Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica
Unidad de Posgrado

Zonamiento mineralógico con difracción de rayos X para la optimización del tratamiento metalúrgico en el yacimiento Toromocho

TESIS

Para optar el Grado Académico de Magíster en Geología con mención en Minas y Recursos Energéticos

AUTOR

Ronald Eugenio FLORES BARRÓN

ASESOR

Mg. Enrique GUADALUPE GÓMEZ

Lima, Perú

2022

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

Flores, R. (2022). *Zonamiento mineralógico con difracción de rayos X para la optimización del tratamiento metalúrgico en el yacimiento Toromocho*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Ronald Eugenio Flores Barrón
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	04072074
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-3591-9503
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Mg. Enrique Guadalupe Gómez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	09191995
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-9583-8807
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Dr. Jorge Enrique Soto Yen.
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	03493146
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Dr. Jesus Alberto Torres Guerra
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07219691
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Mg. José Andrés Yparraguirre Calderón
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10293400
Datos de investigación	

Línea de investigación	No aplica.
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	Laboratorio: Empresa Minera Chinalco. País: Perú. Departamento: Junin. Provincia: Yauli. Distrito: Morococha. Latitud: -116930000. Longitud: -761218600
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Mayo 2009 – Setiembre 2022 2009 - 20022
URL de disciplinas OCDE	Minería y Procesamientos de Minerales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.00 Geología https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.00

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica
Unidad de Posgrado

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS ★ Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica ★ DIRECTOR ★ UNIDAD DE POST-GRADO ★

Acta de Sustentación de Tesis

Sustentación Pública

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos – Lima, a los veinticuatro días del mes de noviembre del año 2022, siendo las 12:00 horas, se reúnen los suscritos Miembros del Jurado Examinador de Tesis, nombrado mediante Dictamen Nº 000667-2022-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM del 16 de noviembre del 2022, con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

Titulo

«Zonamiento mineralógico con difracción de rayos x para la optimización del tratamiento metalúrgico en el yacimiento Toromocho»

Que, presenta el Bach. **Ronald Eugenio Flores Barrón,** para optar el grado académico de **Magister** en **Geología** con mención en **Minas y Recursos Energéticos.**

El Secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente Nº 09504/FIGMMG del 23 de octubre del 2018, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento General de Estudios de Posgrado», aprobado con Resolución Rectoral Nº 04790-R-18 del 08 de agosto del 2018.

Luego de la Sustentación, se procede con la calificación de la Tesis, de acuerdo al procedimiento respectivo y se registra en el acta correspondiente en conformidad al Art. 100 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

Muy Bueno (17)

Habiendo sido aprobada la sustentación de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el grado académico de **Magister** en **Geología** con mención en **Minas y Recursos Energéticos** al Bach. **Ronald Eugenio Flores Barrón.**

Siendo las 13:00 horas, se dio por concluido al acto académico.

Dr. Jorge Enrique Soto Yen
Presidente

Dr. Jesús Alberto Torres Guerra
Secretario

Mg. José Andrés Yparraguirre Calderón
Miembro

Mg. Enrique Guadalupe Gómez
Asesor

Firmado digitalmente por DEL VALLE JURADO Carlos FAU 20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 09.08.2022 11:44:17 -05:00

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
UNIDAD DE POSGRADO

Lima, 09 de Agosto del 2022

INFORME N° 000094-2022-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM

INFORME DE ORIGINALIDAD

DIRECTOR DE LA UNIDAD DE POSGRADO
Dr. Carlos Del Valle Jurado
OPERADOR DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES
Tec. Wendy María Sanca Bernabé
DOCUMENTO EVALUADO:
Tesis para optar el Grado Académico de Magister en Geología con mención en Minas y Recursos Energéticos titulado: **"ZONAMIENTO MINERALÓGICO CON DIFRACCIÓN DE RAYOS X PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL TRATAMIENTO METALÚRGICO EN EL YACIMIENTO TOROMOCHO"**
AUTOR DEL DOCUMENTO:
BACH. RONALD EUGENIO FLORES BARRÓN
FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO:
08/08/2022
FECHA DE APLICACIÓN DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES:
08/08/2022
SOFTWARE UTILIZADO
Turnitin
CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES

- Excluye textos entrecomillados
- Excluye fuentes para buscar similitud
- Excluye Bibliografía
- Excluye cadenas menores a 35 palabras

PORCENTAJE DE SIMILITUDES SEGÚN PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES
Nueve por ciento (09 %)

FUENTES ORIGINALES DE LAS SIMILITUDES ENCONTRADAS

• hdl.handle.net	3%
• revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe	2%
• dspace.unitru.edu.pe	2%
• www.repositorio.unasam.edu.pe	1%
• vsip.info	<1%
• repositorio.upn.edu.pe	<1%
• www.researchgate.net	<1%

Esta es una copia auténtica imprimible de un documento electrónico archivado por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, aplicando lo dispuesto por el Art. 25 de D.S. 070-2013-PCM y la Tercera Disposición Complementaria Final del D.S. 026- 2016-PCM. Su autenticidad e integridad pueden ser contrastadas a través de la siguiente dirección web: **https://spsgd.unmsm.edu.pe/verifica/inicio.do** e ingresando el siguiente código de verificación: **LAETVYJ**

- cybertesis.unmsm.edu.pe <1%
- kupdf.net <1%
- tesis.ipn.mx <1%
- es.scribd.com <1%

OBSERVACIONES
Ninguna

CALIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD
Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones

- **08/08/2022**

CARLOS DEL VALLE JURADO
DIRECTOR DE LA UNIDAD DE POSGRADO

RRL/wsb

Esta es una copia auténtica imprimible de un documento electrónico archivado por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, aplicando lo dispuesto por el Art. 25 de D.S. 070-2013-PCM y la Tercera Disposición Complementaria Final del D.S. 026- 2016-PCM. Su autenticidad e integridad pueden ser contrastadas a través de la siguiente dirección web: **https://spsgd.unmsm.edu.pe/verifica/inicio.do** e ingresando el siguiente código de verificación: **LAETVYJ**

AGRADECIMIENTO

Agradezco a todos quienes han colaborado en esta tarea. En especial, a mi asesor, Ing. Enrique Guadalupe quien con su calor profesional ha instado a no flaquear y continuar. A mis familiares quienes me han acompañado a llevar a buen término la maestría.

El agradecimiento más profundo a Dios que me da su fuerza incondicional, a mis padres, hermana, hijo y sobrina por su apoyo constante y a mis maestros por su lucha constante en formar profesionales competentes al servicio de nuestro querido país.

Índice general

Lista de cuadros vi

Lista de figuras viii

Resumen xii

Abstract xiii

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN 14

1.1. Situación problemática 14

1.2. Formulación del Problema 15

1.3. Justificación teórica 15

1.4. Justificación práctica 17

1.5. Objetivos 17

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO 19

2.1. Antecedentes de la investigación 19

2.2. Bases teóricas 24

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA 28

3.1. Tipo y diseño de investigación 28

3.2. Unidad de análisis 29

3.3. Población de estudio 29

3.1. Tamaño de la muestra 29

3.2. Selección de muestra 29

3.3. Técnicas de recolección de datos 30

3.4. Análisis e interpretación de la información 30

3.5. Variables 31

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN 32

4.1. Generalidades 32

4.2. Análisis, interpretación y discusión de resultados 37

4.3. Pruebas de hipótesis 137

4.4. Presentación de resultados 139

CONCLUSIONES 142

RECOMENDACIONES.....144

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....145

ANEXOS 150

Lista de cuadros

Cuadro 1. Unidades geológicas del distrito Morococha 34

Cuadro 2. Fases intrusivas identificadas.....45

Cuadro 3. Rocas huéspedes identificadas.....47

Cuadro 4. Mineralización en el yacimiento Toromocho.....74

Cuadro 5. Matriz de correlación de los minerales 89

Cuadro 6. Contaminantes Minado 2016 y 2019.....96

Cuadro 7. Presencia de cobre, minerales contaminantes y perfil litológico 105

Cuadro 8. Valores máximos recomendados para controlar el abastecimiento de mineral.....106

Cuadro 9. Resultados de Análisis Químico de Cu Secuencial y Cu soluble en ácido cítrico.....109

Cuadro 10. Porcentaje de Cu Disueltos.....112

Cuadro 11. Mineralogía de Cobre.....112

Cuadro 12. Especies de Cobre Según Polígonos de Mineral.....116

Cuadro 13. Compuestos de los tipos de roca 118

Cuadro 14. Resultados de flotación más áspera de talco 119

Cuadro 15. Minerales en talco concentrado más áspero 120

Cuadro 16. Clasificación de UGM.....121

Cuadro 17. Cuadro de minerales y alteraciones con Contenido de Talco..121

Cuadro 18. Resultados de DRX en el Concentrado Bulk y Concentrado Final 122

Cuadro 19. Resultados de minerales concentrados en las muestras con DRX 127

Cuadro 20. Balance Metalúrgico con la adición de CMC 129

Cuadro 21. Litología del mineral después de la prueba industrial 129

Cuadro 22. Ensayo químico de los polígonos de mineral 130

Cuadro 23. Cuadro de Especies Mineralógicas 131

Cuadro 24. Cuadro de balance metalúrgico.....132

Cuadro 25. Recuperación Concentrada de Cobre 136

Lista de figuras

Figura 1. Mapa de la Geología Regional del área de Toromocho. 36

Figura 2.Mapa Geológico Local de la Mina Toromocho. 39

Figura 3.Columna Estratigráfica del Distrito de Morococha.....40

Figura 4. Mapa Geológico Estructural de la Mina Toromocho.....41

Figura 5. Brecha polimíctica. 42

Figura 6. Brecha estructural.....43

Figura 7. Brecha intrusiva. 44

Figura 8. Sección Geológica 26W.....49

Figura 9. Sección Alteración 26W.....50

Figura 10. Comparación de alteraciones interpretadas de DRX Blast Hole. 51

Figura 11. Fotomicrografías de secciones delgadas en nicoles cruzados, documentando las alteraciones en el yacimiento de Toromocho. 54

Figura 12. Fotomicrografías de secciones delgadas en nicoles cruzados, documentando la albitización en el yacimiento de Toromocho..56

Figura 13. Fotomicrografías de secciones delgadas en nicoles cruzados, documentando la alteración fílica en el yacimiento de Toromocho. 58

Figura 14. Fotomicrografías de secciones delgadas en nicoles cruzados, documentando la alteración olivino-serpentina en el yacimiento de Toromocho.....60

Figura 15. Fotomicrografías de secciones delgadas en nicoles cruzados, documentando la alteración olivino-talco en el yacimiento de Toromocho.....62

Figura 16. Fotomicrografías de secciones delgadas en nicoles cruzados, documentando la alteración olivino-serpentina en la alteración Magnetita masiva. 63

Figura 17. Fotomicrografías de secciones delgadas en nicoles cruzados, documentando la alteración olivino-serpentina en la alteración Magnetita masiva. 64

Figura 18. Fotomicrografías de secciones delgadas en nicoles cruzados, documentando la alteración siderita-magnetita en la alteración Magnetita masiva. 65

Figura 19. Fotomicrografías de secciones delgadas en nicoles cruzados, documentando la alteración desarrollada en el endoskarn. 67

Figura 20. Fotomicrografías de secciones delgadas en nicoles cruzados, documentando la alteración Endo Skarn-actinolita/ tremolita. ... 69

Figura 21. Veta Galena-Esfalerita-Tetraedrita. 71

Figura 22. Cuerpos de Sulfuros Masivos de magnetita. Esfalerita-Cpy-Py cuya matriz es de serpentina magnetita cuyos cuerpos son lenticulares. 72

Figura 23. Diseminaciones. 72

Figura 24. Sección 27 W Cu. 76

Figura 25. Sección 27 W Molibdeno. 76

Figura 26. Sección Geológica con Contenido de Arsénico. 77

Figura 27. Mapa Geológico de Zonamiento. 79

Figura 28. Alteración actinolita-tremolita y serpentina – Clorita – magnetita. 80

Figura 29. Distribución Calcopirita y flogopita. 82

Figura 30. Distribución de Flogopita y Calcopirita. 83

Figura 31. Zonamiento Biotita. 84

Figura 32. Zonamiento de ígneo meta sedimentos (1) 85

Figura 33. Zonamiento de ígneo meta sedimentos (2) 86

Figura 34. Zonamiento de hornfels de diópsido y talco. 87

Figura 35. Serpentina Magnetita > 40 % SEMA. 88

Figura 36. Puntos de dispersión de los minerales. 92

Figura 37. Molibdeno flogopita biotita calcopirita. 93

Figura 38. Mapa litológico y de alteraciones, febrero 2019. 95

Figura 39. Mapa del Minado RatoX %. 97

Figura 40. Mapa del Minado de Arsénico %. 98

Figura 41. Mapa del Minado de Zinc %. 99

Figura 42. Mapa del Minado de Flúor en ppm. 100

Figura 43.Mapa del Minado de Magnesio %. 101

Figura 44. Mapa de presencia de Talco %. 103

Figura 45. Plano Geológico de ubicación de las Muestras Extraídas. 107

Figura 46. Comparación Cu Secuencial - Cu Soluble en Ácido Sulfúrico (CuSolH+). 109

Figura 47. Comparación Cu Secuencial - Cu Soluble en Cianuro (CuCN). 110

Figura 48. Comparación Cu Secuencial - Cu Residual (CuRes). 110

Figura 49. Comparación CuSolH + (Laboratorio1) vs. CuS cítrico (Cu soluble en Ácido Cítrico -Laboratorio 1). 111

Figura 50. Comparación CuSolH+ (Laboratorio 1) vs. CuS cítrico (Laboratorio 2). 111

Figura 51. Distribución Minerales de Cobre. 114

Figura 52. Liberación Especies de Cobre. 115

Figura 53. Especies de Zinc. 116

Figura 54. Porcentaje de Talco en el Circuito de Flotación de Cobre. 123

Figura 55. Talco enviado a planta concentradora. 124

Figura 56. Recuperación en espesadores. 124

Figura 57. Recuperación en tanque de agua. 125

Figura 58. Recuperación de cobre. 126

Figura 59. Alternativas para reducir el flúor.....128

Figura 60. Antes y después de la dosificación de CMC en contenidos de minerales insolubles. 130

Figura 61. Relación entre el consumo CMC y la calidad de cobre. 133

Figura 62. Diagrama del Concentrado 135

Resumen

Toromocho es un yacimiento Pórfido Skarn, principalmente con mineralización de cobre y molibdeno. Este tiene una extensión de 5 kilómetros por 6 kilómetros, el cual se encuentra dentro del anticlinal Morococha y del Domo de Yauli; está compuesto por vetas de tipo Este a Oeste con minerales de Pb, Zn, Ag y Cu. Los análisis de DRX fueron de tipo cualitativo y cuantitativo que beneficiaron a las diversas fases del proceso minero y complementado con trabajos de campo. Lo anterior ha permitido realizar cinco zonamientos: el primero de actinolita tremolita, el segundo de serpentina magnetita, el tercero de calcopirita, flogopita y biotitas, el cuarto de *hornfels* de diópsido clorita, y el quinto de skarn de serpentina alterado a talco. Cabe recalcar que el talco es muy perjudicial para la metalurgia. En cuanto al minado realizado en el yacimiento de Toromocho, se empleó un procedimiento selectivo aplicando *Blending*. El análisis por difracción de rayos X (DRX) brindó la data mineralógica y de contaminantes que permitió realizar los polígonos para obtener un buen blending y controlar los niveles de talco. En la planta metalúrgica, el análisis DRX determinó los aspectos mineralógicos y permitió manejar los límites máximos permisibles de los minerales penalizables (flúor, magnesio, arsénico y zinc), el Carboxyl Methyl Cellulose (CMC) dosificándose para limpiar y deprimir el talco del concentrado de cobre y el NaSH que cumplió la función de sulfidizar el mineral de cobre oxidado (alto RatoX) para obtener una buena recuperación final de cobre y plata. Con ello, se recuperó alrededor del 80% de cobre, logrando la optimización del tratamiento metalúrgico.

