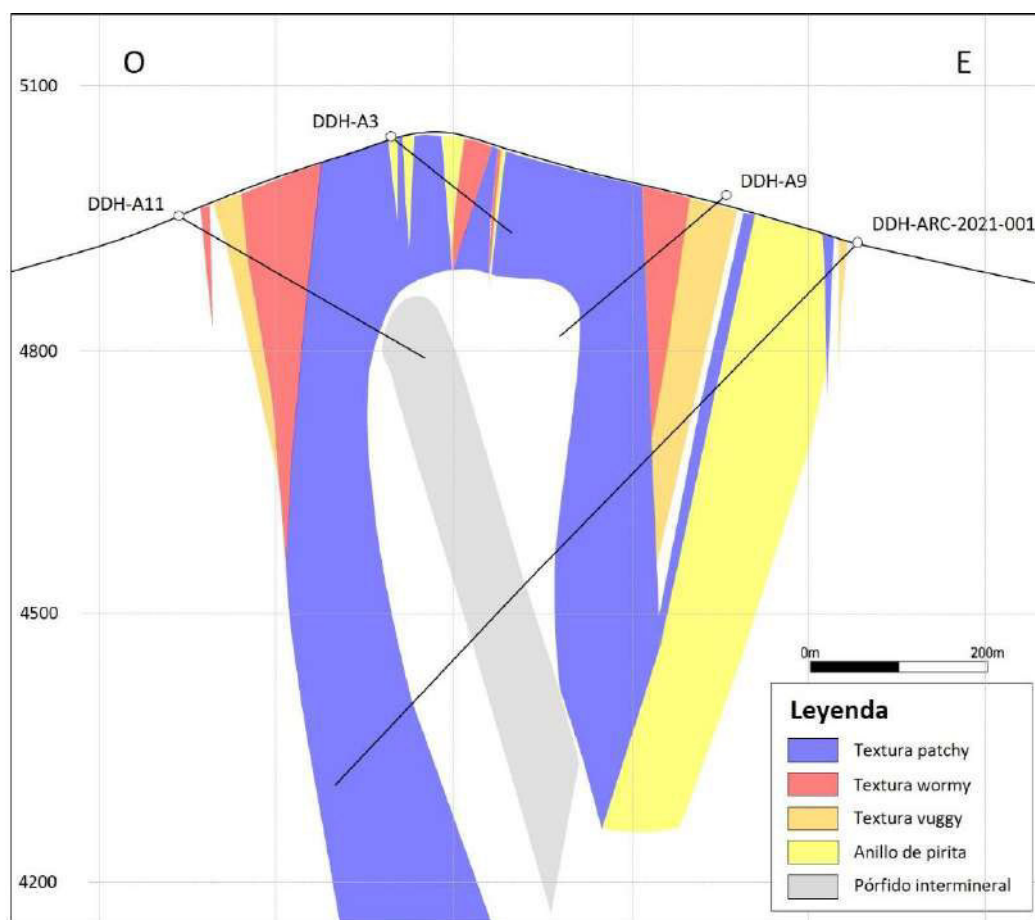


Figura 34. Sección longitudinal A-A' de texturas de alteración del sondaje DDH-ARC-2021-001 (Fuente: Carlos Saban).

6.3. Tipo de vetillas y mineralización

6.3.1. Vetillas tempranas y mineralización de oro – cobre

Las vetillas tempranas han sido reconocidas en y alrededor del pórfido diorítico intermineral. Las primeras corresponden a vetillas de biotita secundaria tipo “EB” que son cortadas por vetillas de yeso (anhidrita) $\pm$ cuarzo con halos de biotita secundaria y fengita tipo “EBT”, y estas a su vez son cortadas por vetillas de cuarzo granular tipo “A” de bajo contenido metálico (Figura 35A).

En la andesita porfirítica adyacente al pórfido diorítico intermineral se desarrolló un *stockwork* de cuarzo gris oscuro con magnetita tipo “A1” (Figura 35B), que contiene la principal mineralización de oro y cobre. Este fue interceptado a los 500 m del sondaje DDH-ARC-2021-001, el mineral ocurre en calcopirita con oro (Figura 36) y se distribuye de manera cilíndrica alrededor de todo el pórfido diorítico intermineral. Además, estas vetillas tipo “A1” son ocasionalmente cortadas por vetillas estériles tipo “A” y han sido sobreimpuestas y lixiviadas por la alteración argílica avanzada (Figura 35C).

En las zonas más profundas, aproximadamente a los 850 m de sondaje, se interceptaron escasas vetillas de anhidrita gris clara sin importantes valores de mineral (Figura 35D).

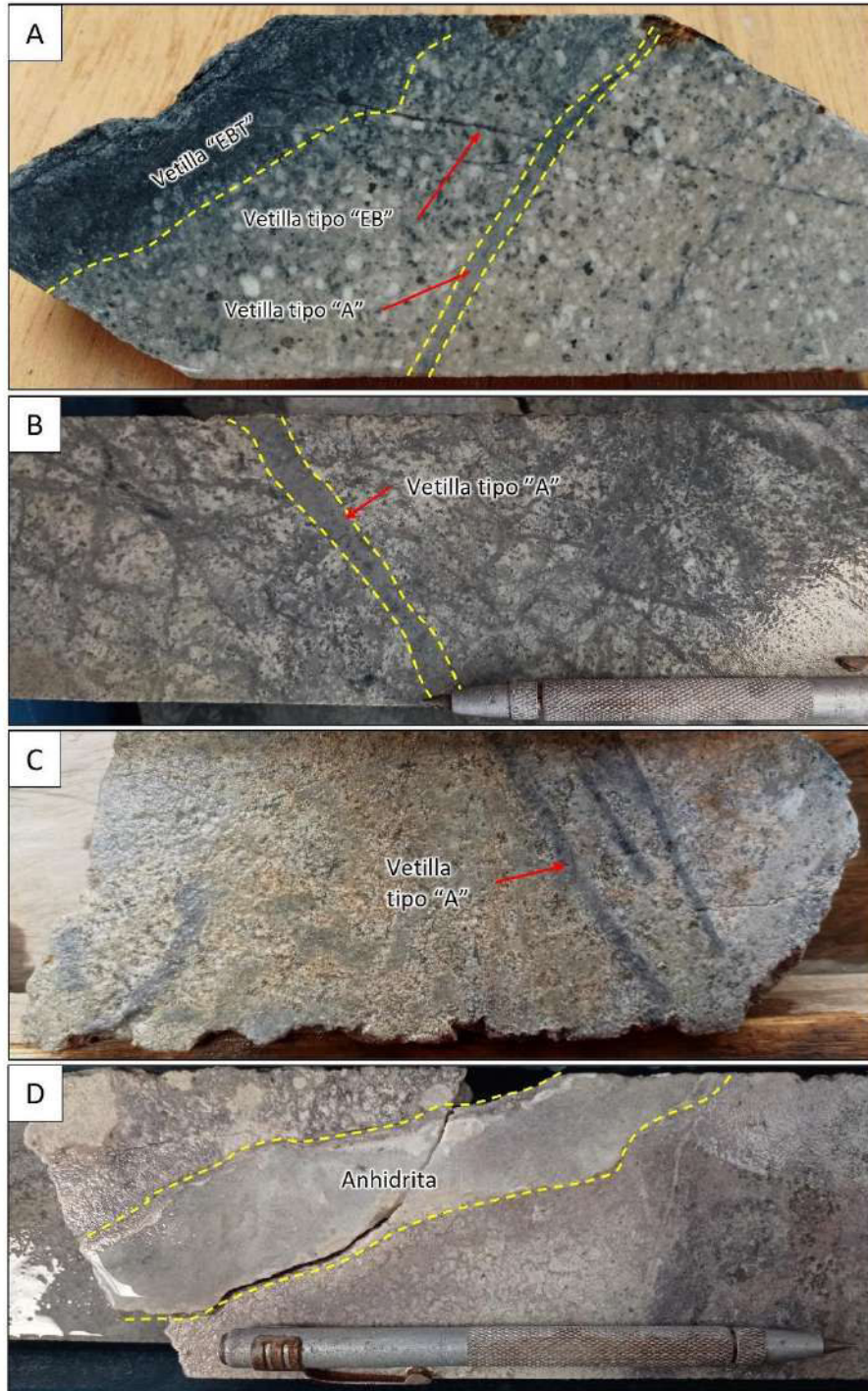


Figura 35. Muestras de sondaje de vetillas tempranas. A: Relaciones de corte entre vetillas del tipo “EB”, “EBT” y “A” en el pórfido intermineral. B: Stockwork de cuarzo-magnetita tipo “A1” con mineralización de Au-Cu, cortada por vetilla de cuarzo tipo “A” con bajo contenido metálico. C: Vetillas de cuarzo-magnetita tipo “A1” con bordes lixiviados y sobreimpuesta por la alteración argílica avanzada. D: Vetilla de anhidrita con bordes de yeso.

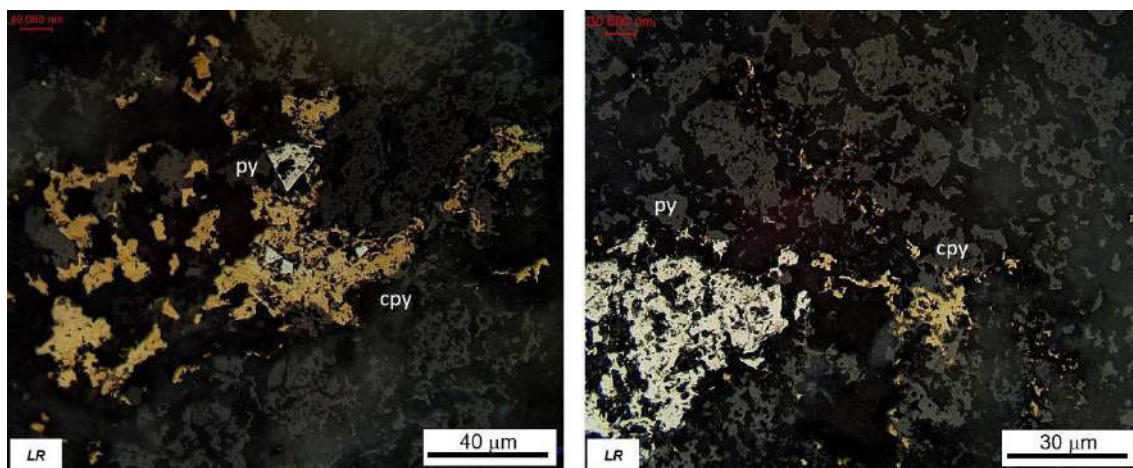


Figura 36. Fotomicrografías de calcopirita aurífera del DDH-ARC-2021-001. A la derecha, pirita cúbica formada a partir de la calcopirita. A la izquierda, pirita anhedral. cpy: calcopirita, py: pirita. LR: luz reflejada.

6.3.2. Vetillas transicionales y molibdenita hipógena

Dentro del grupo de las vetillas transicionales destaca la presencia de vetillas de cuarzo con contenido de molibdenita y calcopirita del tipo “AB”.

La molibdenita hipógena se distribuye anularmente a la mineralización temprana de Au-Cu, ocurriendo en parches, venillas acompañadas de pirita-calcopirita y vetillas de cuarzo tipo “B” (Figura 37 y 38). En algunas zonas con superposición de alteración argílica, el molibdeno se muestra como trazas, siendo un indicio de la amplitud de la alteración potásica remanente.

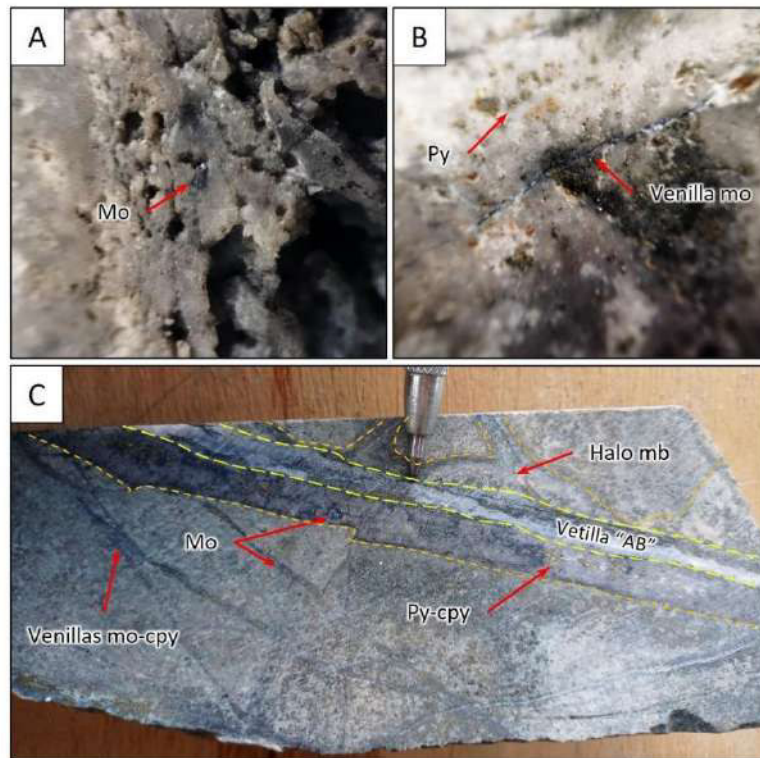


Figura 37. Tramos de sondaje ricos en molibdenita. A: Remanentes de cristales de molibdenita hipógena parcialmente lixiviada por silicificación. B: Venilla milimétrica de molibdenita con una alteración de sílice-arcillas-pirita sobreimpuesta. C: Vetilla tipo "AB" con mineralización de molibdenita-calcopirita-pirita. Abreviaturas: cpy: calcopirita, Mo: molibdenita, Py: pirita y mb: mica blanca.

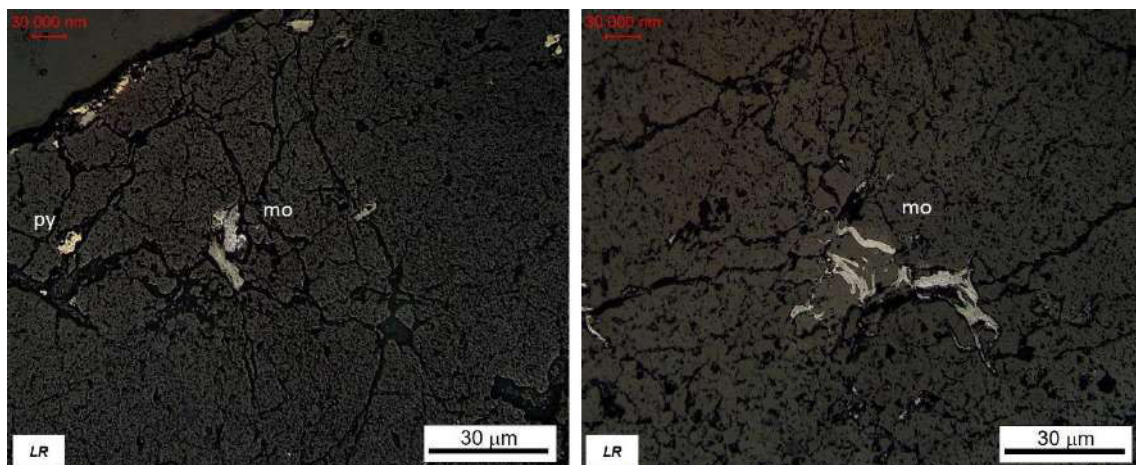


Figura 38. Fotomicrografías de molibdenita hipógena del DDH-ARC-2021-001. A la derecha se observa el mineral con hábito hojoso. A la izquierda, se presenta como hebras. LR: luz reflejada, mo: molibdenita, py: pirita.

6.3.3. Vetillas tardías y mineralización de oro

En las parte superiores del sistema mineral de Arcopunco, ocurren vetillas bandeadas de cuarzo negro y gris claro, con ligeras ondulaciones y sutura de pirita (Figura 40). Espacial y temporalmente, estas vetillas sobreyacen y cortan a las de cuarzo-magnetita tipo “A1”, y son cortadas por vetillas epitermales de pirita-enargita de un mayor estado de sulfuración.

Las leyes de oro varían entre 0.1 a 1 g/t y el Cu no supera los 500 ppm de concentración. El ratio de Cu:Au (%:ppm) promedio es de 0.08, y según Sillitoe (2000) y Muntean y Einaudi (2001) estas leyes corresponden a las de un pórfido de oro.

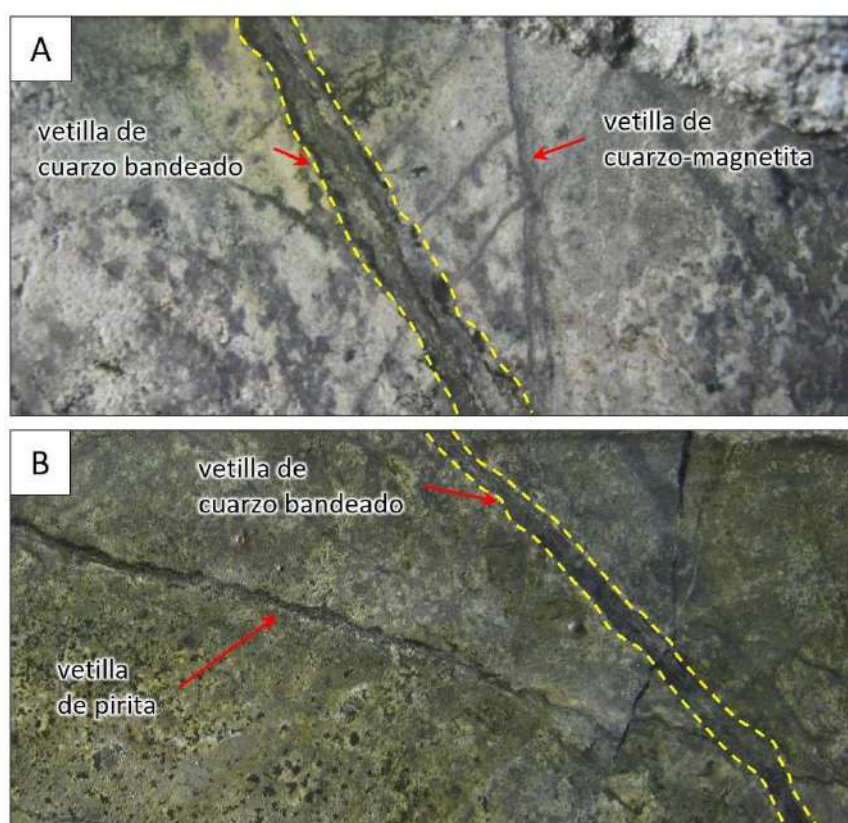


Figura 39. Muestras de sondaje de vetillas de cuarzo bandeado A. Vetilla de cuarzo con sutura de pirita y bordes de sílice, ligeramente ondulada, cortando vetillas de cuarzo tempranas. B. Vetilla de cuarzo con pirita y bordes de sílice, cortando vetilla de pirita y cortada por venilla de sílice gris.

6.3.4. Vetillas epitermales y mineralización de alta sulfuración

La mineralización de alta sulfuración está asociada a la alteración argílica avanzada, que produce una lixiviación hipógena del Au, Cu y Mo; permitiendo su concentración en la zona intermedia y alta del sistema mineral.

Esta mineralización se caracteriza por un fuerte vetilleo de pirita, con aspecto amarillo latón negruzco, que ocurre junto con enargita (Figura 40 y 41). Estas cortan escasos venilleos de pirita-covelita y son cortadas por vetillas e inyecciones de carbonatos con pirita.

La mineralización es predominantemente de oro con menor contenido de cobre en promedio. Además, se registraron anomalías sobresalientes de molibdeno mayores a 100 ppm de concentración. La molibdenita aparece como *smear molybdenite* (Figura 42), formada a partir de la removilización del molibdeno hipógeno por eventos de alteración argílica avanzada (Gustafson et al., 2004). Las fuertes anomalías de molibdeno en ambientes de argílica avanzada ha sido registradas tanto en depósitos epitermales de alta sulfuración, por ejemplo, Tantahuatay (Gustafson et al. 2004); como en pórfidos de Au como en Minas Conga (Mendoza, 2010) y en Caspiche (Sillitoe et al. 2013).

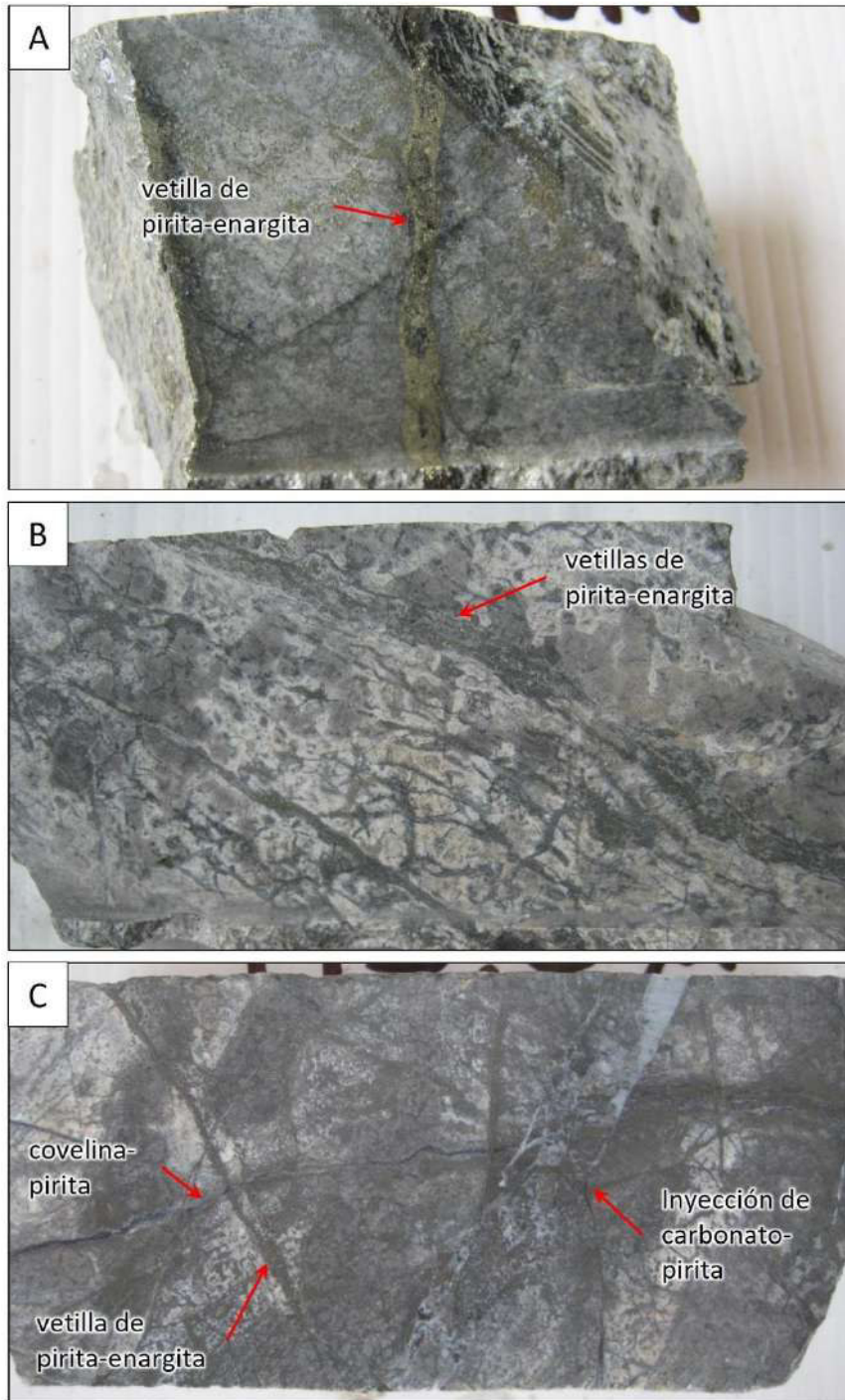


Figura 40. Muestras de sondaje de vetillas de pirita con enargita. A. Vetilla de pirita tipo "C" con enargita de grano fino en sus bordes. B. Venillas finas de pirita tipo "C" cortadas por vetillas paralelas de pirita-enargita-carbonato tipo "E". C. Vetillas de pirita-enargita cortadas por local venilleo de pirita con bordes de covelina e inyección de carbonato-pirita-enargita tipo "E".