Palabras clave: mineralización, tratamiento metalúrgico, zonamiento, DRX

Abstract

Toromocho is a Porphyry Skarn deposit, mainly with copper and molybdenum mineralization. This has an extension of 5 km by 6 km and is within the Morococha anticline and the Yauli Dome; It is composed of East to West type veins with Pb, Zn, Ag and Cu minerals. The DRX analyzes were of a qualitative and quantitative type that benefited the various phases of the mining process and were complemented by field work. This has allowed five zoning to be carried out: the first of actinolite tremolite, the second of serpentine magnetite, the third of chalcopyrite, phlogopite and biotites, the fourth of hornfels diopside chlorite, and the fifth of serpentine skarn altered to talc. It should be noted that talc is very detrimental to metallurgy. Regarding the mining carried out in the Toromocho deposit, a selective procedure was used applying Blending. The X-ray diffraction (or DRX) analysis provided the mineralogical and contaminant data that allowed the polygons to be made to obtain a good blending and control the talc levels. In the metallurgical plant, the DRX analysis determined the mineralogical aspects and allowed managing the maximum permissible limits of the penalizable minerals (fluorine, magnesium, arsenic and zinc), the Carboxyl Methyl Cellulose (CMC) dosed to clean and depress the talc of the concentrate of copper and NaSH that fulfilled the function of sulfidizing the oxidized copper ore (high RatoX) to obtain a good final recovery of copper and silver. With this, around 80% of copper was recovered, achieving the optimization of the metallurgical treatment.

Keywords: mineralization, metallurgical treatment, zoning, DRX

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Situación problemática

El zonamiento mineralógico ha cobrado importancia para los estudios mineros modernos porque califica y describe el estado de los yacimientos mineros, así como también anticipa los problemas que podrían afectar el tratamiento de los minerales (Espinoza et al., 2021). Para ello, se debe caracterizar la mineralogía con ayuda de distintas herramientas, como lo son la microscopia óptica, la microscopia electrónica, la difracción de rayos X y otros (Londoño et al., 2010). En el caso particular del yacimiento Toromocho, la caracterización mineralógica resulta compleja debido a que está compuesta por varias alteraciones; además, la presencia de minerales tóxicos agrega dificultad a la exploración, extracción y posterior tratamiento.

La Geología del Proyecto Toromocho es bastante compleja, con presencia de diferentes alteraciones geológicas en una litología de Skarn como alteración de actinolita-tremolita, serpentina-magnetita y otras alteraciones, como también la presencia de alteraciones en una litología de intrusivo como la alteración potásica y la alteración fílica, y una litología hornfels (Alvarez, 1996).

La interpretación geológica del yacimiento, debido a la presencia de diversas alteraciones geológicas, se estima, subjetivamente, son de origen hidrotermal con valores cuantitativos y alteran del logueo geológico. Por ende, el *Blending* a realizar no sea óptimo debido a que no se sabe las zonas o áreas contaminadas y, en consecuencia, tiene un efecto negativo en la performance de la planta de procesos en las etapas de molienda y flotación en cuanto al mineral procesado, la recuperación de cobre y el grado de cobre final. Existen muchas técnicas de caracterización mineralógica como la microscopia petrográfica, microscopía electrónica, difracción de rayos X (DRX), NIR y entre otras los cuales ayudan y permiten la interpretación geológica y mineralógica del yacimiento. Las técnicas de caracterización mineralógica tienen ventajas y desventajas como lo es la técnica de difracción de rayos X, el cual permite

identificar las especies mineralógicas de una muestra, mas no permite ver las asociaciones de los minerales entre sí el cual en microscopia petrográfica o electrónica si se puede apreciar.

A pesar de las limitaciones de la técnica de caracterización mineralógica, la técnica difracción de Rayos X (DRX) es muy versátil debido a su tiempo de respuesta y preparación de muestras. Por ende, se asume como una técnica muy apropiada para obtención de resultados confiables y eficientes en la industria minera en cuanto a identificación y cuantificación de especies mineralógicas (Villanueva, 2017).

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema general

¿De qué manera se evalúa el zonamiento mineralógico con difracción de rayos X para lograr la optimización del tratamiento metalúrgico en el yacimiento Toromocho?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Qué características geológicas locales, mineralógicas y de mineralización tiene el yacimiento Toromocho?
- ¿Cómo es el zonamiento de la mineralización en Toromocho aplicando la difracción de rayos X?
- ¿Cuáles son las leyes con límites para realizar una actividad de minado seguro en el yacimiento Toromocho?
- ¿Cómo optimizar el tratamiento de minerales del yacimiento Toromocho?

1.3. Justificación teórica

Los análisis de difracción de rayos X permiten conocer, realmente, las asociaciones mineralógicas del yacimiento, así como mejorar la recuperación, y el mejor *blending* en base a las litologías y alteraciones geológicas. Con ello, se obtendrá resultados óptimos en la planta de procesos y, con este estudio

de difracción de rayos X (DRX), se podrá tener bien caracterizados los materiales mediante la difracción de rayos X (DRX). Además, se correlacionará los materiales con el cartografiado superficial de bancos y los resultados de dicho estudio. Para esto, se tiene dos equipos de difracción de rayos X (DRX) D8 y D10, para dicho estudio.

No obstante, como no se tiene bien caracterizados los tipos de materiales en la mina, se decidió asumir el estudio para poder realizar un zonamiento debido a la variabilidad del yacimiento. Ello conlleva a que estas variables influencien, directamente, en la performance de la planta de procesos y un mejor "blending" que va desde mina a planta procesos. En cuanto a los minerales complejos que macroscópicamente, no son detectados en el logueo geológico; es por eso que el problema fundamental es en el tratamiento metalúrgico. Al tener un buen zonamiento y características de los minerales, se permitirá optimizar la dosificación de reactivos en la planta concentradora para poder tener un concentrado de mayor calidad. El estudio geológico, en base a difracción de rayos X (DRX), sirve para poder tener una buena caracterización de los materiales en tanto en el "blending", logueo de "blasthole" y su posterior tratamiento metalúrgico. Con ello, se observará un buen resultado en la performance del mineral alimentado a la planta de procesos del cual se puede optimizar el mineral tratado en la etapa de molienda y obtener óptimos resultados en la recuperación de cobre y el grado final en la etapa de flotación y molienda.

El uso y técnica de la difracción de rayos X (DRX) es por que proporciona análisis rápidos y detallados sobre la estructura cristalina de los minerales contaminantes. El patrón de difracción producido por la interacción de los rayos X con los átomos de un mineral contaminado es único para ese mineral. Este patrón puede utilizarse para identificar el mineral. Debido a esta propiedad, el patrón de difracción puede considerarse como una huella digital de la fase cristalina que se ha formado y puede utilizarse con fines de identificación. Se aplica esta técnica de difracción de rayos X (DRX) para que ayude a optimizar el procesamiento mineralógico de cobre (Cu) y las estrategias de procesamiento que, a su vez, permiten ahorrar tiempo y dinero.

El resultado de los estudios lo utiliza de manera permanente el ingeniero geólogo para diferenciar de los minerales de valor y de los contaminantes y tomar decisiones en tiempo real bajo condiciones críticas. Hay que aclarar que, hasta la fecha, el estudio mineralógico ha adquirido mayor importancia en la planta de tratamiento de minerales. La presión económica en la mina ha llevado a optimizar el tratamiento de minerales para maximizar su recuperación y controlar los costos.

1.4. Justificación práctica

Con la presente investigación, se justifica socialmente, ya que los resultados de estos análisis de difracción de rayos X (DRX) traerán beneficios a la empresa y trabajadores en general. En suma, al tener mejor recuperación y mejor el grado de cobre se generará mayor renta al país y empresa, y aumentará el canon minero.

La presente investigación se justifica económicamente, puesto que busca implementar una nueva tecnología con el equipo de difracción de rayos X (DRX) que permite analizar todos los minerales que se encuentran en el yacimiento. Con ello, se podrá cuantificar las zonas contaminadas para poder realizar un buen “blending” que este análisis ayudará a tener un buen performance en la recuperación del grado de mineral en la planta.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Evaluar el zonamiento mineralógico con difracción de rayos X para lograr la optimización del tratamiento metalúrgico en el yacimiento Toromocho.

1.5.2. Objetivos específicos

- Caracterizar la geología local, mineralogía y mineralización del yacimiento Toromocho.
- Definir el zonamiento mineralógico para el yacimiento Toromocho aplicando la difracción de rayos X.

- Determinar las leyes con límites para realizar una actividad de minado seguro en el yacimiento Toromocho.
- Optimizar el tratamiento metalúrgico en el yacimiento Toromocho.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

a) Caracterización mineralógica para el Proceso de Producción de Concentrado de Cobre en el Yacimiento Pórfido Skarn del Batolito Andahuaylas –Yauri (Vasquez, 2019).

Conocer a fondo las características de los minerales derivados de un proceso de producción de cobre en un yacimiento Pórfido Skarm es trascendental para recuperar el mineral de la forma más óptima. Por lo tanto, el propósito del estudio fue determinar las especies minerales que están incluidas en las muestras de baja recuperación de cobre del material que fue extraído de un depósito de skarn de pórfido de cobre y luego procesado por flotación de minerales. Empleando el trabajo en campo, laboratorio y gabinete se obtuvieron los siguientes resultados: el material minado estuvo compuesto por arcilla (5.61%), clorita (5.41%), sulfuros de hierro (11%). Además, el 23.06%, representado por material minero ganga, afectó la calidad final del concentrado de cobre. El estudio concluyó que la recuperación (menor a 80%) se vio obstaculizada por las concentraciones influentes.

a) Caracterización mineralógica e implicancias geometalúrgicas en el Yacimiento Pórfido Skarn del Batolito Yauri Andahuaylas (Nina, 2019).

Conocer los aspectos más relevantes y sus implicancias geometalúrgicas del material minero extraído es imprescindible para establecer parámetros en planta y efectuar la explotación sin experimentar desfases. Por ello, el objetivo de la investigación fue diseñar una caracterización mineralógica de un yacimiento minero localizado en Andahuaylas, Cusco. Empleando el trabajo en campo, laboratorio y gabinete se obtuvieron los siguientes resultados: las muestras estuvieron compuestos en su mayoría por sulfuros primarios calcopirita y sulfuros secundarios bornita covelita; el skarn estuvo

formado por calcopirita y bornita. Además, la presencia de intrusivos osciló entre 2 y 4%. El estudio concluyó que los intrusivos no tuvieron un gran impacto en el procesamiento y, en consecuencia, el consumo de energía; sin embargo, el investigador recalcó que dichos componentes en cantidades elevadas perjudicarían el proceso metalúrgico.

b) Influencia del carboximetil celulosa en la Depresión del Talco en el Circuito Cleaner Bulk Minera Chinalco (García y Socualaya, 2018).

La minera Chinalco cuenta con una planta concentradora, la cual se encarga de procesar rocas sedimentarias de naturaleza calcárea, arenisca y lutita. El área de Geología y Mina identificó talco en la composición química y física del mineral, lo cual obstaculizó la operación y la metodología estándar de procesamiento. Por ello, el objetivo de la investigación fue reducir el contenido de talco en las muestras concentradas a través del efecto de un carboximetil celulosa. Empleando un procedimiento experimental con pruebas de flotación, se obtuvieron los siguientes resultados: el efecto del carboximetil celulosa, los valores de insoluble y flúor se incrementan en el concentrado reducen paulatinamente en el relave a la par que la flotación se mayor. Basándose en ello, el estudio concluyó que el talco reacciona con más rapidez a diferencia del carboximetil que se demora más en acondicionarse.

c) Estudio Mineralógico Distrito de Caimanes (Vallette, 2017).

En el distrito de Caimanes los minerales son explotados por mineras de pequeña escala: dicho hecho se asoció directamente con el desarrollo de skarn. Este lugar es uno de los tantos depósitos que concentra una cantidad anómala de minerales como plata, oro, molibdeno, cobre, entre otros. Por ello, el objetivo de la investigación fue caracterizar geoquímica y mineralógicamente los cuerpos mineralizados en Caimanes a modo de anticipar probables problemas en las siguientes etapas del proceso

minero. Empleando un análisis mineralógico y geoquímico para analizar muestras recogidas en distintos puntos del distrito, se obtuvieron los siguientes resultados: los patrones geoquímicos de la franja analizada fueron similares, solo hubo pocas diferencias en las concentraciones de algunos elementos. Por ejemplo, el territorio se vio enriquecido por cobre y molibdeno, a excepción del norte en donde resaltó más el molibdeno. También se observó una importante cantidad de plata y cobre alrededor de dos mineras (denominadas Mercedes y Tres Marías) y otras concentraciones altas de zinc y cadmio en una mina cercana (llamada Capagato). La concentración de molibdeno y cobre mineralizados se ubicó en las unidades de skarn de granates y skarn de piroxenos. El estudio concluyó que Caimanes tiene mucho potencial, siendo un lugar altamente atractivo para una exploración más profunda que puede traer grandes beneficios.

d) Flotación selectiva de sulfuros complejos usando reactivos de baja toxicidad (Sarquís, 2012).

Los depresores empleados en las pruebas de flotación de sulfuros complejos solían ser el cianuro, cromatos, sulfitos hidrosulfuros, etc.; sin embargo, existió el interés por reemplazar dichos reactivos considerados dañinos para el medio ambiente por otros biodegradables. Por ello, el objetivo de la investigación fue indagar acerca del efecto de extractos naturales como depresores en la flotación selectiva de sulfuros polimetálicos en yacimientos localizados en Argentina, Chile y Perú. Empleando un trabajo en campo y laboratorio que se basó en ensayos de flotación estándar y análisis de muestras en celdas, se obtuvieron los siguientes resultados: El extracto de quebracho actuó como (a) un fuerte y selectivo depresor de la pirita, (b) un débil depresor de la calcopirita, (c) un fuerte depresor de la molibdenita. Asimismo, se identificó que la calidad de agua y el pH fueron factores que incidieron en el efecto depresor. A partir de esto, el investigador propuso un proceso de depuración del concentrado de molibdeno a través del recubrimiento de quebracho y reactivación del sulfuro. El estudio concluyó que la

separación de sulfuros de cobre y molibdeno se incrementaba si la calcopirita era el mineral predominante o si la oxidación era muy baja. En el caso de los minerales levemente alterados y con sulfuros secundarios, la recuperación se redujo entre 5% y 10%.

e) NI 43-101 technical report on pre-feasibility study (Candente Copper Corporatión, 2011).