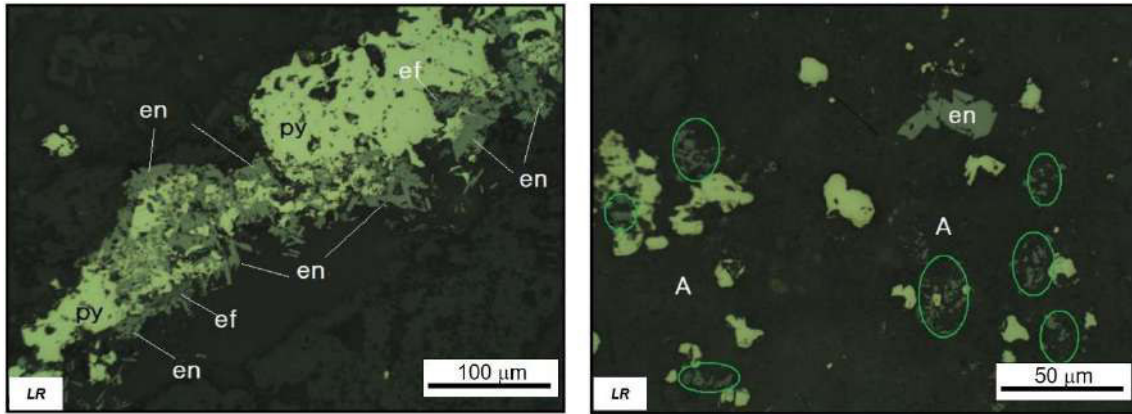


Figura 41. Fotomicrografías de enargita de los sondajes históricos de BVN. A la derecha, vetilla de pirita tipo “C” reemplazada por enargita con trazas de esfalerita. A la izquierda, cristales de enargita asociados a pirita y rutilo (elipses verdes). LR: luz reflejada. en: enargita, ef: esfalerita, py: pirita. Tomado de Canepa (2012).



Figura 42. Muestra de sondaje con smear molybdenite en fracturas.

6.4. Geoquímica

6.4.1. Geoquímica de la alteración hidrotermal

6.4.1.1. Argílica avanzada

Las más altas concentraciones de elementos volátiles ocurren en la alteración argílica avanzada (Figura 43), en donde ocurre una zonación de As-Bi, Bi-As-Sb y Hg-Sb desde zonas proximales, de alta temperatura y ácidas, a distales con mayor interacción de aguas meteóricas. Esto se corresponde con la presencia de alunita Na a K, junto con la transición de pirofilita a dickita.

La mineralización de Au-Cu y Au ocurre asociado a la enargita y pararejalgar, respectivamente (Figura 44). Sin embargo, se observa que el Au disminuye paulatinamente a valores por debajo de 0.1g/t a medida que el As incrementa sus concentraciones por encima de los 800 ppm; es decir a un estado de muy alta sulfuración. Además, en el ensamble de alunita Na/K – dickita hay valores altos en oro coincidente con las texturas patchy-wormy. Se registraron importantes anomalías de Mo que superan los 100 ppm (Figura 45), cuyo enriquecimiento se debe a la ocurrencia de *smear molybdenite*.

Los elementos mayores (Al, Ca, K, Mg y Na) tienen un alto grado de lixiviación en la argílica avanzada (Figura 46), alcanzando, en algunos casos, una hidrólisis extrema con removilización de aluminio y formación de locales zonas de cuarzo residual *vuggy*. El K y Na tienen una relación inversa y sus concentraciones están en acuerdo con los ensambles de alunita Na, Na/K y potásica. El valor promedio de Mg muestra una tendencia negativa desde el ensamble de alunita K-dickita-caolinita-illita a alunita Na-pirofilita; indicando una mayor intensidad de hidrólisis de estas alteraciones.

6.4.1.2. *Argílica*

Las concentraciones en Hg, As, Sb y Bi son relativamente bajas con respecto a la argílica avanzada, destacando solamente el bismuto (Figura 43).

Los valores de Au son bajos; mientras que el Cu y Mo son comparables con la argílica avanzada (Figura 45).

A pesar de la naturaleza pervasiva de esta alteración, el grado de hidrólisis no fue lo suficientemente fuerte para lixiviar a los elementos mayores (Figura 46).

6.4.1.3. *Argílica intermedia*

Esta alteración también tiene bajas concentraciones de elementos volátiles en comparación con la argílica avanzada y argílica (Figura 43). Sin embargo, analizando los ensambles mineralógicos de esta alteración, se observa que la illita fengítica tiene importantes valores de Bi y la caolinita-dickita-illita, así como la caolinita-montmorillonita, son predominantes en Sb y As.

La mineralización de Au-Cu es prominente en los ensambles de illita fengítica y caolinita-dickita-illita (Figura 45), siendo el mineral principal la calcopirita en el *stockwork* de vetillas de cuarzo gris oscuro. Los valores de Mo son altos debido a la ocurrencia de molibdenita en vetillas de cuarzo tipo “AB”, venillas de sulfuro y diseminado. En el ensamble de caolinita-montmorillonita las concentraciones de los metales disminuyen considerablemente por ser de carácter distal.

Los elementos mayores tienen concentraciones relativamente altas con respecto a las demás alteraciones (Figura 46). El aluminio tiene una tendencia positiva desde la illita fengítica a caolinita-dickita-illita y caolinita-montmorillonita debido al enriquecimiento de este elemento con el aumento en la abundancia de las arcillas ante las micas blancas.

Los elevados valores de Ca están relacionados a las vetillas de yeso en las zonas de illita

fengítica. Por último, el Mg permite agrupar los ensambles de illita fengítica y caolinita-dickita-illita en alteraciones con baja hidrólisis y proximales; mientras que la caolinita-montmorillonita lixivia, en mayor medida, al magnesio y es distal a los conductos alimentadores.

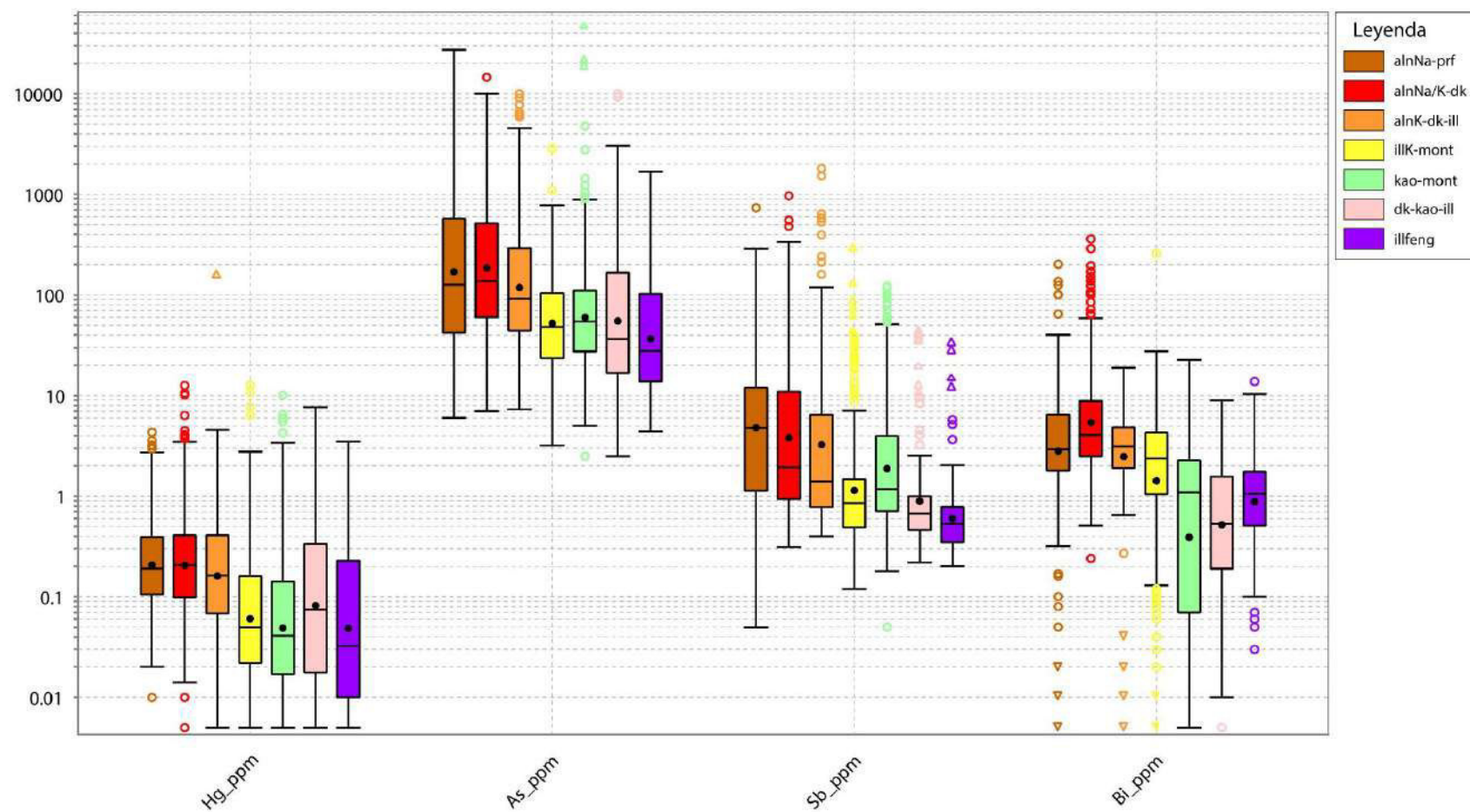


Figura 43. Gráficos boxplot de elementos volátiles (Hg, As, Sb y Bi) de los ensambles de alteración hidrotermal de Arcopunco. Eje X en escala logarítmica. alnNa: alunita Na, alnNa/K: alunita Na/K, dk: dickita, ill: illita K, illfeng: illita fengítica, mont: kao: caolinita, montmorillonita, prf: pirofilita,

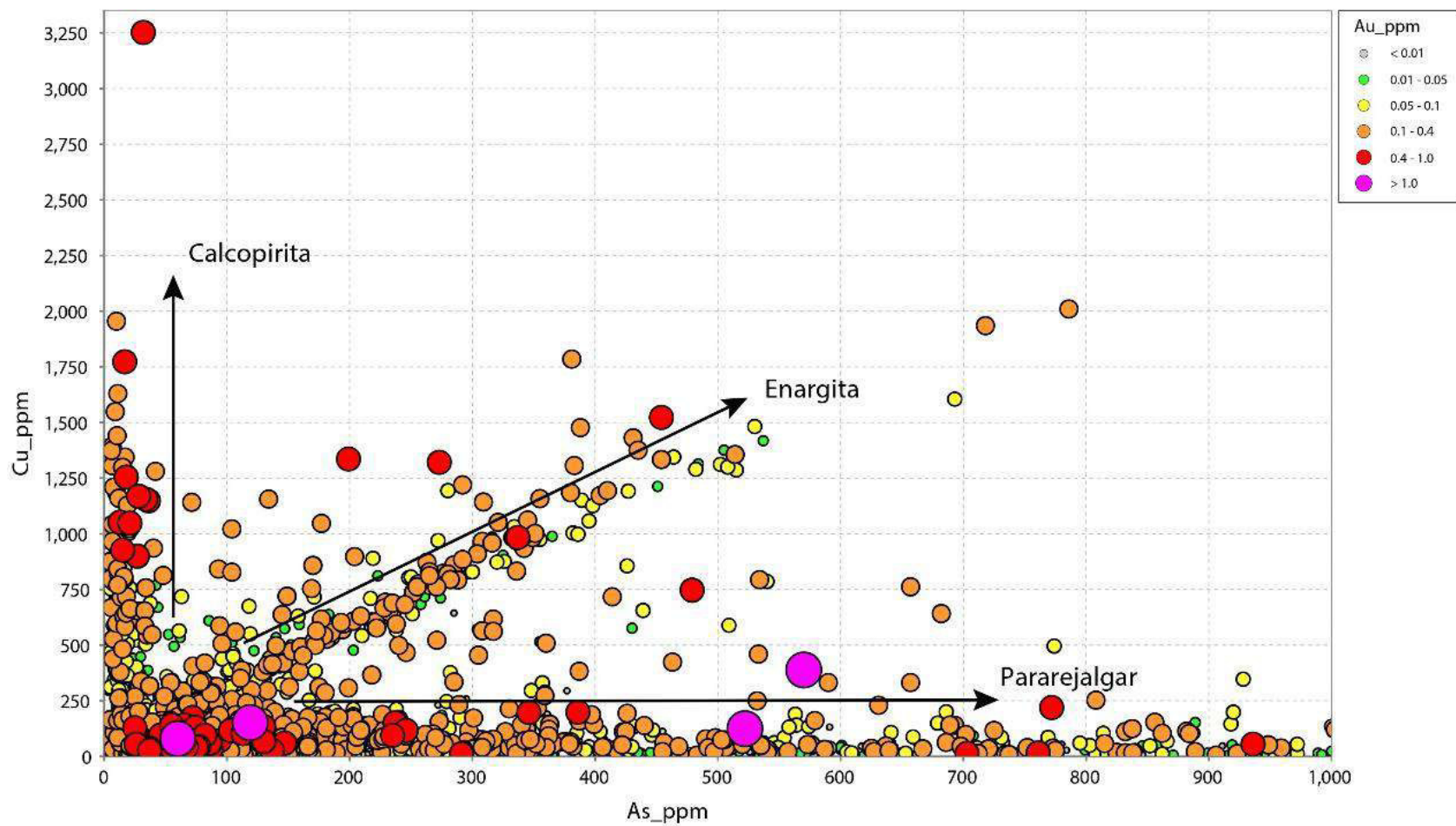


Figura 44. Gráfico de dispersión de Au, Cu y As, mostrando las tendencias de los tres estilos de mineralización de Arcopunco. Los valores de As continúan sobre los 1000 ppm.