La mineralización de cobre en Cañariaco Norte está relacionada con intrusiones de pórfido, brechas y alteración potásica, propilítica, fílica, argílica y argílica avanzada. Sin embargo, los límites de mineralización en el depósito no se conocen bien. “AMEC Foster Wheeler” recomienda construir un modelo de zonificación mineral para la próxima fase de estudio. Una combinación de litología, alteración y zonas minerales debería proporcionar la mineralizada y la definición de dominios de estimación de grado. Aunque todas las unidades litológicas albergan mineralización, los grados promedio varían. En general, los grados de cobre más altos (> 0.5% Cu) ocurren en las unidades de pórfido biotita-feldespato y brecha polimíctica. Los grados intermedios de cobre (0.35% a 0.5% Cu) son más comunes en la brecha hidrotermal y el cuarzo grueso. Entre las principales especies de minerales de cobre está, predominantemente, la calcopirita, covelita calcocita, enargita, bornita tennantita y digenita, y traza tetraedrita. Los minerales de sulfuro de cobre se asocian, principalmente, con pirita y otros minerales de sulfuro de ganga. En el caso de los minerales de ganga no metálicos (cuarzo y micas, biotita, clorita, grupo de arcilla, mineral de sulfuro de ganga, pirita), que está presente como pirita liberada o en asociación con otros minerales de sulfuro, el que causa problemas en el tratamiento metalúrgico es la enargita. Se realizaron varias pruebas de tostado muestran que el contenido de arsénico esperado normalmente dará como resultado una calcina con un contenido de arsénico residual de 0.05% a 0.2% a menos que haya calcio presente en la ganga o en los sistemas de reactivos.

f) Rio Tinto announces Inferred Mineral Resource of 2.8 billion tonnes at La Granja, Perú. (Rio Tinto, 2008).

El depósito de la Granja, localizado en Cajamarca – Perú, es de tipo pórfido de cobre con brechas y skarn mineralizados. Los principales intrusivos son los pórfidos de dacita que, con las brechas, forman diatremas irregulares en las rocas. El proceso de mineralización y el emplazamiento de los intrusivos transformaron las calizas a cuerpos de skarn formando las brechas; además, el mineral hipógeno y los conjuntos de alteraciones desarrollaron conjuntos de minerales secundarios que se han acortado por la erosión. El problema fundamental es el alto contenido de arsénico donde se realizaron varias etapas sucesivas de lixiviación de columnas en muestras de mineral (escala de hasta una tonelada) a través de diversos tipos de roca donde tiene elementos nocivos normales y asociados con los depósitos de cobre andino donde incluyen bajas cantidades de mercurio (0.5ppm) promedio restringido principalmente a venas hidrotermales y arsénico. Los niveles de arsénico son de 300 ppm en el óxido de hierro y un promedio de 200 ppm en las zonas hipógenas que ocurren predominantemente dentro de la enargita.

g) Flotation Process Response of Ok Tedi Fluorine Bearing Minerals. (Pangum, L.S. Manlapig, E.V. Mackinnon, I.D.R. Lauder, D.W., 1997).

La mina Tedi Mining Limited (OTML) produce concentrados de cobre y oro personalizados a partir de los minerales de pórfido Skarn contenidos en el Monte fubilan. Esta mina presentó flúor en los concentrados de cobre y oro, situación que complicó la labor de los metalurgistas. Aunque el flúor se distribuye a través de los minerales de las gangas, contenidos en los minerales de la mina, la presencia en talco y flogopita (naturalmente fluorosilicatos flotantes) ha demostrado ser la fuente predominante de flúor en el concentrado final. Por ello, el objetivo de la investigación fue determinar el comportamiento metalúrgico de las

especies mineralógicas del yacimiento minero de Tedi. Empleando una trabajo de campo y laboratorio e instrumentos como difracción de rayos X y microscopio electrónico se obtuvieron los siguientes resultados: Se encontraron siete minerales con flúor (talco, flogopita, biotita, anfíboles, esfena, apatito y arcilla). El talco tuvo una hidrofobicidad natural débil con una presencia mínima; la flogopita no tuvo hidrofobicidad significativa pero su presencia sí fue dominante; los anfíboles tuvieron un comportamiento hidrofílico; la esfena, biotita y fluoroapatita tuvieron muy poca presencia.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Alteraciones de origen hidrotermal

La alteración hidrotermal es un proceso geológico que tiene lugar cuando los sedimentos o las rocas se someten a los impactos del agua que fluye o de fluidos a alta temperatura que son químicamente activos. Este proceso modifica la composición mineral, así como la velocidad a la que se producen determinadas reacciones. La alteración hidrotermal tiene lugar a temperaturas y presiones que se encuentran en el extremo inferior de la escala; las más comunes en los depósitos son alteración propilítica, argílica argílica avanzada, silicificación, potásica y fílica (Valera, 1997).

2.2.2. Caracterización mineralógica

La caracterización mineralógica, en procesamientos de minerales, es la etapa de caracterización de condiciones mineralógicas más importantes donde se identifica las características físicas de la muestra de mineral (densidad aparente, peso específico, dureza, índice de abrasión). También se realizan estudios por microscopia de barrido (TIMA o QEMSCAM). El mineral de cabeza detecta la condición de las especies de minerales económicamente importantes y el posible impacto en la recuperación. También se estudian microscopia de barrido de las especies mineralógicas, también estudian los relaves finales en las posibles causas de pérdida de sulfuros valiosos (Manzaneda, 2019).

2.2.3. Especies mineralógicas

Las diferentes especies de minerales que se caracterizan por una estructura cristalina determinada y por una composición química, que pertenece a un rango de variaciones continuas y que se encuentran en equilibrio bajo unas condiciones termodinámicas determinadas, (Manzaneda, 2010).

2.2.4. Técnica de difracción de rayos X

Cuyo fenómeno físico que puede tener lugar como resultado de la interacción entre un haz de rayos X de una determinada longitud de onda y un sólido cristalino. El principio de la difracción de rayos X es la dispersión coherente de un haz de rayos X por el material observado (mantiene la longitud de onda de la radiación de rayos X).

2.2.5. Técnica de difracción de rayos X policristalina

Permite los rayos en muestra policristalina abordar la identificación de fases cristalina, tanto en su aspecto cualitativo como cuantitativo, estudios del polimorfismo, transiciones de fase y soluciones sólidas, medidas de tamaño de partículas y determinación de tamaños de fase.

2.2.6. Descomposición Térmica de una fase cristalina

El diagrama de difracción de una fase cristalina puede considerarse como la huella dactilar única de la fase ¿Qué sucedería si esa fase sufre un cambio en su estructura cristalina? Si los factores significativos que caracterizan su patrón de difracción están cambiando, su huella digital también cambiará. (Universidad del País Vasco, 2006).

2.2.7. Tratamiento metalúrgico

Es el tratamiento que se realiza a los minerales, y consiste en eliminar las impurezas y llevar a cabo un procedimiento que puede ser químico o físico; el objetivo es hacer que el mineral sea utilizable para su posterior procesamiento con el fin de crear un metal. El proceso metalúrgico consta de varias etapas: en primer lugar, se extrae el metal de la mena que lo contiene de forma natural; en segundo lugar, se separa de la ganga, que es el nombre que recibe

la mezcla de arcillas y silicatos que puede encontrarse en el metal; y, por último, se purifica eliminando las impurezas que aún pueda haber en el metal después de haberlo separado de la ganga. (Payano & Setién, 2013).

2.2.8. Depósitos tipo pórfidos de cobre

En general, cada caso tiene su propio nivel de complejidad y presentan características litológicas metálicas muy diversas. Los yacimientos de pórfidos de cobre se componen de mineralización dispersa y de vetas de stockwork. La mineralización se reponía en cada tipo de roca huésped alterada por soluciones hidrotermales en patrones zonales consistentemente concéntricos. Los pórfidos cupríferos son yacimientos de baja ley, pero de gran tonelaje. Generalmente, están asociados a rocas ígneas intrusivas con fenocristales de feldespato en una masa fundamental cristalina de grano fino. Estos depósitos pueden subdividirse en distintos tipos considerando su contenido metálico estos tipos incluyen Cu-Mo, Cu-Au. La mineralización y alteración pueden presentarse tanto en intrusivos como en las rocas de caja (Lowell & Guilbert, 1970).

2.2.9. Logueo geológico Blast Hole

Permite describir los recortes de perforación que se recogieron en su interior. El logueo es una herramienta de apoyo que se utiliza en el campo y que permite determinar el tipo de roca, la alteración y la mineralización a determinadas profundidades. La información que se recoge a través del proceso de logueo se anota en un registro geológico utilizando una variedad de formas diferentes. Se trata de secuencias de acciones que permiten proporcionar una descripción de los cortes de perforación que se adquirieron en el campo. Es un instrumento complementario que permite conocer la mineralización y las formaciones geológicas. La información que se recopila mediante el proceso de logueo se registra en un registro geológico utilizando una variedad de formas diferentes. (Ccapa, 2019).

2.2.10. Aspectos metodológicos

Una descripción cualitativa En el microscopio de la muestra concentrada de zinc indica lo siguiente: Importante presencia de esfalerita del tipo marmatita y menor presencia de la especie de esfalerita 2, (ef. 2) que son esfaleritas con inclusiones finas de calcopirita y hierro, se aprecia cantidades menores y libres de cobre como calcopirita y hierro como pirita y pirrotita. Los insolubles o gangas son de una especie de menor presencia y están amarradas especialmente con esfalerita además se observa galena. También se aprecia algunos granos de esfalerita tipo 3 que son inclusiones de pirrotita en esfalerita.

Que la mayor cantidad de especies mena de zinc esfalerita (ef) + esfalerita 2 + esfalerita 3 (ef2+ef3) presentes en el concentrado de zinc están severamente libres, igualmente se encuentra libre de calcopirita.

Las gangas no quedan liberadas en tramos menores como una secuencia lógica, sino que el concentrado de zinc se observa las gangas tiene una presencia especial porque en todas las fracciones de tamaño tiene poca liberación.

La mena de zinc por esfalerita (ef) esfalerita 2 (ef2) y esfalerita 3 (ef3) representan un total del 91.9 % en pesos, la relación de esfaleritas contaminadas por calcopirita y pirrotita a esfalerita limpia es de 4.3%, entonces no sería una causa definitiva de contaminación de concentrado de zinc en la flotación porque el límite sea al 20% puede tener serios problemas de selectividad en flotación.

Las esfaleritas tipo 2 y 3 son difíciles de liberar por remolienda solo representa 4.1%del total de esfalerita del concentrado. (Manzaneda 2010)

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

La investigación tiene un diseño no experimental correlacional porque según Ríos (2017), en un estudio no experimental no se manipulan las variables en análisis, lo que limita al investigador a observar el fenómeno en un contexto real. Además, un estudio correlacional busca medir el grado de relación o influencia entre dos variables.

Tipo y enfoque de investigación

La investigación es de tipo aplicada porque resolvió problemas prácticos de mineralogía y su tratamiento en el yacimiento Toromocho. De acuerdo a Cabezas, Andrade y Torres (2018), los estudios aplicados, como su nombre lo menciona, tienen una aplicación inmediata a la solución de problemas prácticos (p. 34), diferenciándose de los estudios básicos que se limitan a los postulados teóricos.

La investigación tiene un enfoque mixto porque se analizaron datos cuantitativos y cualitativos, interpretando cada uno de los problemas de mineralogía y tratamiento en dicho lugar en observación, así como los resultados de la Difracción de Rayos X (DRX). Para Cabezas, Andrade y Torres (2018), los estudios mixtos se caracterizan por emplear técnicas cuantitativas y cualitativas con el propósito de obtener resultados más importantes y profundos.

La investigación es observacional porque se efectuó la observación de campo y laboratorio a través del análisis de diversos minerales en el campo que se recogieron muestras y se realizó el zonamiento. Acorde a Sánchez, Reyes y Mejía (2018), los estudios observacionales se denominan a métodos de investigación en el que se emplea la observación como técnica principal, registrando los datos acordes a los sucesos analizados.

3.2. Unidad de análisis

La unidad de análisis se considera a todo el proceso de zonamiento mineralógico con difracción de rayos X para el tratamiento metalúrgico en el Yacimiento Toromocho

3.3. Población de estudio

Se obtuvieron 11,000 muestras pulverizadas de Blast Hole.

3.1. Tamaño de la muestra

Se utilizaron 8,600 muestras pulverizadas de Blast Hole, teniendo en cuenta su concentración de los minerales contaminantes que sobrepasan los límites máximos permisibles.

3.2. Selección de muestra

La muestra fue seleccionada en base a la geología, mineralogía, concentración de los minerales contaminantes, identificación con difracción de rayos X (DRX).

Procedimientos

- Se recopiló información de fuentes secundarias (estudios preliminares) acerca de la geología del yacimiento Toromocho.
- Para este tipo de investigación, se utilizaron muestras de *Blast Hole* para luego de ser ensayado para sus diferentes ensayos químicos.
- Análisis mineralógico por Difracción de Rayos X (DRX), se utilizó pulpas de muestras para luego ser mezcladas o homogenizadas; luego, se seleccionó una muestra representativa del cuarteo (2 gramos) para luego ser llevadas a la plaqueta.
- Se realizó el cartografiado de la geología y de las alteraciones correlacionar los resultados con la geología local.

3.3. Técnicas de recolección de datos

La primera técnica de recolección fue la revisión bibliográfica para la obtención de información de fuentes secundarias. El respectivo instrumento fue una ficha de revisión bibliográfica, en el que se tuvo en cuenta datos relevantes para la construcción de este trabajo de investigación.

La segunda técnica fue la observación controlada y estructurada para el análisis de las pulpas de muestras, recogiendo información relevante para el desarrollo del estudio. El respectivo instrumento fue una libreta de notas, en donde se anotó los resultados.

La tercera técnica fue la entrevista para conocer los procedimientos llevados a cabo por la minera. El respectivo instrumento fue la guía de entrevista.

3.4. Análisis e interpretación de la información

La información recopilada de las fuentes secundarias fue ordenada a través de mapas mientras que la codificación de las muestras analizadas por la difracción de rayos X (DRX) y otros resultados producto del zonamiento fue organizada en cuadros y gráficos. Además, se evidenció la realización del presente estudio con fotografías.

La información recopilada de fuentes primarias y secundarias fue ordenada de la siguiente forma:

En primer lugar, se caracterizó la geología local, la mineralogía y la mineralización reconociendo los resultados de estudios preliminares, insertando el mapeado del territorio y evidencia fotográfica de los minerales hallados.

En segundo lugar, se definió el zonamiento recogiendo muestras “Blast Hole” y procesándolas con ayuda de la difracción de rayos X; esto permitió cuantificar los minerales insolubles (como talco, flúor, magnesio etc.). Además, se identificó el perfil litológico y las alteraciones; a partir de ello, se elaboró un “blending” adecuado para obtener un mejor performance metalúrgico.

En tercer lugar, se determinó las leyes con límites con el propósito de que el minado en el yacimiento Toromocho sea seguro. Esto se efectuó con ayuda de los planes de minado mensual y anual, los cuales reconocieron restricciones de minerales contaminantes. Con ello, se identificó el momento en que el minado fue riesgoso para los trabajadores y el medio ambiente.

En cuarto lugar, se optimizó el tratamiento metalúrgico a través de la elección de pruebas para reducir los contaminantes y elaborar un “blending” adecuado. Esto se logró con los datos obtenidos en las fases anteriores.

3.5. Variables

Cada variable que se presenta a continuación se ha definido de acuerdo con la información obtenida en el marco teórico de la presente tesis (ver anexo 6)

3.5.1. Variable independiente

La variable independiente de este trabajo es “zonamiento mineralógico con difracción de rayos X”.

3.5.2. Variable dependiente

En esta tesis, la variable dependiente general es “tratamiento metalúrgico del yacimiento Toromocho”.

3.5.3. Indicadores

Los indicadores de la variable independiente son:

X1: Área y volúmenes de zonas de mineralizadas

X2: Leyes con límites para el minado

X3: Contenido mineralógico.

Los indicadores de la variable dependiente son:

Y1: Porcentaje de recuperación de minerales

Y2: Porcentaje de “Blending”

Y3: Porcentaje de minerales contaminantes.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Generalidades

Ubicación y accesibilidad

El proyecto Toromocho consiste en una mina de tajo abierto, cuenta con yacimientos de cobre y molibdeno. Está situada en la parte central de los Andes del Perú, en el distrito de Morococha, provincia de Yauli, departamento de Junín. Actualmente, el terreno se encuentra activamente explotado por la Minera Chinalco Perú S.A.

El terreno en esta zona es bastante montañoso, con alturas que oscilan entre los 4.400 y los 5.000 metros, a excepción de algunos picos aislados como el Yanashinga, que alcanza una altura de 5.290 metros, y el Anticona, que se encuentra a una altura de 5.120 metros y está cubierto de nieve. Las cuencas de los ríos Rumichaca y Huascacocha son el objetivo principal de este proyecto. Estas cuencas desembocan en la cuenca del río Yauli, que a su vez desemboca en el océano Atlántico a través de los ríos Mantaro y Amazonas.

A la región del proyecto se puede llegar desde la ciudad de Lima por medio de la Carretera Central, que conduce a una carretera asfaltada que lleva a Morococha (a 142 kilómetros), así como por el Ferrocarril Central (a 173 kilómetros). Ambas carreteras conectan la región del proyecto con la ciudad de La Oroya, que está situada a unos treinta dos kilómetros, por carretera y a unos treinta y cinco kilómetros, por tren de la zona del proyecto. (ver Figura 1).

Clima y meteorología

El clima de la región de investigación se caracteriza por ser montañoso, lo cual es característico de los hábitats de gran altitud como los que se encuentran en la sierra peruana. Este clima se distingue principalmente por ser frío y seco, así como por tener dos estaciones bien diferenciadas: la estación de lluvias, que se da entre los meses de octubre y marzo, y la estación seca, que se da durante los demás meses del año. La ubicación

altitudinal de la zona de investigación es el aspecto más importante que tiene un impacto significativo en el clima local (aproximadamente 4.500 m sobre el nivel del mar en promedio).

Suelos

La región de estudio del proyecto Toromocho se distingue por dos entornos distintos: uno es el entorno del valle de Yauli, y el otro es la zona de alta montaña, que se compone principalmente de pastos altoandinos. Ambos entornos se definen por su distinta flora natural. Los principales usos de los recursos naturales incluyen actividades como la minería y el pastoreo.

Agua superficial

Los sistemas de drenaje que se encuentran dentro del área del proyecto son un componente de la cuenca que es drenada por el río Yauli, que a su vez desemboca en el río Mantaro, que es un componente de la vertiente atlántica. La cuenca del Huascacocha, la cuenca del Pucara y la cuenca del Rumichaca son los componentes que conforman estas redes de drenaje. La quebrada Tunshuruco es un afluente que forma parte de la cuenca de Rumichaca. Según el análisis fisiográfico de las cuencas primarias, la cuenca del Huascacocha tiene una extensión de 65,9 kilómetros cuadrados, mientras que la cuenca del Rumichaca tiene una extensión de 66,1 kilómetros cuadrados.

Aguas subterráneas

Las capas de caliza y dolomía que conforman la formación Pucará son unidades hidrogeológicamente significativas que se correlacionan con las que son importantes en la zona de Morococha. De manera similar, el acuífero primario que forma parte del sector de la quebrada Tunshuruco se puede encontrar siguiendo una línea de afloramientos de roca caliza; sin embargo, la circulación de este acuífero está restringida a las zonas de roca agrietada y porosa. El sistema acuífero se rellena principalmente por la penetración de la precipitación y el derretimiento de la nieve en las regiones montañosas que se ubican en la periferia del valle, así como, en mayor medida, por la filtración de las lagunas de Huacracocha y Churuca. Es importante destacar que la sección del sitio del proyecto que recibe su reposición de la nieve perenne no es parte de esa área.

Geomorfología

La cordillera de los Andes constituye el marco geomorfológico ideal para la región de investigación, que se encuentra en sus alrededores. En la zona del proyecto se pueden encontrar signos de deglaciación reciente y cambios provocados por los procesos periglaciares en curso. La existencia de pequeñas formas características de los resultados de los procesos periglaciares, como la fluencia, la solifluxión y los deslizamientos de tierra, tiene la máxima prioridad en toda la región de estudio. Los grandes taludes de deslizamiento son las formas más destacadas que surgen como consecuencia directa de estas actividades. Estos taludes están cubiertos de escombros extremadamente finos como consecuencia directa de la intensa meteorización mecánica característica de la región. Aunque los tamaños de los escombros y conos aluviales no son muy significativos, hay una gran cantidad de ellos.

Geología regional

La secuencia estratigráfica del área en análisis está compuesta por las rocas del Paleozoico y Mesozoico, formado por las siguientes unidades geológicas.

Cuadro 1. **Unidades geológicas del distrito Morococha**

Unidad geológica	Características	
	Composición	Espesor
Grupo Excélsior (Devónico)	Lutitas y filitas de coloración verde oliva a negro, calizas subordinadas y flujos de lava.	El espesor total del grupo Excélsior es desconocido, pero Harrison (1943) estimó un total de 1,800 m de espesor.
Grupo Mitu (Pérmico)	Rocas volcánicas félsicas y andesíticas Catalina del Grupo Mitu (Formación Yauli). Las rocas de los volcánicos Catalina contienen cobre, plata, plomo y zinc.	Las rocas volcánicas Catalina tienen un espesor de 760 m según Mc Laughling (1924) y 300 m según Terrones (1949). Existe un conglomerado rojo (basal) que acumuló una potencia 160 m, localizándose sobre yaciendo a los Volcánicos Catalina
Grupo Pucará (Triásico – Jurásico)	a) Formación Chambará: Intercalaciones de caliza, tobas, lutitas bituminosas y cherts b) Formación Aramachay: Interestratificación de lutitas, areniscas, tufos, cherts y rocas fosfáticas.	a) Formación Chambará: potencia máxima regional de 1500 m. b) Formación Aramachay: máxima potencia es de 600 m. c) Formación Condorsinga: potencia de 2,900 m.

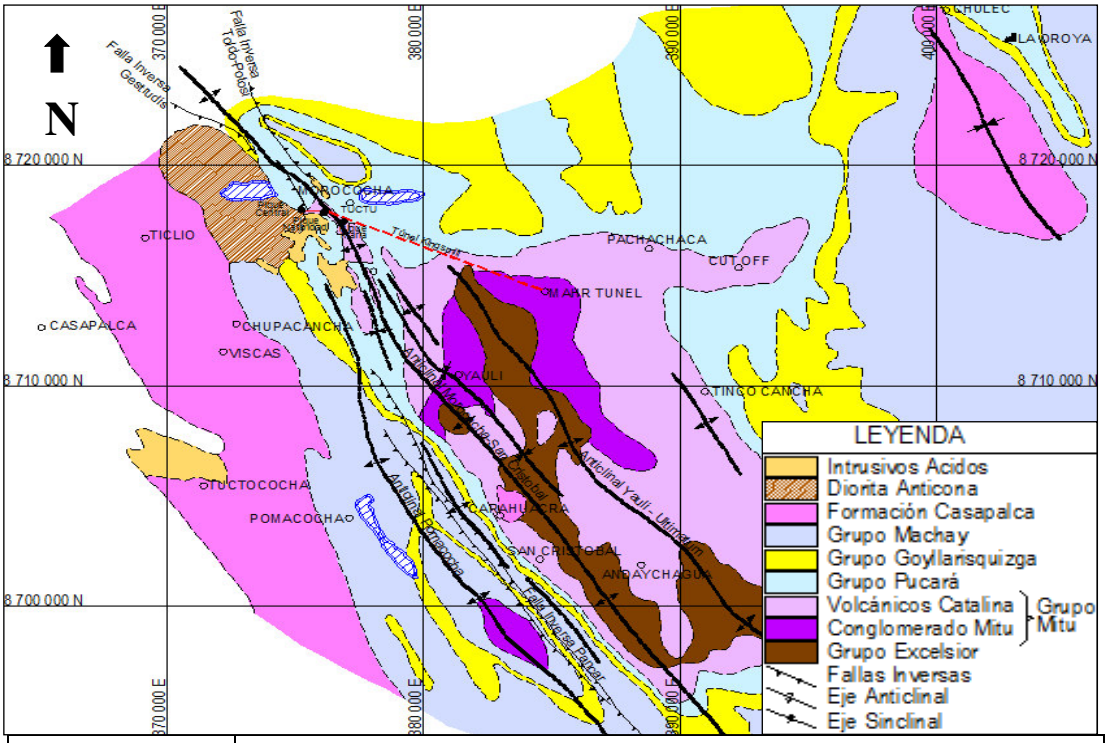
	c) Formación Condorsinga: Está constituida por intercalaciones de calizas, lutitas y areniscas.	
Grupo Goyllarisquizga (Cretácico inferior)	Conglomerado rojo basal en aparente concordancia sobre la caliza Pucará. Luego, le suceden areniscas, lutitas rojas, capas de cuarcita y capas de caliza gris.	Las capas de cuarcita tienen de 6 a 15 metros de espesor. En el norte se identificaron doce horizontes cuyo espesor osciló entre 3 y 61 m mientras que el sur presentó tres horizontes con espesor de 5 a 15 m.
Grupo Machay (Cretácico superior)	Interestratificación de calizas: caliza gris azulada masiva con restos de fósiles, caliza gris clara con caliza carbonosa, lutácea, margosa y fosfatada.	Se desconoce el espesor de las formaciones.

Fuente: Modificado de Rondon (2017).

Actividad Ígnea

Las andesitas y dacitas de los volcánicos de Catalina, que son las rocas ígneas más antiguas de la zona, se remontan al Pérmico y marcan el inicio de la actividad ígnea en el distrito de Morococha. La actividad ígnea persistió durante todo el Mesozoico, como demuestra la presencia de coladas volcánicas y capas de diques intercaladas con rocas sedimentarias del Jurásico y el Cretácico. La actividad ígnea más intensa tuvo lugar en el Terciario superior, cuando se introdujeron en la corteza la diorita, la granodiorita, el pórfido feldespático, el pórfido cuarcífero y el pórfido dacítico. Más adelante, en el apartado de Geología de la zona de Morococha, encontrarás una descripción que profundiza en estos intrusivos.

La Figura 1 muestra el complejo plegado de las rocas, sedimentos calcáreos y volcánicos del Paleozoico y Mesozoico en el yacimiento Toromocho.



	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS **DIRECCIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO** **FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA**
	Mapa Geológico Regional del área de Toromocho
	Elaborado por: Ronald Flores Barrón

Figura 1. **Mapa de la Geología Regional del área de Toromocho.** Fuente: Modificado de Minera Chinalco Perú (2016**)**

4.1.1. Etapas evolucionarias y paragénesis

La mineralización en el área ha creado una zonificación como resultado de los cambios a lo largo del tiempo en el tipo de minerales que se han depositado allí, así como los cambios en el medio ambiente circundante. A continuación, se presenta una versión condensada de la secuencia paragénica generalizada que se aplica al distrito de Morococha.

a) Etapa temprana

- Alteración Potásica (biotita, feldespato potásico, antigorita, anhidrita).
- Calcopirita (sin o bajo contenido de pirita).
- Magnetita, pirrotita.
- Cuarzo / Molibdeno

b) Etapa posterior de superposición

- Alteración sericítica," Serpentina" (clorita, talco, antigorita), anhidrita
- Esfalerita con alto contenido de hierro variedad (marmatita)
- Tetraedrita con pirita.
- Enargita y tenantita con pirita.
- Calcopirita (con pirita más abundante).

c) Última Etapa Retrógrada

- Carbonatos
- Esfalerita (con bajo contenido de hierro)
- Tetraedrita.
- Baritina.
- Galena con diseminaciones de minerales de plata.

4.2. Análisis, interpretación y discusión de resultados

4.2.1. Características de la geología local, mineralogía y mineralización del yacimiento Toromocho

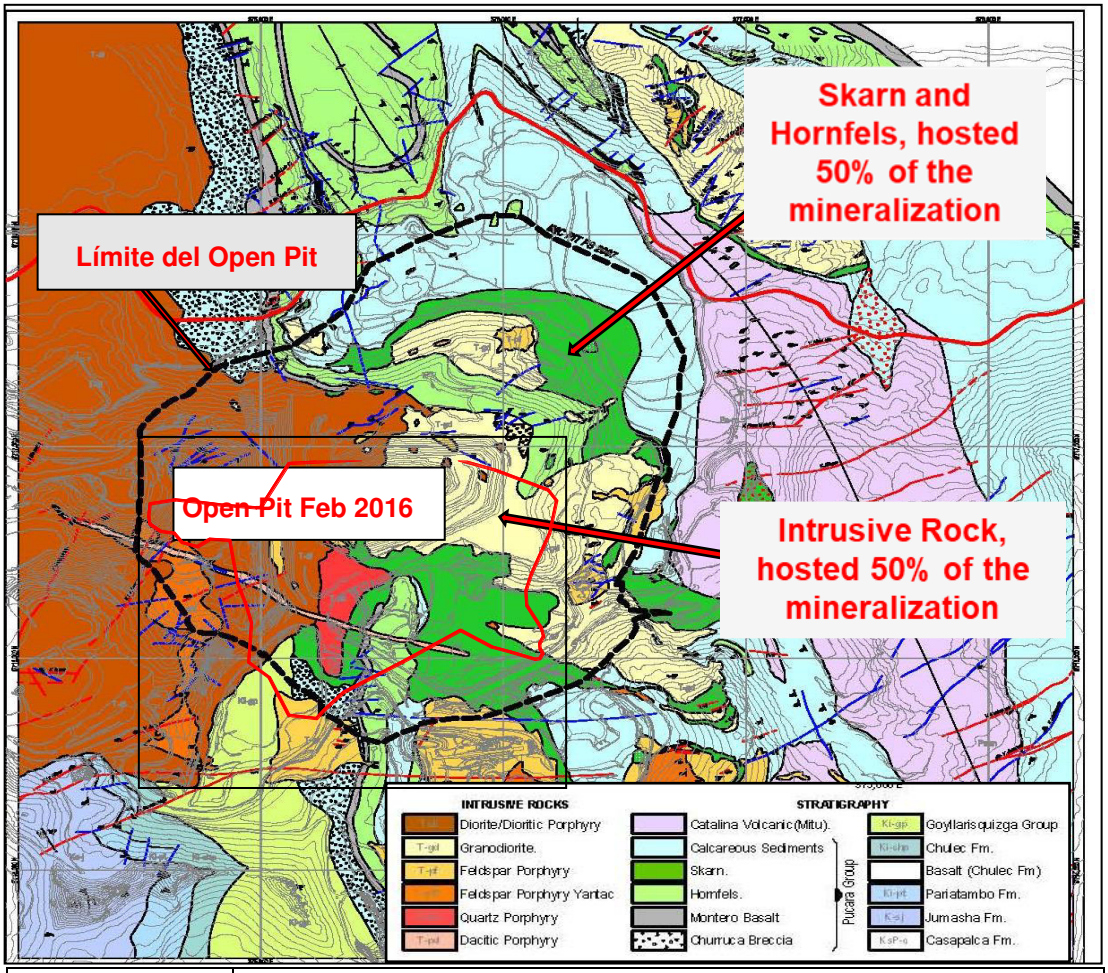
4.2.1.1. Geología de Toromocho

El núcleo del intrusivo terciario está ocupado por el distrito polimetálico de Morococha, que tiene una superficie de cinco por seis kilómetros. La geología local de Toromocho presenta skarn, hornfels, brechas y rocas intrusivas. (ver Figura 2).