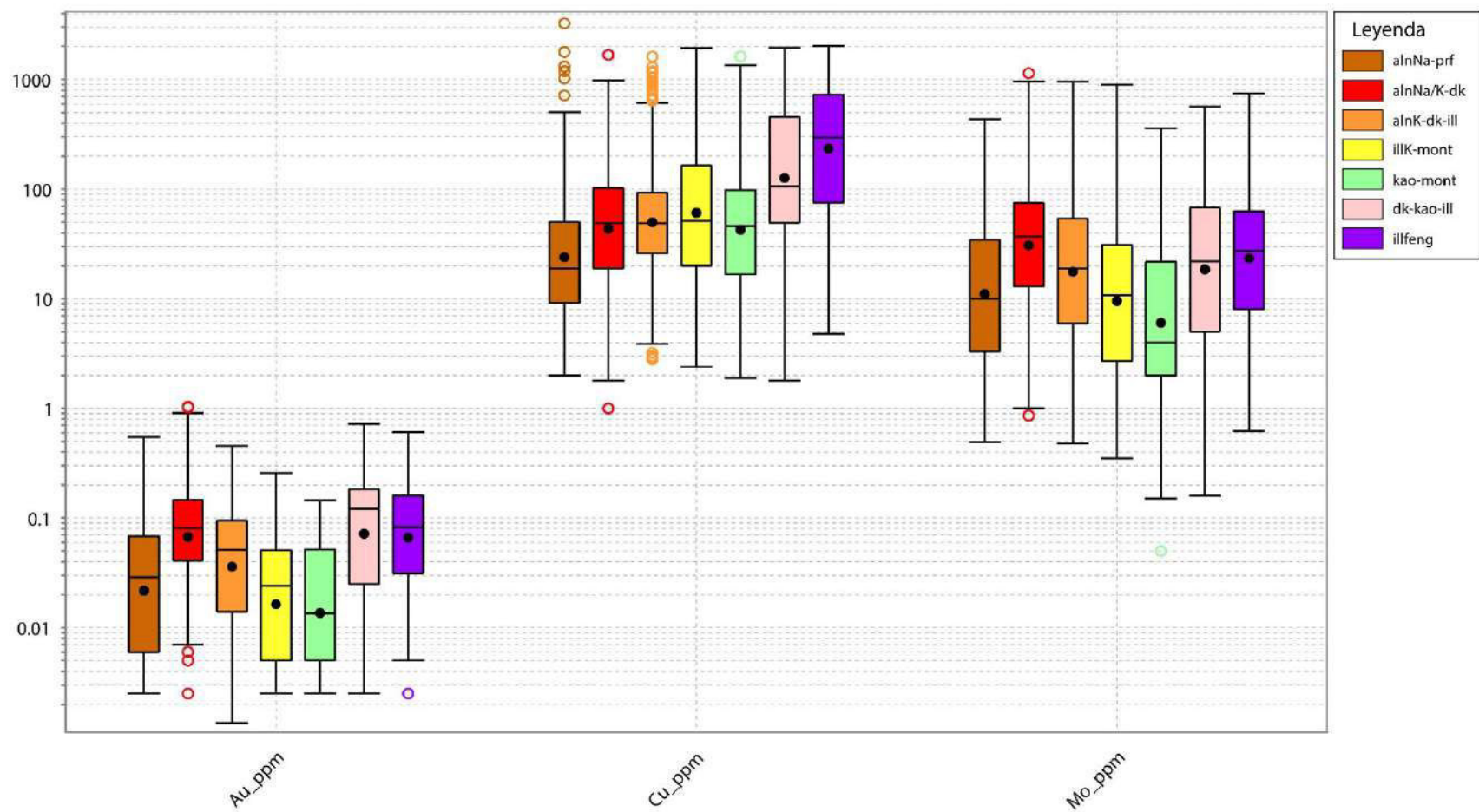


Figura 45. Gráficos boxplot de elementos metálicos (Au, Cu y Mo) de los ensambles de alteración hidrotermal de Arcopunco. Eje X en escala logarítmica. alnNa: alunita Na, alnNa/K: alunita Na/K, dk: dickita, ill: illita K, illfeng: illita fengítica, mont: kao: caolinita, montmorillonita, prf: pirofilita,

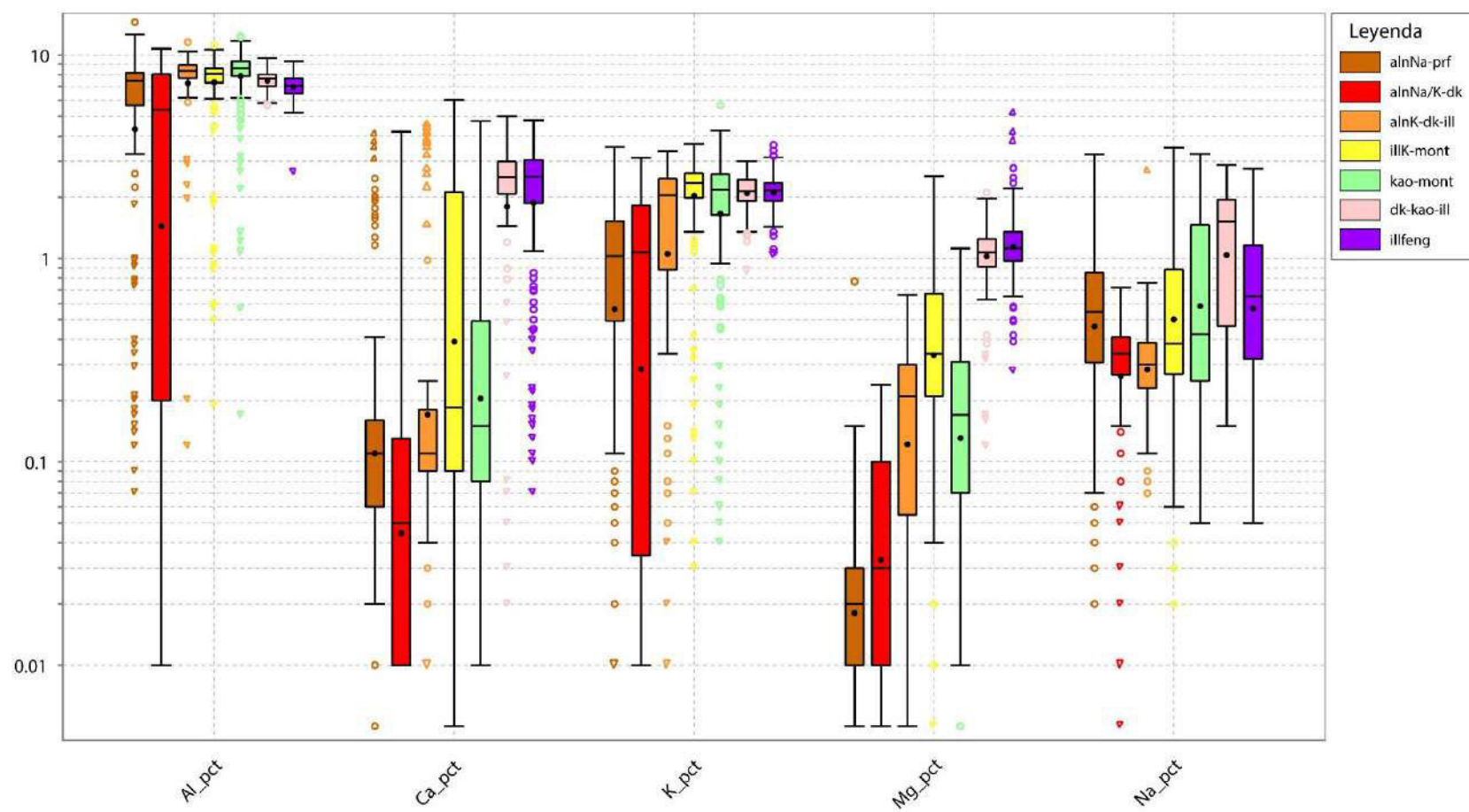


Figura 46. Gráficos boxplot de elementos mayores (Al, Ca, K, Mg y Na) de los ensambles de alteración hidrotermal de Arcopunco. Eje X en escala logarítmica. alnNa: alunita Na, alnNa/K: alunita Na/K, dk: dickita, ill: illita K, illfeng: illita fengítica, mont: kao: caolinita, montmorillonita, prf: pirofilita,

CAPITULO 7: DISCUSIÓN

7.1. Alteración hidrotermal

7.1.1. Tipos de dickita y caolinita

La caolinita y la dickita son especies minerales que pertenecen al grupo del caolín. Ambos se forman en ambientes ácidos ($\text{pH} < 3$), pero tienen una diferencia en cuanto su temperatura de formación. La dickita está presente entre los 300 y 200°C, convirtiéndose gradualmente en caolinita por debajo de los 200 hasta los 120°C; y por debajo de esta temperatura solo ocurre la caolinita (Seedorff et al. 2005).

Es muy frecuente que la dickita esté acompañada de alunita en la alteración argílica avanzada, lo que sucede de la misma manera con la caolinita en los *steam heated*. En otros casos, la caolinita es más común en la alteración argílica y argílica intermedia junto con la illita y montmorillonita.

En Arcopunco, en base a las asociaciones mineralógicas, se tienen ensambles de alunita K-dickita en la alteración argílica avanzada, y caolinita-dickita-illita y caolinita-montmorillonita en la argílica intermedia.

La interpretación geoquímica de las dickitas muestra su asociación con la argílica avanzada por su comportamiento fuertemente hidrolítico con muy bajo contenido de álcalis y metales; y con predominancia en As, Hg y azufre. Sin embargo, algunas muestras de este mineral tienen un alto contenido de Mg y Mo, así como muy bajas concentraciones de elementos volátiles. Esto da la idea de la presencia de dos tipos de dickitas con ambiente de formación diferentes, pudiendo asignar la segunda a la argílica intermedia, que es una alteración con menor grado de hidrólisis, temperaturas relativamente altas y posiblemente relacionada al evento mineral (Baldoceda et al. 2023).

La caolinitas tuvieron un resultado similar. La caolinita de la argílica intermedia tiene moderadas concentraciones de metales y escasos volátiles que, al mezclarse con aguas meteóricas, incrementa su contenido de mercurio. Por otro lado, hay cantidades menores de caolinita que acompañan a la illitaK-montmorillonita en la alteración argílica.

La distribución espacial de la dickita y caolinita de la argílica intermedia ocurre en forma de embudo al pórfido diorítico intermineral, por lo cual corresponde al evento mineral del sistema pórfido, habiéndose formado por la acidificación de la alteración filica. Por otro lado, la caolinita argílica tiene una amplia distribución, a manera de halos alrededor de todo el sistema mineral.

7.1.2. Tipos de mica blanca

Los filosilicatos blancos conformados por la moscovita, paragonita, fengita e illita tienen determinados rangos de composición, temperatura y acidez para su formación (Rieder et al. 1998). Por ello la técnica de espectroscopía de luz infrarroja SWIR es bastante utilizada para identificarlos en base a sus diferencias en las longitudes de onda y reflectividad (Thompson et al, 1999; Halley et al, 2015).

En Arcopunco predominan las illitas ante la moscovita y fengita. La distribución de este mineral es amplia y, en su mayoría, tienen longitudes de onda entre los 2191 a 2210 nm que corresponden a illitas potásicas. Por esta razón, Baldoceda et al. (2023) realizaron un análisis de la composición geoquímica de las muestras que solo contenían, o predominaba, este mineral. El resultado más importante fue que las illitas se diferenciaron muy bien por su contenido de Mg y se pudo determinar dos tipos denominadas como illita K e illita fengítica. La illita K o argílica se caracteriza por ser moderadamente hidrolítica y lixiviar elementos tales como el Mg, Na y K. Sus valores de Cu, Au y Mo son generalmente bajos, pero hay algunos valores significativos que sugirieren remanentes a

la removilización. Sus concentraciones de As, Bi y Hg son altas, lo que muestra su naturaleza hidrolítica y ácida. Todo lo anterior permite concluir que estas micas blancas corresponden a un ambiente epitermal, sin mineralización o, en algunos casos remanentes, con destrucción del sistema pórfido original.