La formación volcánica Catalina del Grupo Mitu (Pérmico) y las calizas del Grupo Pucará están representadas por las formaciones rocosas ígneas y sedimentarias de la región, respectivamente (Jurásico). En general, los sedimentos de Pucará están formados por calizas que van del gris claro al blanco, así como por calizas dolomíticas. Estos tipos de calizas están intercalados entre estratificaciones de lulitas, hornfels y areniscas. Las capas de anhidrita, yeso, pizarra y caliza que recubren las rocas volcánicas de la formación Catalina en una aparente discordancia angular y a lo largo del intrusivo de pórfido feldespático y la granodiorita constituyen la anhidrita

masiva y el yeso del fondo de la caliza del Pucará. Estas capas están compuestas por la anhidrita y el yeso masivos del fondo del Pucará.

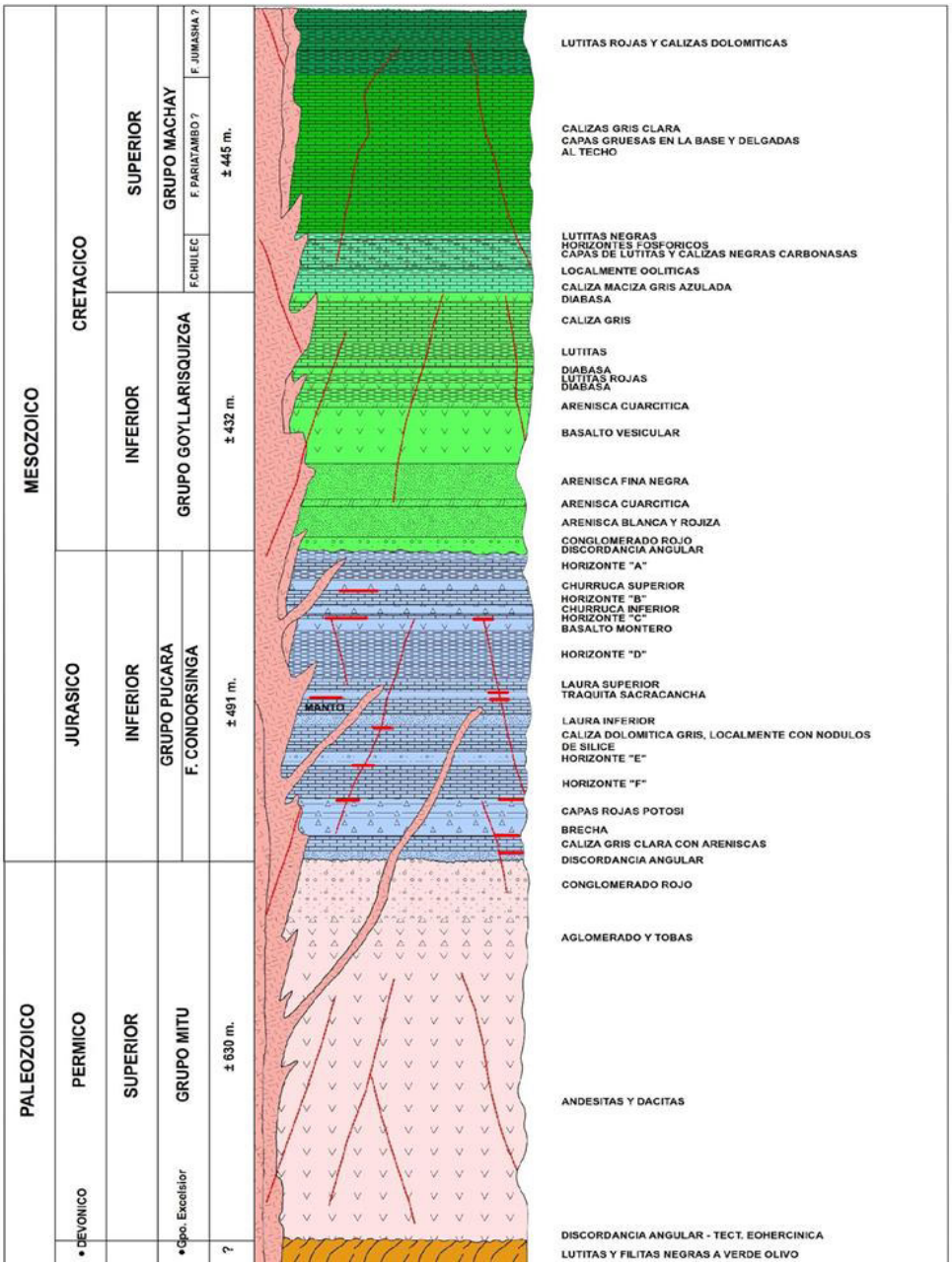
La columna estratigráfica de Morococha revela tres periodos de plegamiento: pérmico, jurásico y cretácico (ver Figura 3).



	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS **DIRECCIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO** **FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA**
	Mapa Geológico Local de la Mina Toromocho
	Elaborado por: Ronald Flores Barrón

*Figura 2.***Mapa Geológico Local de la Mina Toromocho**. *Fuente:* Modificado de Minera Chinalco Perú (2007)

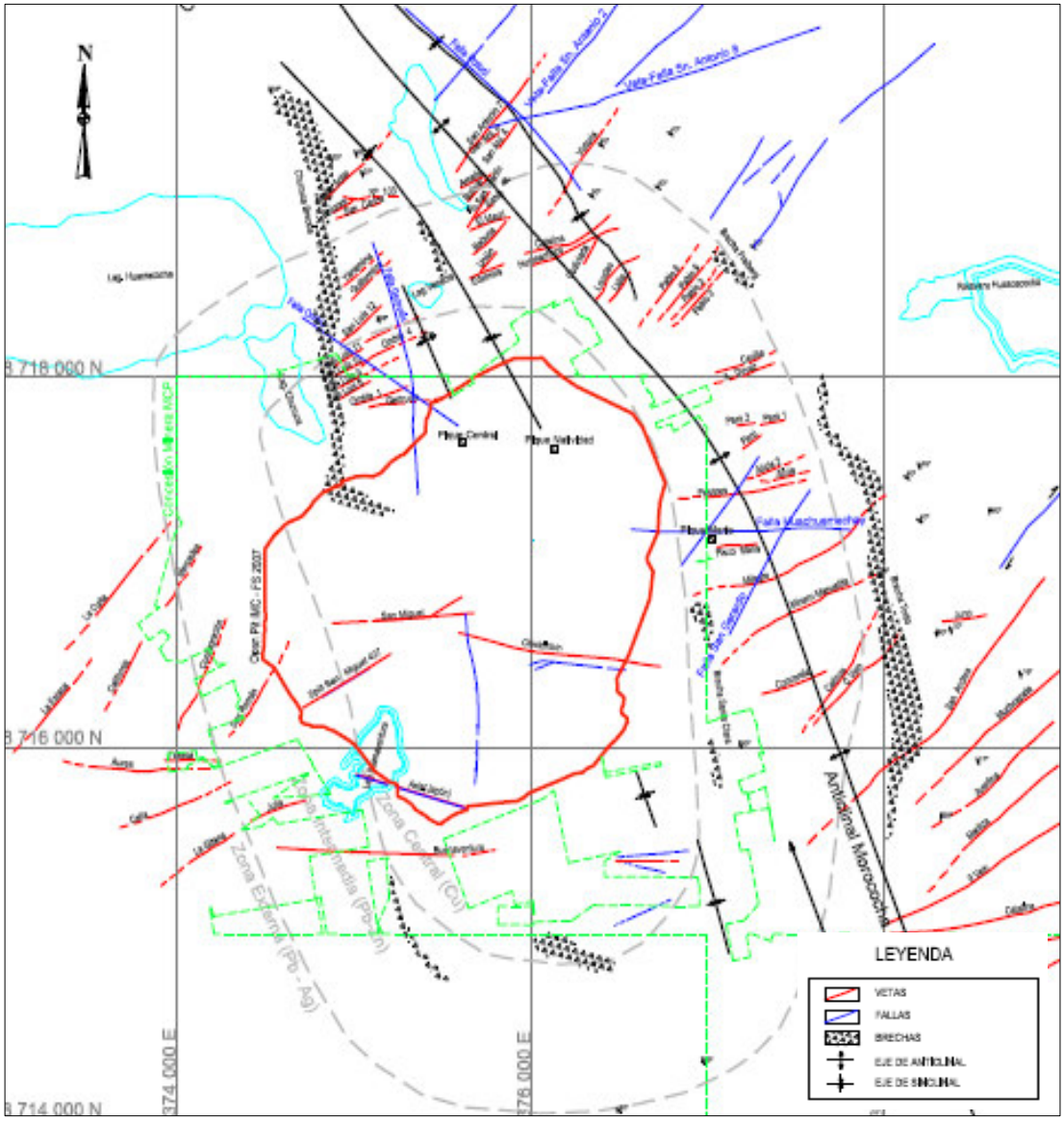
COLUMNA ESTRATIGRAFICA DE LA ZONA DE MOROCOCHA



	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS **DIRECCIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO** **FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA**
	Columna Estratigráfica del Distrito de Morococha
	Elaborado por: Ronald Flores Barrón

*Figura 3.***Columna Estratigráfica del Distrito de Morococha.** *Fuente: Modificado de Centromin (1990)*

La mina Toromocho se encuentra estructurada por vetas, fallas y brechas. En la siguiente figura se observa la estructuración gráfica del yacimiento Toromocho.



	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS **DIRECCIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO** **FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA**
	Mapa Estructural de la Mina Toromocho.
	Elaborado por: Ronald Flores Barrón

Figura 4. **Mapa Geológico Estructural de la Mina Toromocho.** Fuente: Modificado de Minera Chinalco Perú (2007)

En el área de estudio, exactamente en los sedimentos de Pucará (brechas Toldo, Santa Clara, Churruca, Riqueza y Freiberg), se identificaron brechas hidrotermales polimícticas y monomícticas relativamente pequeñas mineralizadas. Se localizaron específicamente a lo largo de: (1) las zonas de fallas inversas, (2) la disconformidad entre la caliza y los Volcánicos Catalina y (3) los contactos de los Intrusivos Morococha o basalto Montero. En la siguiente figura se observan brechas polimíticas en el yacimiento Toromocho.

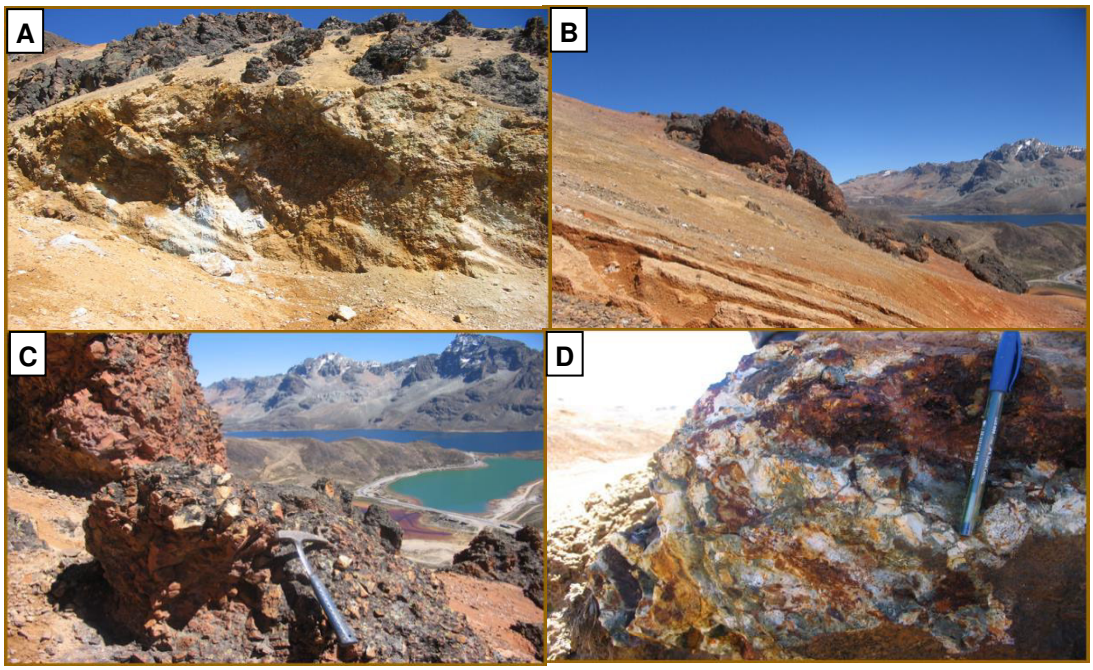


Figura 5. **Brecha Polimíctica.** *Fuente:* Elaboración propia

La Figura 5 muestra: A) Brecha polimíctica ubicada en el contacto diorita-skarn, mirando al Oeste cuya matriz de actinolita - tremolita clastos angulosos a subangulosos. B) Brecha polimíctica Toromocho, ubicada en el borde Norte de la diorita, mirando al Noroeste. Donde corresponde a la brecha churruca con clastos de caliza angulosos a redondeados matriz de sulfuros bien soldados C) Detalle de la brecha polimíctica Toromocho, abundantes fragmentos angulosos de talla heterogénea de fragmentos de diorita y hornfels, en matriz arcillosa. D) Brecha polimíctica en skarn, San Miguel, ubicada al Noreste. Se observaron abundantes clastos de diferente naturaleza

de diópsido magnetita y rocas intrusivas cuyos clastos son angulosos a subangulosos matriz de actinolita tremolita.

En las observaciones de campo llevadas a cabo durante el cartografiado de la geología local se pudo diferenciar dos tipos de brecha que en origen y edad son diferentes, siendo pre-mineral y post-mineral, las cuales se denominarán en adelante, brecha estructural y brecha post-mineral, respectivamente.

Las brechas Tectónicas, encontradas aflorando en el flanco este del tajo, están asociadas a zonas de fuerte fracturamiento y tienen un rumbo ligeramente Este-Oeste. Estas zonas tuvieron frentes de debilidad por donde las soluciones hidrotermales alterantes y mineralizantes fluyeron y a la vez se precipitaron. Las soluciones hidrotermales circularon por las fracturas entrampado a las rocas, alterando y reabsorbiéndoles total o parcialmente y consistió en una gama de calcosilicatos tales como diópsido, tremolita-actinolita, biotita, epidota, clorita etc. algunas veces granate.

Figura 6. **Brecha tectónica** Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6 se observa una brecha Polimíctica de clastos de diferente naturaleza cuyos clastos engloban una matriz de actinolita tremolita que contiene fuerte mineralización de sulfuros de calcosina calcopirita, digenita. La brecha estructural es económicamente importante por contener mayores concentraciones metálicas pudiendo llegar hasta leyes promedio de 2% de Cu y 2.5 onz. de Plata, como se puede observar en la Figura 13. Los sulfuros y sulfosales comunes son pirita, calcopirita, tenantita, covelita y molibdenita.

Las brechas intrusivas, por otra parte, se ubicaron en al NO del tajo siguiendo el rumbo NO-SE del *skarn.* La brecha está constituida por fragmentos subredondeados y angulosos de materiales de diferente composición y origen. De ahí se obtienen fragmentos de *Skarn*, diorita, pórfido cuarcífero y basalto alterados a diferentes tipos y grados de intensidad, observándose secciones delgadas respectivamente demuestran que la matriz consiste en material pulverizado de los mismos fragmentos de carácter fluvial.

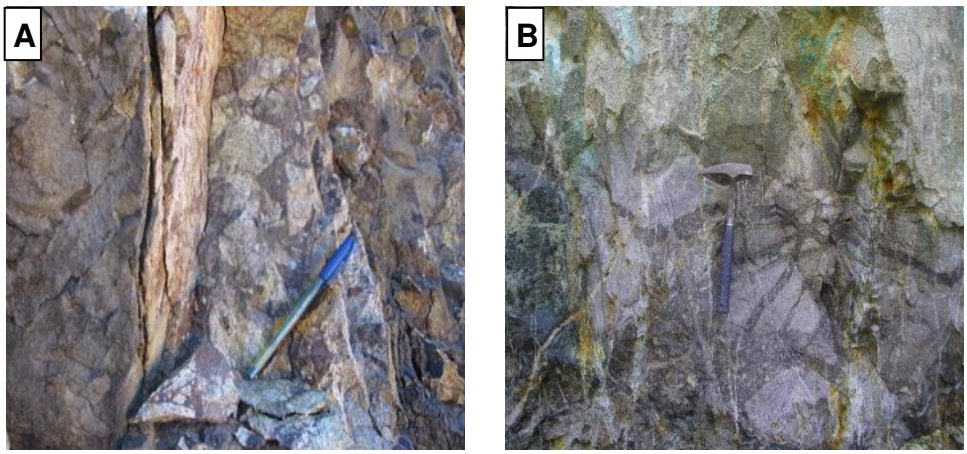


Figura 7. ***Brecha intrusiva.*** Fuente: Elaboración propia

En la Figura 7 se observa: A) Brecha intrusiva con matriz de Pórfido Feldespático que se encuentra en la parte central del yacimiento su mineralización es de calcosina-digenita, calcopirita también son cortados por venillas tardías de calcosina-calcopirita. B) Brecha intrusiva con venillas de sulfuros de cuarzo –calcosina- enargita matriz de pórfido feldespático.

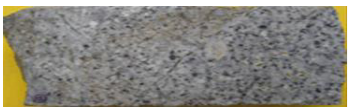
4.2.1.2. Mineralogía de Toromocho

a) Minerales en Toromocho

Existen al menos dos episodios de intrusión de rocas porfídicas relacionados con la alteración y mineralización del yacimiento terciario de Toromocho. Las rocas que conforman el yacimiento de Toromocho están conformadas por múltiples fases intrusivas de rocas plutónicas regionales. La secuencia reconocida de fases intrusivas, de la más reciente a la más antigua, es la siguiente: diorita Anticona con una antigüedad de entre 8 y 14 millones de

años, granodiorita, pórfido feldespático, pórfido cuarcífero y pórfido dacítico con una antigüedad de entre 7 y 8 millones de años.

Cuadro 2. **Fases intrusivas identificadas**

Fase intrusiva	Descripción
Diorita Anticona	Diorita de textura porfirítica Propilitizada cortado por venillas tardías de Esfalerita, Galena en forma fina por el cual su mineralización en forma diss es escasa, donde las cloritas se están alterando a biotita textura porfirítica fenos de plagioclasas. Muestra de Core de diorita propilitizada pre mineral cortado por venillas tardías en tramos puntuales la plagioclasa se nota alterando a biotita escasa presencia de sulfuro diseminado.
Granodiorita	Granodiorita textura equigranular a porfirítico conocido como Stock San Francisco con alteración potásica con mineralización Diseminada en forma moderada con 0.35 de Cobre venillas tipo “A” en algunos tramos se observa ojos de cuarzo molibdeno muy puntuales, se observa venas de cuarzo hasta de 2 mm es una de las rocas más duras en el yacimiento. Granodiorita con textura equigranular con alteración potásica con biotita secundaria y cortado por venillas tardías en tramos puntuales se observa cristales de ortosas de color rosado sulfuros de pirita, calcosina sobre impuesta a pirita.
Pórfido feldespático	 Alteración fílica, cristales de sericita translucido con venillas tardías tipo “D” mineralización de cobre en forma diseminada Calcosina, sobre impuesta a calcopirita y pirita, se tiene cristales de plagioclasa de color blanco las venillas tipo “D” tiene una orientación E-W.

Pórfido cuarcífero		Pórfido Cuarcífero conocido como Stock San Miguel su caracterización es por tener venillas tipo “B” (cuarzo-molibdeno) cuyos ojos de cuarzo es abundante aproximadamente 10% presenta una alteración fílica también son cortados ´por venillas tardías de cuarzo- enargita-digenita-pirita su mineralización en forma diseminada es escasa de Pirita-Calcosina-Calcopirita.
		La muestra corresponde a pórfido cuarcífero con leve oxidación (Jarosita) debido a la percolación de agua meteórica se tiene venas de cuarzo hasta de 2mm con contenido de molibdeno escasa diseminación de sulfuros.
Pórfido dacítico		Pórfido dacítico con alteración silicificación presenta escasa mineralización de sulfuros, los fenos de cuarzo son desarrollados y esporádicos ortosa se ven muy desarrollados. En tramos puntuales se observa las plagioclasas muy desarrolladas mineralización es muy escasa, este pórfido corta a toda la secuencia sedimentaria e intrusiva.
		La muestra corresponde a un pórfido dacítico con fuerte silicificación con presencia de ortosas bien desarrollados de color blanco los ojos de cuarzo son muy esporádicos y alejados escasa presencia de sulfuros.

Fuente: Elaboración propia

El Skarn en sus diferentes variedades (Lizardita, crisotilo, antigorita) y el Hornfels de diópsido clorita en el yacimiento Toromocho albergan el 50% de la mineralización, de igual manera ocurre en las rocas intrusivas (granodiorita, pórfido feldespático, pórfido cuarcífero, diorita) que también alberga el 50% de mineralización.

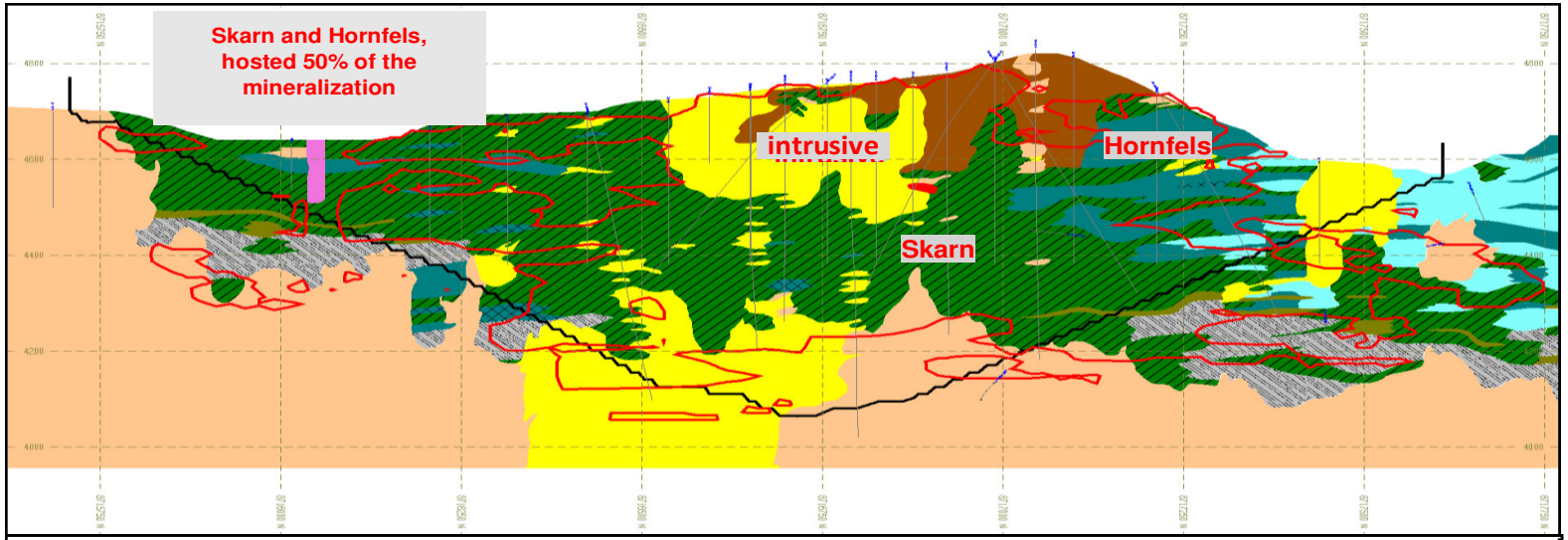
Cuadro 3. **Rocas huéspedes identificadas**

Rocas huéspedes		Descripción
HORNFELS	Hornfels de diópsido	Hornfels de diópsido clorita con fuerte sílice en toda la matriz Venillas de clorita escasa mineralización de cobre, cuya matriz es de caliza dolomítica tiene unas fracturas en forma de lajas donde se tiene mayor presencia en la zona norte del yacimiento también son cortados por venillas tardías de pirita-calcosina, calcopirita, esta secuencia corresponde al horizonte “D”. Muestra de hornfels de diópsido clorita con fuerte presencia de sílice, la clorita se encuentra como ojuelas perteneciente al horizonte D del grupo Pucará escasa mineralización de sulfuros diseminados venillas tardías de clorita, pirita. Hornfels de diópsido con fuerte venillas de clorita, magnetita y epidota, mineralización moderada en forma diseminada parte del horizonte “D”, en tramos puntuales se observa al diopsido alterándose a actinolita-tremolita escasa mineralización de sulfuros diseminados.
	Hornfels de Wollastonita	La wollastonita y el cuarzo que componen la mayor parte de los hornfels jasperoides blancos proceden con toda seguridad de las areniscas calcáreas que se encuentran en la parte norte de la zona.
	Hornfels de biotita	Los hornfels de biotita que se encuentran en la zona central tienen una estructura microgranoblástica y están formados por muchos agregados de plagioclasa, feldespato potásico, cuarzo y biotita. La alteración a sericita y/o clorita puede verse por encima de la roca original. Los sulfuros están dispersos por toda la roca, sustituyendo en última instancia a la biotita que se convirtió en clorita.
SKARN	Skarn de tremolita actinolita	Skarn de actinolita tremolita cortado por venillas tardías de cuarzo pirita Cuyos cristales de tremolita son traslucidos mineralización diseminada de calcosina calcopirita.

	Skarn de magnetita		Skarn de Serpentina Magnetita con fuerte mineralización de sulfuros Calcosina - calcopirita también contiene talco como matriz.
			Skarn de serpentina clorita magnetita con fuerte presencia de calcosina sobreimpuesto a calcopirita presencia de oquedades rellenado de sulfuros la magnetita se encuentra en forma diseminada.
			Skarn Andradita de granates de color rojizo donde el diópsido se altera a tremolita alternando bandas de hornfels de diópsido.
	Endoskarn		Endoskarn de actinolita tremolita cuya matriz en granodiorita cortado por venillas tardías de cuarzo epidota pirita calcosina y mineralización en forma diseminada de calcosina calcopirita rellenados en oquedades.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 8 se puede observar la sección litológica 26W donde el skarn con sus diferentes variedades como (antigorita, Lizardita, serpentina) ocupa el 50% del yacimiento incluido los Hornfels de diópsido clorita y el otro 50% lo ocupa los intrusivos (granodiorita, pórfido feldespático, pórfido cuarcífero, diorita).



Legend

Litological Units

Descripción	Color	Descripción	Color
Diorite / Andesite Porphyry		Magnetite Skarn	
Granodiorite		Montero Basalt	
Feldspar Porphyry		Calcareous Sediment	
Quartz Porphyry		Shale	
Dacitic Porphyry		Andesite / Catalina Volcanic	
Yantac Feldspar Prophyry		Anhydrite / Gypsum	
Hornfels		Sandstone	
Skarn / Tactite		(Morococha Lake)	

Final Pit

Cu > 0.3 %

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
DIRECCIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

Mapa Geológico Local de la Mina Toromocho

Elaborado por: Ronald Flores Barrón

Figura 8. **Sección Geológica 26W.** Fuente: Modificado de Minera Chinalco Perú (2016)

b) Alteración de minerales en Toromocho

Básicamente, entre las alteraciones de las rocas sedimentarias en la parte central del yacimiento Toromocho se encuentra el Skarn de actinolita tremolita; en los bordes, se encuentra Skarn de Serpentina Magnetita y Hornfels de diópsido clorita. Además, el Stock San Francisco presentó una alteración Potásica y el pórfido feldespático alteración fílica (ver Figura 9).

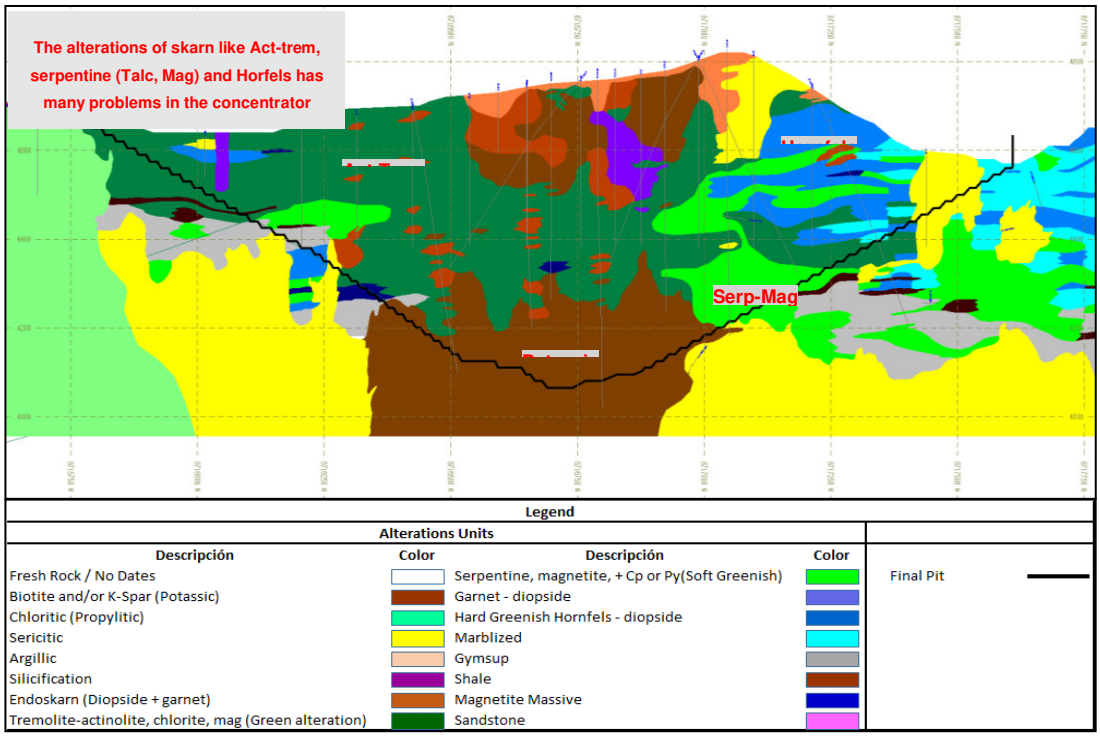
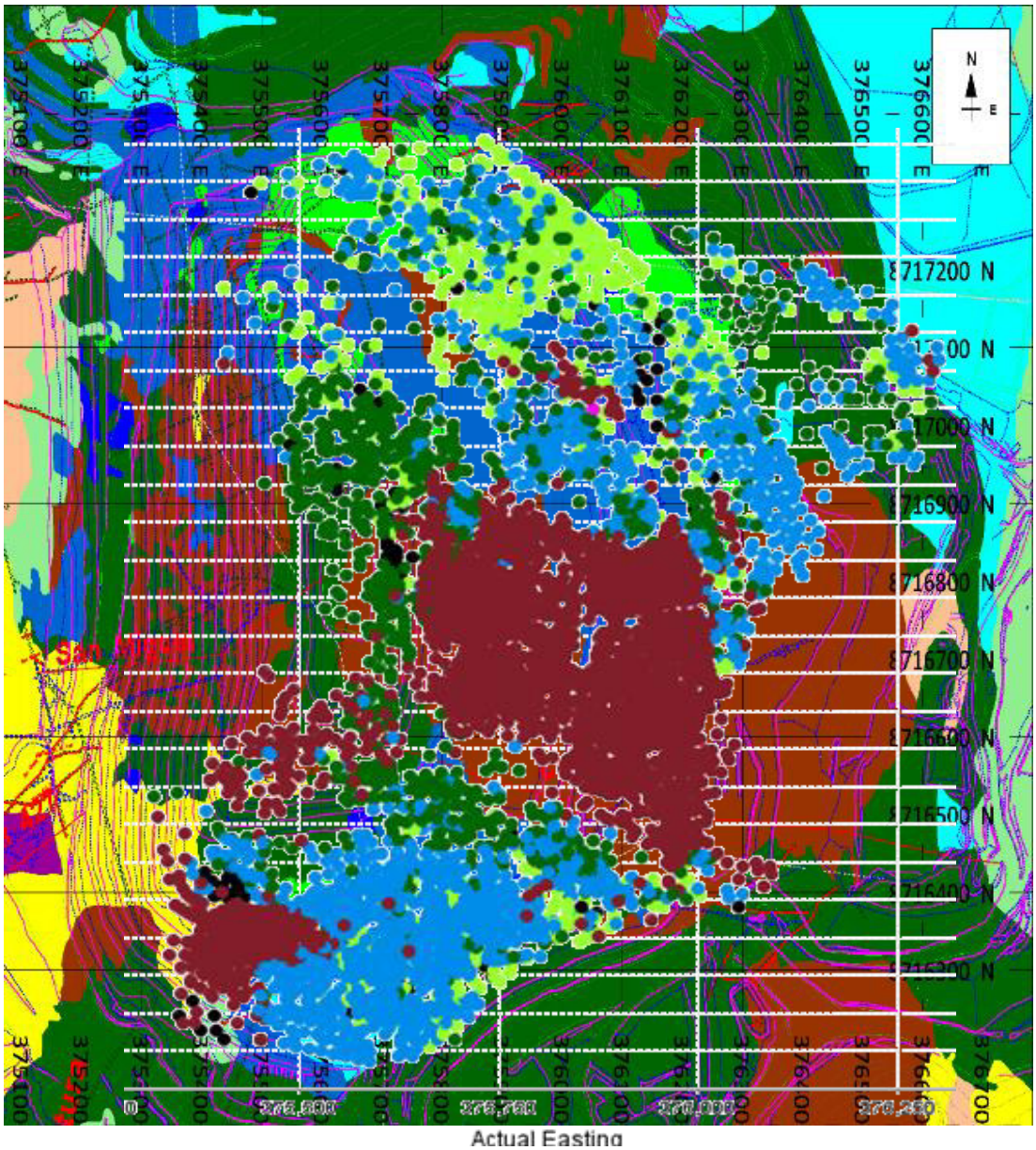