Por otro lado, la illita fengítica de la argílica intermedia, formada a partir de la acidificación y enfriamiento de la alteración filica, tiene un menor grado de hidrólisis y no destruye la textura primigenia de la roca, ocurriendo solamente la reconstitución de los minerales de la alteración filica a illita fengítica acompañada de esfena y menor montmorillonita. Esto es corroborado por sus altas concentraciones de Mg y K, bajas concentraciones en As, Sb y Bi; y, finalmente, altos valores de Au, Cu y Mo que superan los 0.3 g/t, 0.1%, y 100 ppm, respectivamente.

Esta distinción entre los tipos de mica blanca fue crucial en la exploración de Arcopunco, ya que permitió identificar los diferentes ambientes hidrotermales en las que se formaron y su relación con el mineral.

7.2. Zonación geoquímica y estilos de mineralización

El estudio de los resultados geoquímicos nos indica que el ambiente epitermal de alta sulfuración es rico en volátiles y está superpuesto sobre el pórfido mineralizado. El Hg y As están principalmente relacionados a la alteración argílica avanzada, mientras que el Sb y Bi marcan una transición a zona de mayor profundidad y temperatura. El Bi ($\pm$ As) resalta en las zonas de alteración argílica intermedia de illita fengítica y se correlaciona con las anomalías de Au-Cu. Por lo tanto, la zonación de Hg-As-Sb a Bi ($\pm$ As) es un vector de ambientes epitermales ácidos y de baja temperatura hacia entornos de mayor temperatura relacionados a pórfidos (Figura 47).

En cuanto a los estilos de mineralización, se han registrado tres. El mineral temprano y profundo corresponde a oro y cobre en calcopirita dentro del *stockwork* de vetillas de cuarzo-magnetita tipo “A1”. Sobreyaciendo al mineral temprano, el oro se encuentra en vetillas de cuarzo bandeado ligeramente onduladas asociado a anomalías de arsénico. Por último, en la apófisis del pórfido diorítico intermineral, el oro y cobre ocurren en enargita junto con pirita en vetillas de alta sulfuración.

El molibdeno aparece como *smear molybdenite*, en la argílica avanzada; y en vetillas y parches dentro de la zona hipógena profunda.

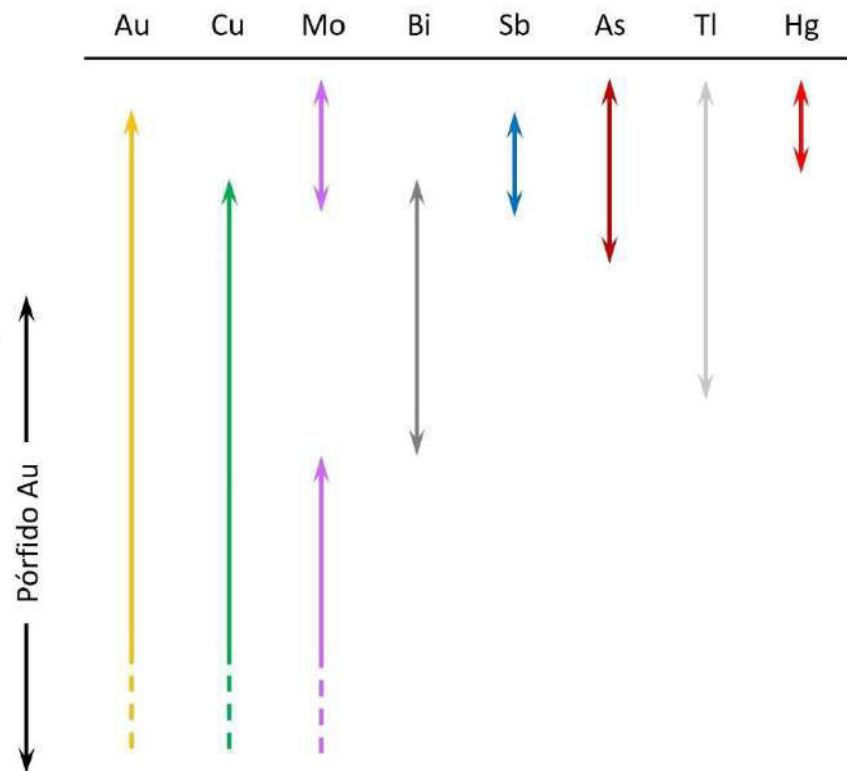
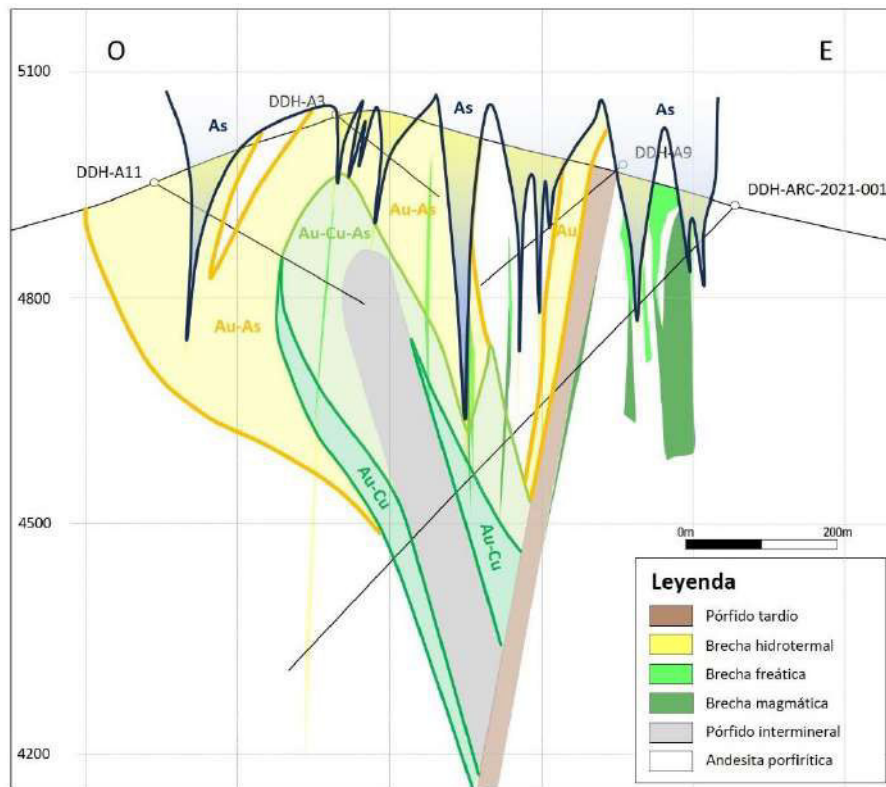


Figura 47. Sección longitudinal A-A' con las zonas de mineralización del sondaje DDH-ARC-2021-001 e históricos de BVN. Se muestra la distribución geoquímica del Au, Cu, As y elementos trazas importantes en la zonación de los sistemas pórfido y epitermal.

7.3. Cronología de los eventos magmático-hidrotermales

Las alteraciones hidrotermales de Arcopunco muestran una sucesión de eventos paragenéticos que explican la evolución del sistema mineral. Esto fue logrado agrupando las distintas fases intrusivas, tipos de vetilleo, texturas y ensambles de alteración que, en base a su comportamiento geoquímico, proporcionaron información con respecto al grado de alteración, contenido metálico, destrucción y removilización del mineral, temperatura, pH, redox, profundidad en el sistema hidrotermal e interacción con aguas meteóricas. Estos parámetros físicos y químicos obtenidos fueron integrados con la finalidad de relacionar genéticamente las alteraciones y determinar los eventos magmático-hidrotermales ocurridos en el proyecto.

Durante la evolución del sistema mineral de Arcopunco, se produjeron dos importantes eventos como resultado del análisis de la secuencia paragenética (Figura 48). El primero corresponde al desarrollo de un pórfido con mineralización de Au y Cu, el cual marca una secuencia prógrada que abarca desde la alteración potásica hasta la argílica intermedia. Mientras que, el segundo es un evento epitermal de alta sulfuración, que representa una secuencia retrógrada, caracterizada principalmente por la alteración argílica y argílica avanzada. Este último evento se presenta superpuesto al pórfido y resulta en la removilización y destrucción parcial de la mineralización temprana.

El pórfido fue identificado por la presencia de remanentes de alteración filica de fengita en ensambles mineralógicos de illita fengítica, que se caracteriza por sus valores elevados en Mg, K, Cu, Mo, Au y Bi; que sugirieron un evento magmático-hidrotermal de naturaleza profunda y de alta temperatura asociados al emplazamiento de pórfidos interminerales y la formación de vetillitas de cuarzo-magnetita y de cuarzo bandeado.

Por debajo de los 400°C, la desestabilización continua del H₂S y HCl condujo a la acidificación del medio (de pH 4 a 3), lo que promovió las altas concentraciones de As y la formación de dickita entre los 300 y 200°C, seguida por la caolinita hasta los 150°C. Estos procesos ocurren dentro de la alteración argílica intermedia que conserva la mineralización. En las zonas más distales se desarrolló el ensamble de caolinita-montmorillonita a temperaturas inferiores a los 100°C, con una mayor interacción de aguas meteóricas.

En el evento retrógrado, la formación del epitermal de alta sulfuración presenta una mineralización de Au-Cu en enargita. Esta sobreimposición tomó lugar con la alteración argílica de illita K-montmorillonita, que evolucionó a un fluido de mayor acidez (pH 1 a 0.4) y temperatura (200-300°C) dominados por el reemplazo pervasivo de alunita-pirofilita-dickita. Estas alteraciones provocaron la removilización y destrucción parcial del mineral temprano.

Tabla 3. Resumen de los eventos hidrotermales del proyecto Arcopunco.

Nº	Ensamble	Alteración	Evento	Metales	Volátiles
1	Fengita	Fílica	Prógrado	Au-Cu-Mo	Bi
2	Illita fengítica	Argílica intermedia	Prógrado	Au-Cu-Mo	Bi±As
3	Caolinita-dickita-illita	Argílica intermedia	Prógrado	Au*-Cu-Mo	As-Bi
4	Caolinita – montmorillonita	Argílica intermedia	Prógrado		As-Hg
5	Illita K ± esmectita	Argílica	Retrógrado	Au-Cu	Bi-As
6	Alunita K - dickita - illita	Argílica avanzada	Retrógrado	Au-Cu	As-Bi
7	Alunita Na/K - pirofilita	Argílica avanzada	Retrógrado	Mo*	As-Hg-Sb-Bi
8	Alunita Na - pirofilita	Argílica avanzada	Retrógrado		As-Hg

**Metales removilizados*

7.4. Modelo del depósito Arcopunco

Históricamente, el proyecto se conceptualizó inicialmente como un yacimiento epitermal de alta sulfuración con mineralización de oro y cobre, que posee texturas *patchy-wormy* típicas de un sistema transicional pórfido-epitermal. Otro enfoque, basado en la identificación de vetillas bandeadas de cuarzo, similares a las del tipo “Maricunga”, sugiere que podría tratarse de un pórfido de oro con “*telescoping*” (Sillitoe, 2011), tal como ocurre en el depósito de Marte, Chile (Sillitoe, 1994).

La mineralización de oro en Arcopunco se presenta tanto en vetillas de cuarzo gris oscuro con magnetita tipo “A1”, como en vetillas de cuarzo bandeado ligeramente onduladas, con las zonas de mayor mineralización coincidiendo con las de mayor intensidad de vetilleo. Los *stockworks* de cuarzo-magnetita se distribuyen a lo largo de los márgenes del pórfido diorítico intermineral, con mineralización aurífera en calcopirita, cuyos valores oscilan entre 0.1 a 0.7 g/t de Au y 0.1 a 0.3% de Cu, mostrando una correlación positiva y un ratio normalizado de Cu/Au (%/ppm) de 0.38 en promedio; es decir, mineralización de oro y cobre co-precipitada. Por otro lado, las vetillas de cuarzo bandeado se encuentran las partes altas del centro porfirítico, sobreyaciendo a las de cuarzo-magnetita, tienen una mineralización de 0.1 a 1 g/t de Au y valores marginales de Cu menores a 500 ppm, sin mostrar una correlación entre ambos metales y un ratio normalizado de Cu/Au (%/ppm) de 0.08 en promedio, muy común en pórfidos de oro. Esta distribución espacial de los tipos de vetillas, así como la mineralización, es similar a la reportada y planteada en los pórfidos de oro de Cerro Casale (Vila y Sillitoe, 1991) y Cavancho (Muntean y Einaudi, 2001), en Chile; también en los distritos auríferos de Minas Conga, Tantahuatay y Yanacocha (Figura 49; Gustafson et al. 2004). Adicionalmente, existe una mineralización epitermal de Au-Cu en enargita, de menor

relevancia, ubicada en la parte intermedia y central del depósito, caracterizada por vetillas tardías de pirita-enargita.