Figura 9. **Sección Alteración 26W.** Fuente: Modificado de Minera Chinalco Perú (2016)

Se utilizó la difracción de rayos X para obtener una idea general sobre las alteraciones en el yacimiento Toromocho. Del total de los datos Blast Hole (13,100 datos), se aplicó los lÍmites indicados y se reveló el resultado de 5,650 muestras Se obtuvo una correlación visual al 85% entre la interpretación de las especies minerales a través de DRX de los Blast Hole y el logueo geológico.



	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS **DIRECCIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO** **FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA**
	Mapa Geológico Local de la Mina Toromocho
	Elaborado por: Ronald Flores Barrón

Figura 10. **Comparación de alteraciones interpretadas de DRX Blast Hole.** Fuente: *Elaboración propia*

Basándose en dicha Figura 10, donde nos demuestra que podemos usar la mineralogía DRX como soporte al logueo geológico, cartografiado geológico

rutinario de la mina y de los programas de perforación diamantina (INFILL, GEOMET), por lo que es posible diferenciar las muestras provenientes de intrusivo y las muestras provenientes de metasedimentos con el análisis DRX.

A modo de profundizar acerca de las alteraciones de minerales, la Minera Chinalco Perú realizó estudios petromineragráficos por la complejidad que representa el yacimiento Toromocho considerado como un pórfido. Las zonas que presentaron minerales alterados correspondieron al skarn de magnetita masiva, skarn serpentina-magnetita y hornfels de diópsido (corneana). La formación del *Skarn* de Toromocho se comprende que se formó por la recristalización metamórfica isoquímica con pérdida de dióxido de carbono, agua, dióxido de azufre, etc. Las rocas dolomíticas sufrieron cambios mineralógicos, principalmente, de la formación condorsinga, desarrollando gran parte de silicatos de magnesio (serpentina, forsterita, diópsido).

Se identificó la siguiente secuencia de las alteraciones:

a. Alteración potásica

La alteración potásica en las clasificaciones de las rocas (granodiorita, pórfido dacítico pórfido cuarcífero, diorita) queda determinada por la asociación de minerales como el feldespato potásico, biotita secundaria, cuarzo y sulfuros asociados. Este evento se produce inicialmente a condiciones de temperatura superiores a 300 °C, y fluidos altamente salinos.

Formación de feldespato potásico secundario:

Plagioclasa + K+ → feldespato potásico + (Na + Ca + 2)

Formación de biotita secundaria:

Hornblenda + (H+ Mg + 2 K) → biotita +(Na + Ca +2)

Cloritización de la biotita:

Biotita + H+ → clorita + cuarzo + K+

En la FIG podemos observar: A) Muestra GM-0046 (Granodiorita): Cristal anhedrales de feldespatos potásicos como reemplazo de plagioclasas. B) Muestra GM-0045 (Granodiorita): Cristales intercrecidos con plagioclasas y feldespatos potásicos envueltos en una masa fundamental, cristales finos de biotita secundaria como alteración de anfíboles. C) Muestra GM-0061 (Granodiorita): Cristal subhedral de biotita con reemplazo de clorita y sericita. D) Muestra GM-0005 (Granodiorita): Cristales de plagioclasas, feldespatos K, biotita y maficos relictos, como proceso secundario se observa un evento de alteración potásica, representado por feldespato pótasico que reemplaza a plagioclasas primerias.

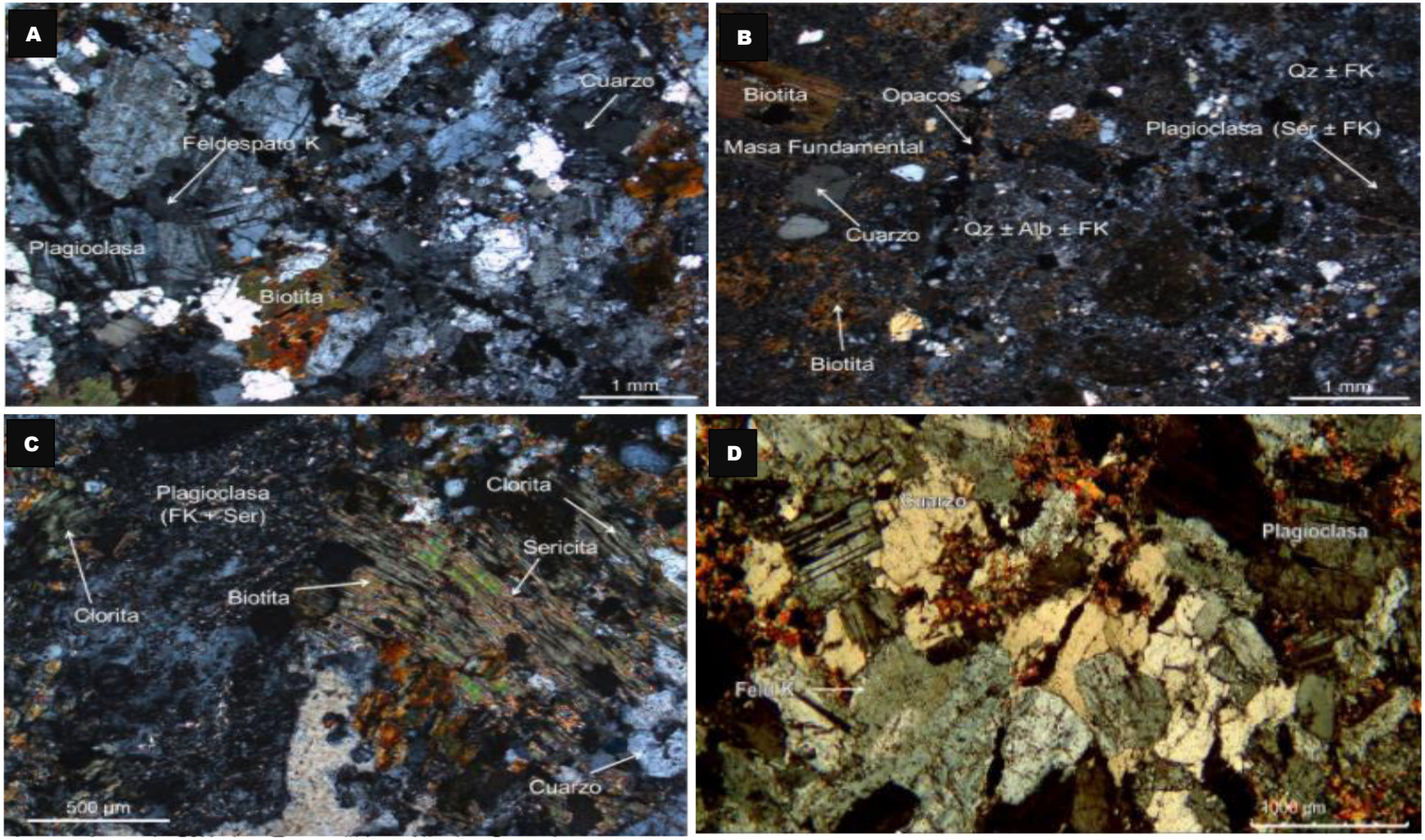


Figura 11. **Fotomicrografías de secciones delgadas en nicoles cruzados, documentando las alteraciones en el yacimiento de Toromocho.** Fuente: Elaboración propia

Albitización (*): La albita ha sido observada reemplazando a cristales de plagioclasas y algunos feldespatos potásicos a través de bordes y fracturas; las intensidades en la muestras oscilan entre débil a moderada. Algunas muestras presentan la asociación actinolita-epidota y la asociación epidota-sericita, generalmente desarrolladas en granodioritas y pórfidos dacíticos

Albitización y epidotización de la plagioclasa

Plagioclasa + cuarzo +H20 + Na+ → albita + epidota + H+

En la Figura 12 podemos observar: A) Muestra GM-0007 (Granodiorita). Pseudo cristal de plagioclasa reemplazado por albita, feldespato potásico y arcillas. B) Muestra GM-0005 (Granodiorita). Cristales de plagioclasas casi totalmente reemplazados por albita. C) Muestra GM-0066 (Granodiorita). Se muestra albita reemplazando plagioclasa, nótese aun las maclas de las plagioclasas en la parte superior derecha, cristales de biotitas con débil alteración a clorita. D) Muestra GM-0031 (Endoskarn). Cúmulos de cristales de epidota posiblemente formados a partir de la alteración de la plagioclasa.

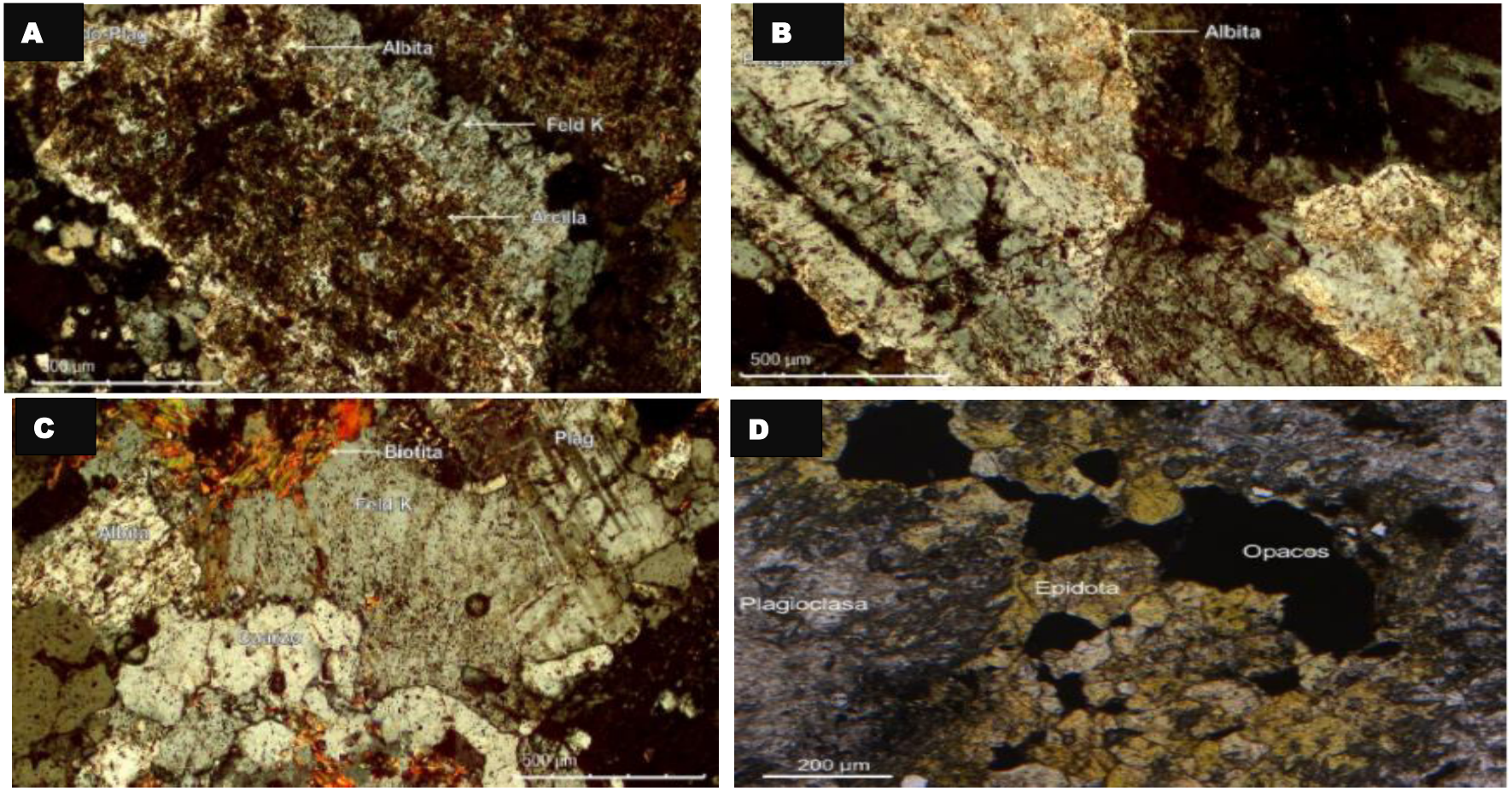


Figura 12. **Fotomicrografías de secciones delgadas en nicoles cruzados, documentando la albitización en el yacimiento de Toromocho.** Fuente: Elaboración propia

b. Alteración fílica

Esta alteración está conformada por una asociación mineral integrada por: sericita, cuarzo secundario, a veces clorita. La sericita se da a partir de la sustitución de las plagioclasas, estas se muestran como agregados muy finos, en los bordes y planos de maclas de las plagioclasas. Esta alteración es el resultado de una hidrólisis moderada de las plagioclasas y feldespatos, entre un rango de temperatura entre 300 a 400 °C.