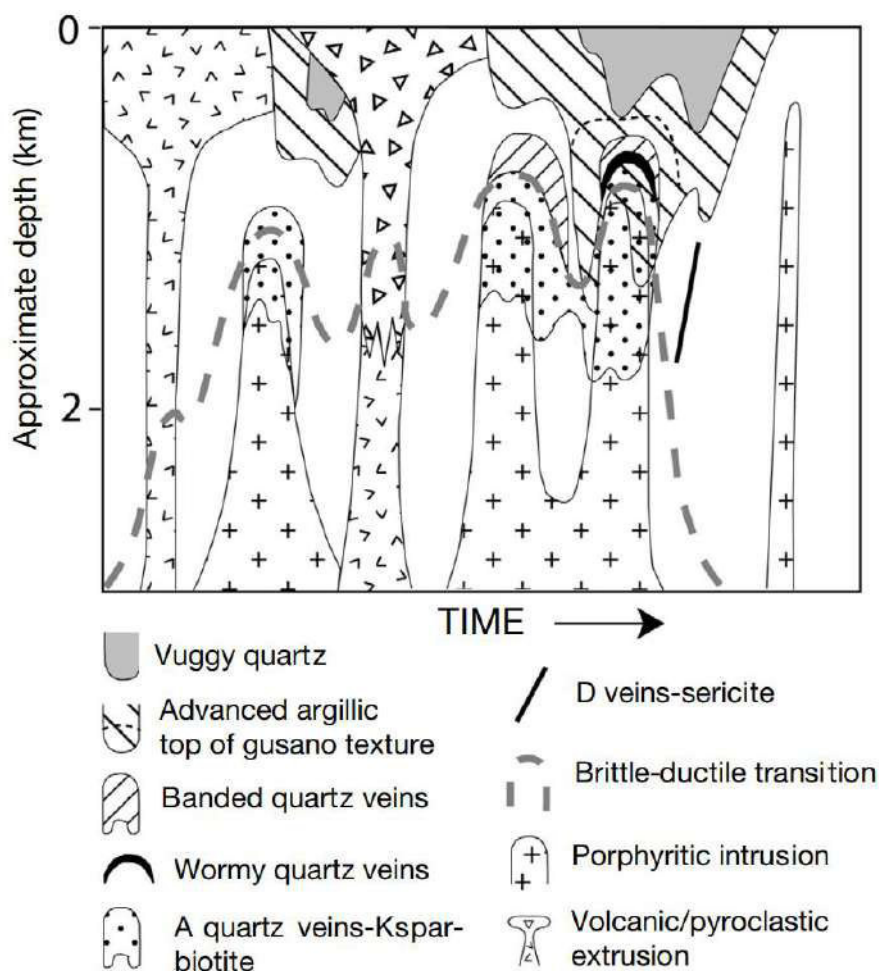


Figura 49. Diagrama espacio-tiempo de un sistema magmático-hidrotermal tipo pórfido-epitermal. Tomado de Gustafson et al. (2004).

Dada la similitud de Arcopunco con los pórfidos de oro de la franja de Maricunga, la profundidad de emplazamiento del pórfido de Arcopunco puede ser estimada en base a los datos de las inclusiones fluidas de vetillas tipo “A” y de cuarzo bandeado realizadas por Muntean y Einaudi (2000) en el distrito de Refugio, Chile. Estos autores indican que, considerando un sistema NaCl-H₂O y un equilibrio con una fase vapor, las vetillas tipo “A” se formaron a profundidades de 0.8 a 1.6 km, 200 y 400 bares bajo presión litostática, y las vetillas de cuarzo bandeado, de 0.2 a 1.5 km, 10 a 150 bares, bajo presión hidrostática

(Figura 50); lo cual es coherente con la disposición de las vetillas. Esto también ha sido discutido por Sillitoe (2017), que contextualiza las profundidades de emplazamiento para cada sistema pórfido del espectro de cobre a oro (Figura 51). Por lo tanto, el emplazamiento de un pórfido de oro ocurre entre los 0.2 a 1.6 km de profundidad, siendo más somero que un pórfido de cobre (2 a 4 km de profundidad), siendo el primero equivalente a la profundidad de emplazamiento de un depósito epitermal.

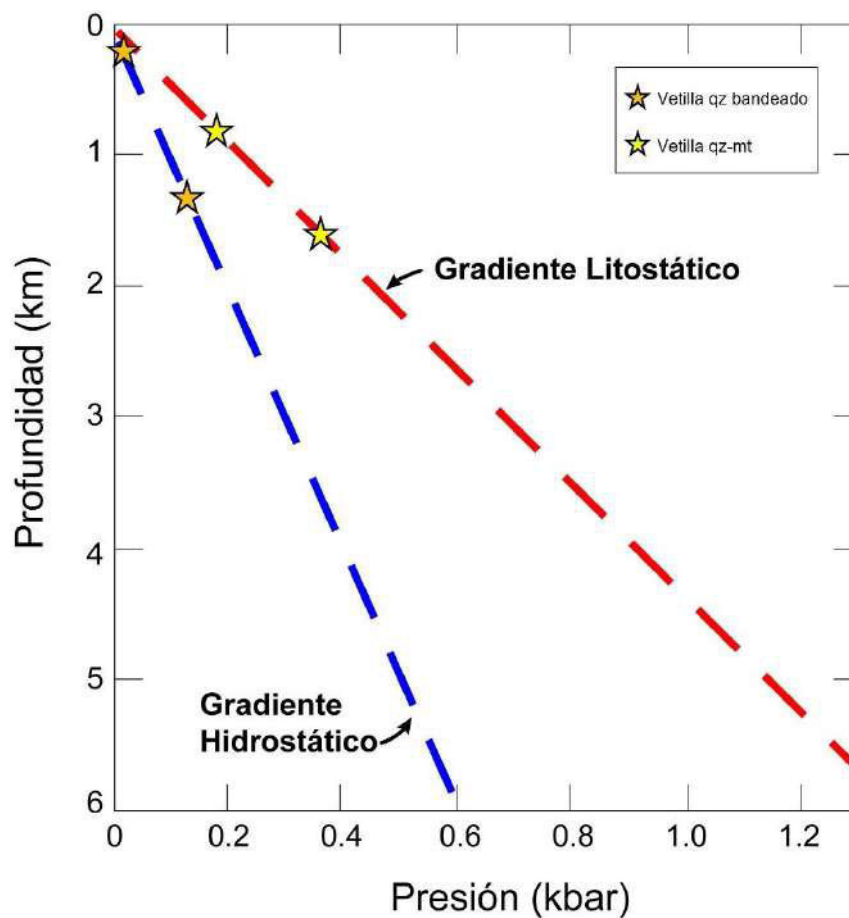


Figura 50. Diagrama de profundidad-presión con las gradientes de presión correspondientes en la evolución de un sistema magmático-hidrotermal. Se muestran ploteados los datos obtenidos por Muntean y Einaudi (2000) de las vetillas de los pórfidos de oro de la franja Maricunga. Abreviaturas, mt: magnetita y qz: cuarzo

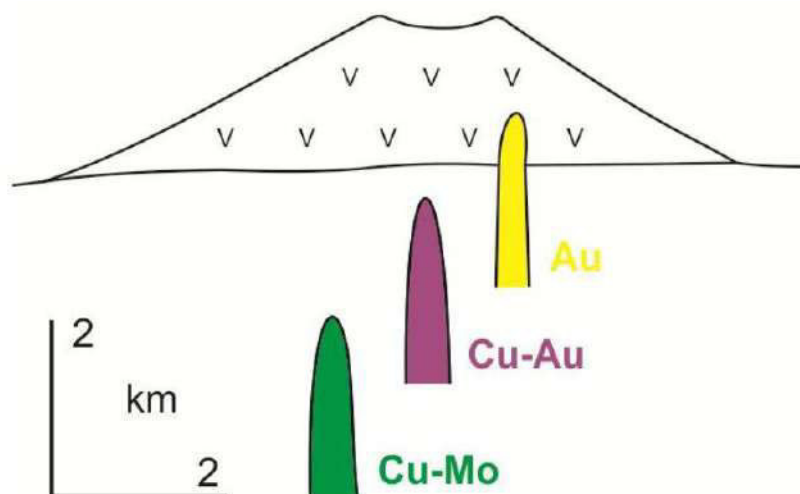


Figura 51. Esquema de las profundidades de emplazamiento del espectro de los depósitos tipo pórfido. Tomado de Sillitoe (2017).

Los estudios litogeoquímicos realizados por Cereceda et al. (2021) entre los distritos mineros de Castrovirreyna y Huachocolpa muestran que las rocas del magmatismo y vulcanismo del Mioceno superior tiene un carácter calcoalcalino rico en K. Así mismo, una muestra de un domo dacítico en los alrededores de Arcopunco presenta la misma *suite* magmática. Estos resultados están en acuerdo con las series magmáticas reportadas en pórfidos con grandes volúmenes de oro; por ejemplo, Cerro Casale (Chile), Bajo de la Alumbrera (Argentina), Oyu Tolgoi (Mongolia), Grasberg y Batu Hijau (Indonesia) (Chiaradia, 2020).

Descubrimientos recientes de sistemas mineralizantes similares, como los pórfidos de Au-Cu de Onto, Indonesia (Burrows et al., 2020) y Filo del Sol, Chile-Argentina (Perelló et al., 2023), proporcionan casos comparativos relevantes.

El pórfido Filo del Sol se caracteriza por un "*telescoping*" extremo. Este proceso involucró la exhumación y erosión del pórfido de edad miocénica, seguido del colapso del sistema epitermal sobre el pórfido erosionado. Por otro lado, el pórfido Onto,

emplazado en el Pleistoceno, también tienen una sobreimposición extrema del sistema epitermal de alta sulfuración. Sin embargo, Burrows et al. (2020) señalan que este yacimiento está completamente preservado, sin evidencia de una remoción significativa de masa rocosa que pudiera facilitar el "*telescoping*". En consecuencia, el mecanismo que permite la sobreimposición de la alteración argílica avanzada, así como la mineralización epitermal de alta sulfuración en un pórfido de Au y Au-Cu, podría no ser el mismo que en los pórfidos de Cu, dado el nivel de emplazamiento de los dos primeros.

En Arcopunco, aunque la edad de la alteración argílica avanzada fue datada en 9.5 ± 0.3 Ma, K-Ar en alunita (Noble y McKee, 1999), correspondiente al Mioceno Superior, los remanentes de domos dacíticos tardíos sugieren que no ocurrió una exhumación y erosión significativa, como la descrita en el pórfido Filo del Sol (Perelló et al., 2023). En lugar de ello, se plantea que el emplazamiento somero del pórfido podría haber sido un factor clave que facilitó la sobreimposición de la alteración argílica avanzada y la mineralización epitermal de alta sulfuración, sin requerir el colapso de grandes masas de roca que expusieran el sistema porfirítico a la superficie.

Por lo tanto, la evolución magmática-hidrotermal de Arcopunco, que comprende el emplazamiento de un pórfido y su sobreimposición epitermal, tiene todas las características de un sistema mineralizante tipo pórfido de oro.

CONCLUSIONES

Arcopunco tiene características distintivas que son comunes de los pórfidos de Au, que incluyen (1) *stockworks* de cuarzo-magnetita con mineralización de oro-cobre, y vetillas de cuarzo bandeado con solo mineralización aurífera; (2) leyes de oro mayores a 0.4 ppm y ratios de Cu:Au (%/ppm) de 0.08 en promedio; (3) profundidad de emplazamiento somera estimada entre los 0.2 a 1.6 km relacionada a intrusivos de alto nivel; y (4) pulsos porfiríticos de composición calcoalcalina rica en potasio.

Se identificaron dos eventos del sistema mineralizante. El primero, magmático-hidrotermal, con el emplazamiento somero de pórfidos interminerales con alteración potásica y filica, junto con *stockworks* de cuarzo gris oscuro mineralizados con oro-cobre en calcopirita y menores vetillas de cuarzo-molibdenita alrededor de los núcleos mineralizados. Sobreyaciendo a estos eventos de alteración-mineralización, ocurren vetillas de cuarzo-pirita con solo mineralización de oro. A los niveles de cota de la alteración potásica y filica, la argílica intermedia de illita fengítica ocurre pervasiva y estructuralmente controlada por vetillas de yeso con halos de biotita secundaria y fengita.

El segundo evento, estrictamente hidrotermal, corresponde a una alteración argílica avanzada de alunita-pirofilita-dickita, con formación de texturas *patchy-wormy* y mineralización de alta sulfuración de oro, cobre y molibdeno en vetillas de pirita-enargita y *smear molybdenite*, respectivamente. Este evento retrógrado removiliza y destruye parcialmente el pórfido mineralizado.

Las relaciones paragenéticas de estos dos eventos y las características geológicas del yacimiento, permiten definir que se trata de un pórfido de oro con una superposición epitermal de alta sulfuración propia de la evolución del sistema mineralizante, sin la

necesidad de factores externos, como la erosión o el colapso de un sector del aparato volcánico, como se observa con las perforaciones realizadas.

La identificación del tipo de sistema mineralizante en Arcopunco abre la posibilidad de reconsiderar yacimientos previamente explorados en las regiones de Junín, Huancavelica y Ayacucho, que podrían formar parte de una posible franja metalogenética de pórfidos enriquecidos en oro en el centro-sur del Perú. Aquellos con características magmáticas, hidrotermales y geoquímicas similares podrían ser reconceptualizados y estudiados bajo nuevos enfoques de exploración. Esto permitiría dirigir la búsqueda hacia depósitos preservados o pobremente erosionados, que contengan un alto contenido de oro y considerables variaciones con leyes de cobre.

RECOMENDACIONES

Realizar un mapeo geológico detallado (litología y alteraciones) en la zona de trabajo y sus alrededores, considerando que en los distritos mineros de Huachocolpa y Huancavelica se han identificado varias ocurrencias minerales que podrían ser pórfidos.

Para tener un mayor control de las edades radiométricas de los eventos magmáticos y volcánicos en relación con la mineralización en el Distrito Minero Huachocolpa, es conveniente actualizar la base de datos geocronológica utilizando métodos de datación U-Pb en zircones para las rocas ígneas, K-Ar para la alteración hidrotermal utilizando minerales como la sericita y alunita, y Re-Os para la mineralización en molibdenita, pirita y otros sulfuros.

El magmatismo del Mioceno en la región Huancavelica ha sido poco estudiado en cuanto a su firma geoquímica de elementos trazas y tierras raras; por lo que es recomendable actualizar la base de datos geoquímica con nuevos estudios litogeoquímicos enfocados en la evolución y fertilidad magmática relacionada a la mineralización de este sector del Perú.

Para confirmar las estimaciones de la profundidad de emplazamiento del pórfido de Arcopunco, es necesario realizar estudios de inclusiones fluidas de las vetillas de cuarzo-magnetita tipo “A1” y de cuarzo bandeado con mineralización de oro.

Realizar análisis de LA-ICP-MS para identificar y cuantificar elementos trazas en alunita, clorita y otros minerales claves en determinar vectores, fertilidad y el potencial del pórfido.

REFERENCIAS

- Arancibia, O., Clark, A. (1996) Early Magnetite-Amphibole-Plagioclase Alteration-Mineralization in the Island Copper Porphyry Copper-Gold Molybdenum Deposit, British Columbia. *Economic Geology*, 91, 402-438.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.91.2.402>
- Arribas, A. (1995) Characteristics of high-sulfidation epithermal deposits, and their relation to magmatic fluid. In *Magma, Fluids and Ore Deposits*, Ed.: J.F.H Thompson, *Mineralogical Association of Canada Short Course*, 23.
- Baldoceda A.; Saban, C.; Zorrilla, B. (2023) Evidencias de Telescopio a partir de datos geoquímicos y espectrales en el proyecto Arcopunco, Huancavelica, Perú. *Publicación Especial n°16, Resúmenes Ampliados del XXII CPG*, 291-295.
- Beatty R., Kerber J. (1993) Concepts Instrumentation and Techniques in Atomic Absorption Spectrophotometry. *Perkin-Elmer Corporation*, 2nd edition.
- Bernal, J., Railsback, B. (2008) Introducción a la Tabla Periódica de los Elementos y sus Iones para Ciencias de la Tierra. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25 (2), 236-246.
- Bruha, D., McKee, E., and Noble, D. (1982) Paragenetic, fluid-inclusion and geochronological study of the Teresita vein system, Huachocolpa district, Peru [abs.]: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 14, 152-153.
- Burrows, D.; Rennison, M.; Burt, D.; Davies, R. (2020) The Onto Cu-Au Discovery, Eastern Sumbawa, Indonesia: A large, Middle Pleistocene Lithocap-Hosted High-Sulfidation Covellite-Pyrite Porphyry Deposit. *Soc. Econ. Geol.*, 115(7), 1385-1412.

- Camprubí, A., Albinson, T. (2006) Depósitos epitermales en México: actualización de su conocimiento y reclasificación empírica. *Bol. Soc. Geol. Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario, LVIII, 1*, 27-81.
- Canepa, C. (2012) Estudio de microscopía óptica. *Reporte interno preparado para Cumbres Exploraciones SAC*.
- Carlotto, V., Quispe, J., Acosta, H., Rodriguez, R., Romero, D., Cerpa, L., Mamani, M., Diaz-Martinez, E., Navarro, P., Jaimes, F., Velarde, T., Lu, S., Cueva, E. (2009) Dominios geotectónicos y metalogenéticos del Perú. *Bol. Soc. Geol. Perú*, 103, 1-89.
- Cereceda, C., Ayala, L. y Anastacio, A. (2021). *Geología del Cuadrángulo de Castrovirreyna (hojas 27m1, 27m2, 27m3 y 27m4)*. Actualización Carta Geológica Nacional, Boletín N°34, Serie L, INGEMMET. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/3184>
- Cerpa, L., Bissig, T., Kyser, K., McEwan, C., Macassi, A., and Rios, H. (2013) Lithologic controls on mineralization at the Lagunas Norte high-sulfidation epithermal gold deposit, northern Peru. *Mineralium Deposita*, 48, 653-673.
- Chang Z., Hedenquist, J., White, N., Cooke, D., Roach, M., Deyell, C., Garcia, J., Gemmell, B., McKnight, S., Cuisson, A. (2011). Exploration Tools for Linked Porphyry and Epithermal Deposits: Example from the Mankayan Intrusion-Centered Cu-Au District, Luzon, Philippines. *Soc. Econ. Geol.*, 106, 1365-1398. <https://doi.org/10.2113/econgeo.106.8.1365>
- Chao, T., Sanzolone, R. (1992) Decomposition techniques. *Journal of Geochemical Exploration*, 44, 65–106, [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(92\)90048-D](https://doi.org/10.1016/0375-6742(92)90048-D)

- Chiaradia, M. (2020) Gold endowments of porphyry deposits controlled by precipitation efficiency. *Nat Commun*, 11(248). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14113-1>
- Chouinard, A., Williams-Jones, A.E., Leonardson, R.W., Hodgson, C.J., Silva, P., Téllez, C., Vega, J., and Rojas, F. (2005) Geology and genesis of the multistage high-sulfidation epithermal Pascua Au-Ag-Cu deposit, Chile and Argentina. *Economic Geology*, 100, 463–490.
- Cooke, D., White, N., Chang, L., Zhaoshan, C., Huayong, C. (2017) Lithocaps – characteristics, origins and significance for porphyry and epithermal exploration. in: *Proceedings of the 14th SGA Biennial Meeting*. Quebec City, Canada. Australian Research Council, 1, 291-294.
- Cox D. (1985) Geology of the Tanama and Helecho Porphyry Copper Deposits and Vicinity, Puerto Rico. *U.S. Geological Survey Professional Paper 1327*.
- Einaudi, M., Hedenquist, J., Inan, E. (2003) Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: transitions from porphyry to epithermal environments. *Soc. Econ. Geol. Spec. Pub*, 10, 285-313.
- Fernandez-Concha, J., Yates, R., Kent, D. (1952) Geología del distrito Mercurífero de Huancavelica. Instituto Nacional de Investigación y Fomento Mineros. Boletín, n. 5, 56 p.
- Gill, R. (2010). *Igneous rocks and processes: a practical guide*. Wiley-Blackwell.
- Guatame, L. (2013) Crystallinity variations of Smectite-illite and Kaolin hydrothermal alteration minerals by using SWIR spectroscopy. A study of the Rodalquilar Au-deposit, SE Spain. [Tesis de Maestría, Universidad de Twente].

- Guilbert, J. (1995) Geology, alteration, mineralization and genesis of the Bajo de la Alumbrera porphyry copper-gold deposit, Catamarca Province, Argentina. *Arizona Geological Society Digest*, 20, 646–656.
- Gustafson, L. and Hunt, J. (1975) The Porphyry Copper Deposit at El Salvador, Chile. *Economic Geology*, 70(5), 857-912. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.70.5.857>
- Gustafson, L., Quiroga, J. (1995) Patterns of mineralization and alteration below the porphyry copper orebody at El Salvador, Chile. *Economic Geology*, 90(1): 2–16. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.1.2>
- Gustafson, L. B., Vidal, C. E., Pinto, R. y Noble, D. C. (2004). Porphyry-epithermal transition, Cajamarca región, northern Peru: *Soc. Econ. Geol. Spec. Pub.*, 11, 279-299. <https://doi.org/10.5382/SP.11.15>
- Halley, S.; Dilles, J.; Tosdal, R. (2015) Footprints: Hydrothermal Alteration and Geochemical Dispersion Around Porphyry Copper Deposits. *SEG Newsletter*, 100, 12-17.
- Halley, S. (2020) Mapping Magmatic and Hydrothermal Processes from Routine Exploration Geochemical Analyses. *Soc. Econ. Geol.*, 115 (3), 489-503. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4722>
- Hedenquist, J.W. (1987) Mineralization associated with volcanic-related hydrothermal systems in the Circum-Pacific Basin, In; M.K Horn (ed.), Transactions 4th Circum Pacific Energy and Mineral Resources Conference, Singapore, 1-26.
- Hedenquist, J., Arribas, A., and Reynolds, T. (1998) Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far Southeast–Lepanto porphyry and epithermal Cu–Au deposits, Philippines. *Soc. Econ. Geol.*, 93, 373–404.

- Hedenquist, J., Arribas, A., and Gonzalez-Urien, E. (2000) Exploration for epithermal gold deposits. *Soc. Econ. Geol. Reviews*, 13, 245-277.
- Hedenquist, J., Claveria, R.J., Villafuerte, G. (2001) Types of sulfide-rich epithermal deposits, and their affiliation to porphyry systems: Lepanto-Victoria-Far Southeast deposits, Philippines, as examples. *ProExplo 2001, Congreso Internacional de Prospectores y Exploradores*, 2nd, Lima, 2001, Instituto de Ingenieros de Minas del Perú, CD-ROM, 29 p.
- Hedenquist, J., Taran, Y. (2013) Modelling the formation of advanced argillic lithocaps: Volcanic vapor condensation above porphyry intrusions. *Soc. Econ. Geol.*, 108, 1-18.
- Hedenquist, J, Arribas, A. (2022) Exploration Implications of Multiple Formation Enviroment of Advanced Argillic Minerals. *Soc. Econ. Geol.*, 117, 609-643.
- Hoops, G.K. (1964) The nature of the insoluble residues remaining after the HF-H₂SO₄ acid decomposition (solution B) of rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28, 405–406, [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(64\)90113-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(64)90113-9)
- Hu, Z., Qi, L. (2014). Sample digestion methods. In; Holland, H.D., Turekian, K.K (eds.), *Treatise on geochemistry*, 2nd ed. Esevier, Oxford. 15: 88-109.
- Isawa, E.; Cuningham, C. (1989) Hydrothermal breccias pipes and gold mineralization in the Iwashita orebody, Iwato deposit, Kyushu, Japan. *Economic Geology*, 84(3), 715-724. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.84.3.715>
- Jimenez, C. (2017). *Geology, hydrothermal alteration, geochemistry, mineral geochemistry, and alteration textures of the lithocap at Bantug, Negros-Philippines*. [Tesis de Doctorado, Universidad de Tasmania].

- Khashgerel, B., Rye, R., Kavalieris, I., Hayashi, K. (2009). The Sericitic to Advanced Argillic Transition: Stable Isotope and Mineralogical Characteristics from the Hugo Dummett Porphyry Cu-Au Deposit, Oyu Tolgoi District, Mongolia. *Economic Geology*, 104(8), 1087-1110. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.8.1087>
- MacDonald, G., Arnold, L. (1994). Geological and geochemical zoning of the Grasberg Igneous Complex, Irian Jaya, Indonesia. *Journal Of Geochemical Exploration*, 50(1-3), 143-178. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(94\)90023-x](https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)90023-x)
- Manea, V., Manea, M., Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Valenzuela, R., Husker, A., Kostoglodov, V. (2017). A review of the geodynamic evolution of flat slab subduction in Mexico, Peru, and Chile, *Tectonophysics*, 695, 27-52. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.11.037>
- McKee, E., Noble, D., Petersen, U., Arenas, M. y Benavides, A. (1975). Chronology of late Tertiary volcanism and mineralization, Huachocolpa district, Central Peru. *Economic Geology*, 70(2), 388-404. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.70.2.388>
- McKee, E. y Noble, D. (1982) Miocene volcanism and deformation in the western Cordillera and high plateaus of south-central Peru. *Geological Society of America Bulletin*, 93(8), 657-662. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1982\)93<657:MVADIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1982)93<657:MVADIT>2.0.CO;2)
- Meyer, C. y Hemley, J. (1967) *Wall rock alteration*, in Barnes, H. L., ed, *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*: New York, Holt, Reinhart and Winston, 166-235.
- MINEM (1971) Proyecto Faja cuprífera de la costa entre los ríos Pativilca y Chaparra.

- Morche, W., La Torre, O., De La Cruz, N. y Cerrón, F. (1996) *Geología del Cuadrángulo de Huachocolpa*. Carta Geológica Nacional, Boletín N°63, Serie A, INGEMMET.
<https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/196>
- Morche, W. y Larico, W. (1996) *Geología del Cuadrángulo de Huancavelica*. Carta Geológica Nacional, Boletín N°73, Serie A, INGEMMET.
- Muntean, J., Einaudi, M. (2000) Porphyry Gold Deposits of the Refugio District, Maricunga belt, Northern Chile. *Soc. Econ. Geol.*, 95, 1445-1472.
- Muntean, J., Einaudi, M. (2001) Porphyry-epithermal transition: Maricunga belt, Northern Chile. *Soc. Econ. Geol.*, 96, 743-772.
- Noble, D., McKee, E., Mégard, F. (1979) Early Tertiary “Incaic” tectonism, uplift, and volcanic activity, Andes of central Peru. *Geological Society of American Bulletin*, 90, 903-907.
- Noble, D.C. y McKee, E.H. (1999). The Miocene metallogenic belt of central and northern Perú. *Society of Economic Geologists Special Publication no. 7*, 155-193. <https://doi.org/10.5382/SP.07.05>
- Noble, D., Wise, J. y Vidal, C. (1999) Episodes of Cenozoic extension in the Andean orogen of Peru and their relation to compression, magmatic activity and mineralization. *Sociedad Geológica del Perú, Volumen Jubilar N°5*, 75, 45-66.
- Noble, D., Vidal, C. E., Miranda, M., Amaya, W., and McCormack, J. K. (2011) Ovoidal- and mottled-textured rock and associated silica veinlets and their formation by high-temperature outgassing of subjacent magma: in Steininger, R., and Pennell, B., eds., Proceedings, *Geological Society of Nevada, Symposium Great Basin Evolution and Metallogeny*, 795-811.

- Palero, F. (2021) Informe de la visita técnica realizada a la Unidad Recuperada (distrito minero de Huachocolpa, Huancavelica) los días 14 a 23 de junio de 2021. *Silver X internal report*, 63 p.
- Pan American Silver Corp. (2019) Announces a Resource Estimation report for its Pico Machay deposit at the Pico Machay project. https://www.rscmme.com/report/Pan_American_Silver_Corp_Pico_Machay_20-2-2019
- Pérez, C. e Yparraguirre, C. (2013). El Distrito polimetálico de Huachocolpa (Huancavelica, Perú). *Revista Ibérica de Mineralogía*, 4, 1-57. DOI: 10.7597/acopios2171-7788.2013.1
- Perelló, J.; Cabello, J. (1989) Pórfidos cupríferos ricos en oro; una revisión. *Revista geológica de Chile*, 16(1), 73-92.
- Perelló, J.; Sillitoe, R.; Rossello, J.; Forestier, J.; Merino, G.; Charchaflié, D. (2023) Geology of Porphyry Cu-Au and Epithermal Cu-Au-Ag Mineralization at Filo del Sol, Argentina-Chile: Extreme Telescoping During Andean Uplift. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 118(6), 1261-1290.
- Pinto, R. (2002). *Transición de un sistema de alta sulfuración a un sistema porfirítico de alto nivel en Kupfertal, distrito minero de Yanacocha, Cajamarca, Perú*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio Institucional – UNMSM.
- Quiroz, A.; Torres, P.; Sarmiento, J. y Canchaya, S. (2010). Evidencias de un “Lithocap” asociado a una textura moteada en el prospecto Terciopelo en Huancavelica, Sur del Perú. *XV Congreso Peruano de Geología, Pub. Esp.* 9, 600-603. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CPG15-144.pdf>

- Rainbow, A., Clark, A., Kyser, K., Gaboury, F., and Hodgson, J. (2005) The Pierina epithermal Au–Ag deposit, Ancash, Peru: paragenetic relationships, alunite textures, and stable-isotope geochemistry. *Chemical Geology*, 215, 235-252.
- Rivera, R. y Cernuschi, F. (2022) Early Halos and their implication for porphyry exploration in the Americas. *Instituto de Ingenieros de Minas del Perú*.
- Redwood, S. (2013) NI 43-101 Technical Report for the Huancavelica Lithocaps Gold Project, Provinces of Huancavelica and Castrovirreyna, Department of Huancavelica, Peru. For Braeval Mining Corporation.
- Rieder, M.; Cavazzini, G.; Yakonov, Y.; Frank-Kamenetskii, V.; Gottardi, G.; Guggenheim, S.; Koval, P.; Müller, G.; Neiva, A.; Radoslovich, E.; Robert, J.; Sassi, F.; Takeda, H.; Weiss, Z.; Wone, D. (1998) Nomenclature of the Micas. *Clays and Clay minerals*, 46(5), 586-595.
- Rodríguez, R. (2008). El Sistema de Fallas Chonta y sus *Implicancias Metalogenéticas entre 12°15' S y 13°30' S (Huancavelica – Perú)*. [Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/TE0031.pdf>
- Rollinson, H. y Pease, V. (2021) *Using Geochemical data: to Understand Geological Processes*. 2nd ed., Cambridge University Press. DOI: 10.1017/9781108777834
- Romero, D., Torres, V. (2003) Revisión y actualización del cuadrángulo de Huancavelica (26-n), escala 1:50 000. INGEMMET. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2118>
- Rosenbaum, G., Giles, D., Saxon, M., Betts, P., Weinberg, R. y Duboz, C. (2005). Subduction of the Nazca Ridge and the Inca Plateau: Insight into the formation of

- the ore deposits in Peru. *Earth and Planetary Letter*, 239, 18-32.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.08.003>
- Seedorff, E.; Dilles, J.; Proffett, J.; Einaudi, M.; Zurcher, L.; Stavast, W.; Johnson, D.; Barton, M. (2005) Porphyry deposits: Characteristics and Origin of Hypogene features. *Soc. Econ. Geol.*, 100, 251-298.
- Sillitoe, R. H. (1994) Erosion and collapse of volcanoes: Causes of telescoping in intrusion-centered ore deposits. *Geology*, 22(10), 945-948.
[https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1994\)022<0945:EACOV>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)022<0945:EACOV>2.3.CO;2)
- Sillitoe, R. H. (1995) Exploration of porphyry copper lithocaps: Parkville, Victoria, Australasian Institute of Mining and Metallurgy 9/95, p. 527-532.
- Sillitoe, R. H. (1999) Styles of high-sulphidation gold, silver and copper mineralization in the porphyry and epithermal environments, in Weber, G., ed., Pacrim '99 Congress: Bali, Indonesia, Weber, G, 29-44.
- Sillitoe, R. (2000) Gold-Rich porphyry Deposits: Descriptive and Genetic Models and Their Role in Exploration and Discovery. *Soc. Econ. Geol Reviews*, 13, 315-345.
- Sillitoe, R. (2010) Porphyry copper systems. *Soc. Econ. Geol.*, 105, 3-41.
- Sillitoe, R. (2011) Comments on the Antamayo, Chosicano, Arcopunco and Chibolo prospects, Peru. *Internal report prepared for Talisker Exploration Services Inc.*
- Sillitoe, R., Tolman, J., Van KerkVoort, G. (2013) Geology of the Caspiche Porphyry Gold-Copper Deposit, Maricunga Belt, Northern Chile. *Soc. Econ. Geol.*, 108, 585-604.
- Sillitoe, R. (2015) Epithermal paleosurfaces. *Mineralium Deposita*, 50(7), 767–793. DOI 10.1007/s00126-015-0614-z

- Sillitoe, R. (2017) Gold-rich porphyry deposits: types, settings, controls, and potential. *In: Mineral Resources to Discover. Proc 14th SGA Biennial Meeting, Québec City, 1*, 11-14.
- Sutarto; Idrus, A.; Harijoko, A.; Donny, L.; Meyer, F. (2015) Veins and Hydrothermal breccia of the Randu Kuning porphyry Cu-Au and Epithermal Au deposits at Selogiri area, Central Java Indonesia. *J. SE Asian Appl. Geol.*, 7(2), 80–99.
- Teal, L., and Benavides, A. (2010) History and geologic overview of the Yanacocha mining district, Cajamarca, Peru. *Soc. Econ. Geol.*, 105, 1173-1190.
- Thompson, A.; Hauff, P.; Robitaille, A. (1999) Alteration Mapping in Exploration: Application of Short-Wave infrared (SWIR) spectroscopy. *SEG Newsletter*, (39), 16-27.
- Valdivia, E. y Raymundo, T. (2003). *Memoria descriptiva de la revisión y actualización del cuadrángulo de Huachocolpa (27-n), Escala 1:50000*. INGEMMET <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2117>
- Vidal, C., Noble, D., Harvey, B., and Quiroz, A. (1997) Geology and mineral deposits of the Cajamarca area, northern Peru; Guidebook Series 1. *IX Congreso Peruano de Geología: Lima, Peru, Sociedad Geológica del Perú*, 52 p.
- Vila, T., Sillitoe, R. (1991) Gold-Rich Porphyry Systems in the Maricunga Belt, Northern Chile. *Soc. Econ. Geol.*, 86, 1238-1260.
- Wang, L., Xue, N., Zhang, Y., Hu, P. (2021) Controlled Hydrothermal Precipitation of Alunite and Natroalunite in High-Aluminum Vanadium-Bearing Aqueous System. *Minerals*, 11(8), 892. <https://doi.org/10.3390/min11080892>

- Wise, J. (1999) Geological map of the Huachocolpa district.
10.13140/RG.2.2.10826.88003
- Wise, J., Noble, D. (2001) La Falla Chonta del Perú Central - Una falla inversa con reactivación de rumbo sinistral respondiendo a un cambio de la oblicuidad relativa de convergencia de las placas tectónicas. *Boletín de la Sociedad geológica del Perú*, 92, 29-41.
- Wise, J. Noble, D., Vidal, C., Gustafson, L. (mayo, 2004) *Geology and Structural control of the Huancavelica Mercury district, Central Peru* [Presentación de paper]. Rocky Mountain (56th Annual) and Cordilleran (100th Annual) Joint Meeting, Boise, Idaho <https://gsa.confex.com/gsa/2004RM/webprogram/Paper71808.html>
- Zhai, S., Jian, W., Mao, J., Duan, J., Zuo, J. Sun, P. (2023) Significance of pyrophyllite parameters in shortwave infrared spectroscopy: A case study of the Guihu super-large pyrophyllite deposit. *Ore Geology Reviews*, 155.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105374>
- Zivkovic, Z., Danyushevsky, L., Halley, S., Barker, S., Baker, M. (2023) Comparison of lithium borate fusion and four -acid digestions for the determination of whole-rock chemistry – implications for lithogeochemical and mineral exploration. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 23,
<https://doi.org/10.1144/geochem2022-054>