Sericitización de feldespato potásico:

$$3\ KAlSi3O8 + 2H+ \rightarrow KAl3Si3O10(OH)2 + 6\ SiO2 + 2\ K+$$

En la Figura 13 podemos observar: A) Muestra GM-0076 (Granodiorita). Roca con una sobre imposición de sericita y menor arcillas, cristales de biotita con bordes irregulares parcialmente alterados a sericita y menor clorita, halo sericitico sobre los feldespatos y plagioclasas. B) Muestra GM-0060 (Granodiorita). Cristales subhedrales de plagioclasas con alteración total por sericita y minerales arcillosos, cuarzo secundario con halos sericíticos. C) Muestra GM-0080 (Granodiorita). Nótese la sobre imposición de la sericita (fundamentalmente en halos), cristales subhedrales de biotita alterados a sericita y menor clorita.

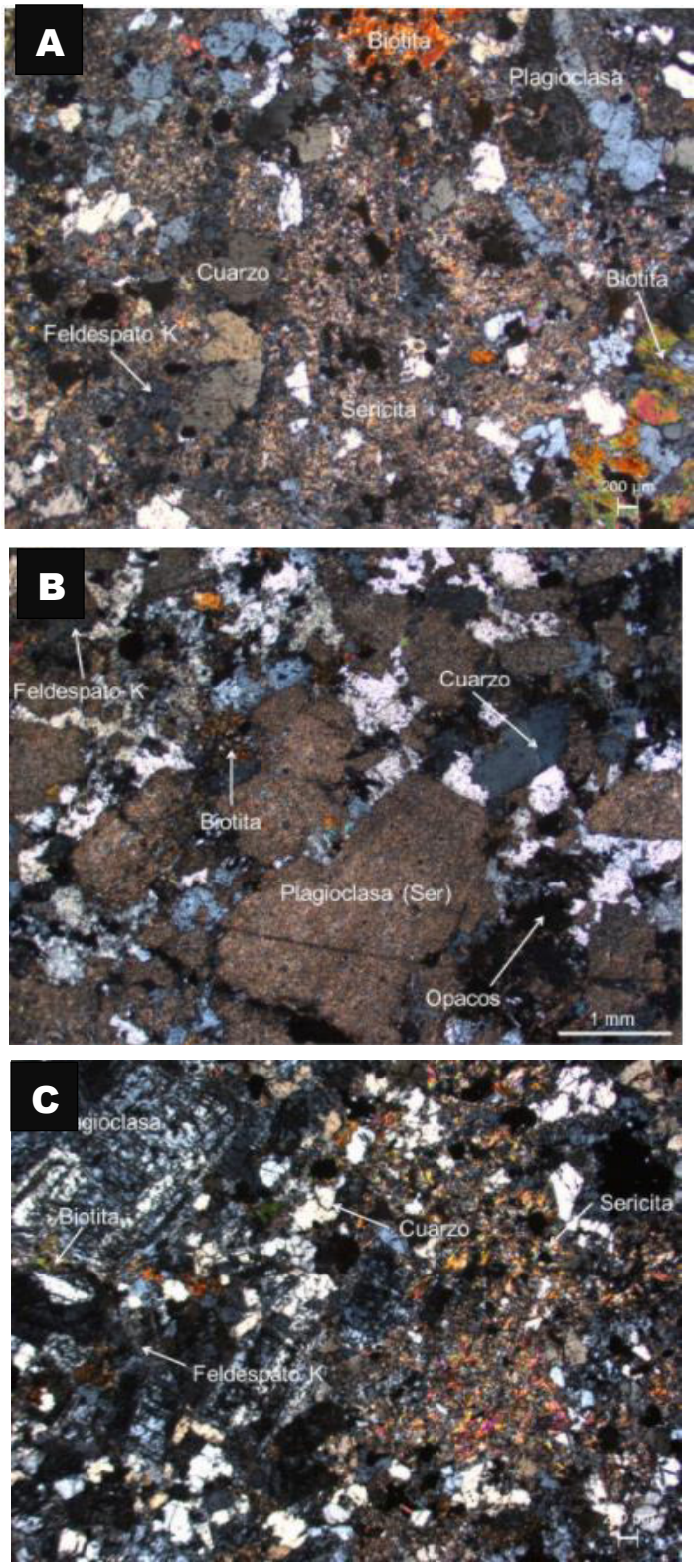


Figura 13. **Fotomicrografías de secciones delgadas en nicoles cruzados, documentando la alteración fílica en el yacimiento de Toromocho.** Fuente: Elaboración propia

c. Alteración serpentina-magnetita

Olivino – serpentina: En esta alteración, el olivino está casi completamente reemplazado por serpentina (lizardita). Las evidencias de que la mayor parte de la serpentina del depósito proviene de la hidratación del olivino incluyen la presencia de magnetita. Además, indicaría que las temperaturas de formación eran superiores a los 500°C. Las condiciones de estabilidad de minerales del grupo de la serpentina la lizardita se puede formar a temperaturas menores a 350 °C (Barnes y O'Neil, 1969 en Hekinian, 1982).

Olivino -> Serpentina (Lizardita)

$$5Mg_2SiO_4 \text{ (olivino)} + H_2O \rightarrow 2Mg_3Si_2O_5(OH_4) \text{ (serpentina)} + (4Mg + SiO_2)$$

En la Figura 14 se observa: A) Muestra GM-0002 (Skarn serpentina-magnetita). Ocurrencia masiva de cristales de lizardita reemplazando a olivino y clorita sobreimpuesta a la lizardita . B) Muestra GM-0002 (Skarn serpentina-magnetita). Siderita reemplazando a olivinos. C) Muestra GM-0039 (Skarn serpentina-magnetita). Ocurrencia masiva de en la matriz de serpentina fina, intercrecida con clorita y talco, se presenta como reemplazo envolvente de cristales de olivino. B) Muestra GM-0001 (Skarn serpentina-magnetita). Ocurrencia masiva de lizardita, aun se observa cristales relictos de olivinos alterados a lizardita.

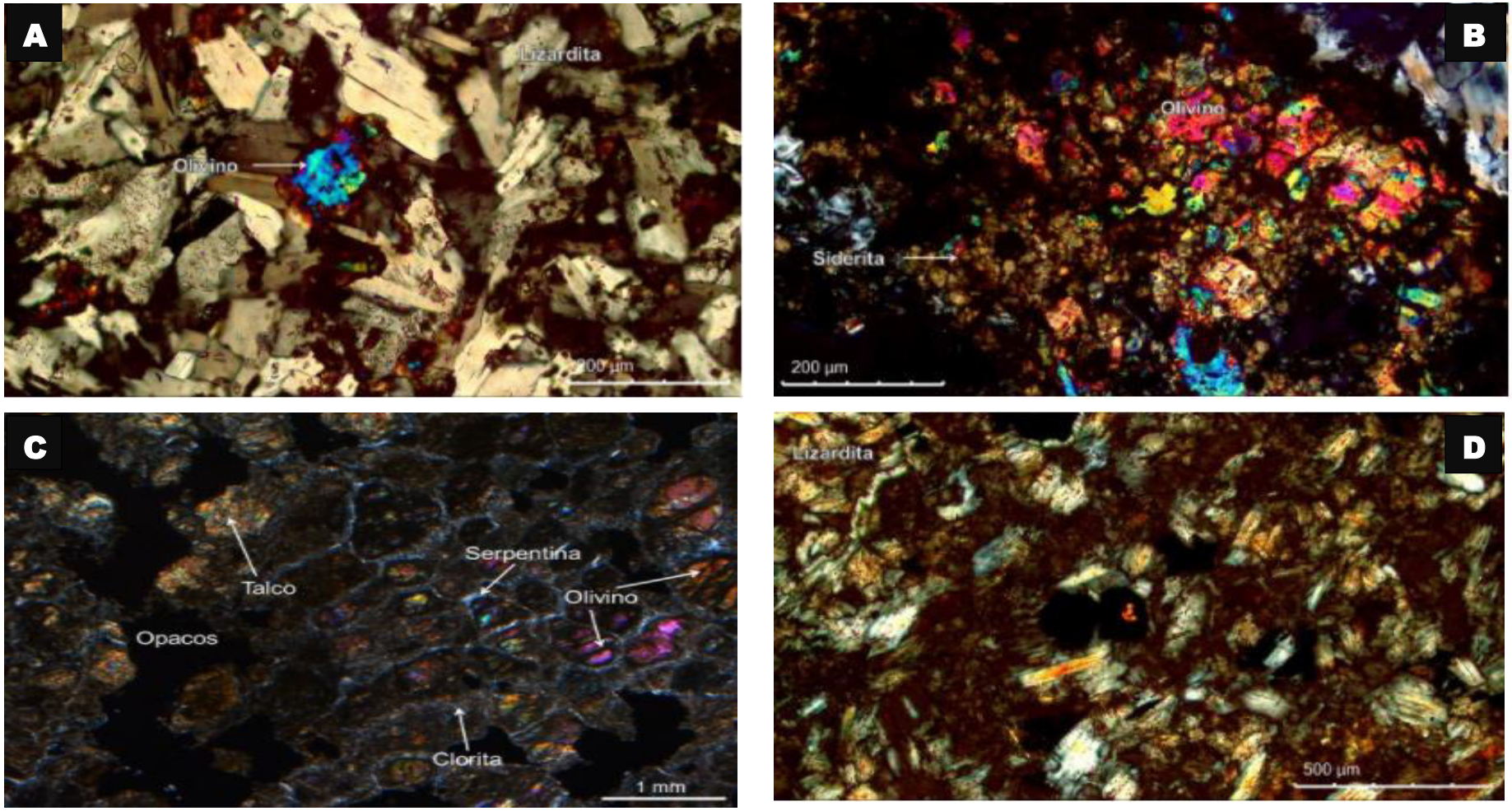


Figura 14. **Fotomicrografías de secciones delgadas en nicoles cruzados, documentando la alteración olivino-serpentina en el yacimiento de Toromocho.** Fuente: Elaboración propia

Olivino- talco: La formación del talco se ve favorecida por alta remobilidad y aporte de SiO_2, magnesio y H+, y la alteración del olivino favorece al enriquecimiento de Ca disuelto y con ello la formación del talco y Tremolita.

Olivino (Fosterita) -> talco

3MgSiO4 (olivino) + H2O + 5SiO2 -> 2MgSi010(OH)2 (talco)

En la figura 15 podemos observar: A) Muestra GM-0027 (Skarn serpentina-magnetita). Reemplazo masivo de talco en toda la muestra, lizardita pseudomorfizado de olivino, siderita rellenando fracturas y oquedades. B) Muestra GM-0039 (Skarn serpentina-magnetita). Talco como reemplazo de olivino, nótese la conservación de la forma del olivino C) Muestra GM-0043 (Skarn serpentina-magnetita). Se observa una franja de talco en una zona de anfíbol. D) Muestra GM-0050 (Skarn serpentina-magnetita). Cristales de talco producto de la alteración de los olivinos, siderita alterando a cristales de olivinos.

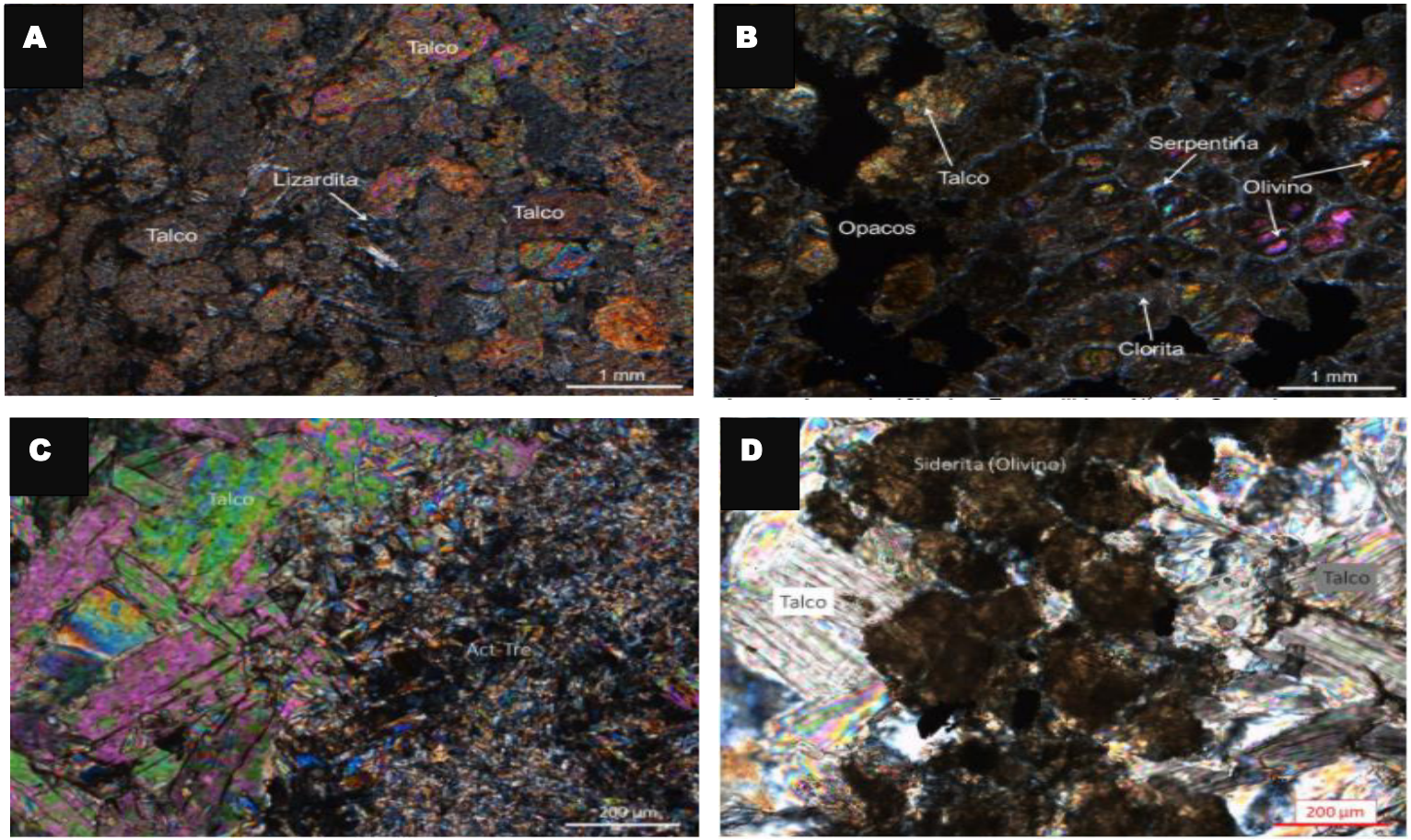


Figura 15. **Fotomicrografías de secciones delgadas en nicoles cruzados, documentando la alteración olivino-talco en el yacimiento de Toromocho.** Fuente: Elaboración propia

d. Alteración magnetita masiva

En esta alteración predomina la presencia de magnetita. Generalmente, su presencia es masiva y se encuentra dispersa en la serpentina, la cual es circunvalada por siderita.

Olivino – serpentina: Para esta alteración, el olivino está siendo reemplazado por serpentina (lizardita).

Olivino -> Serpentina (Lizardita)

$5Mg_2SiO_4$ (olivino) + H_2O -> $2Mg_3Si_2O_5(OH_4)$ (serpentina) + (4Mg + SiO_2)

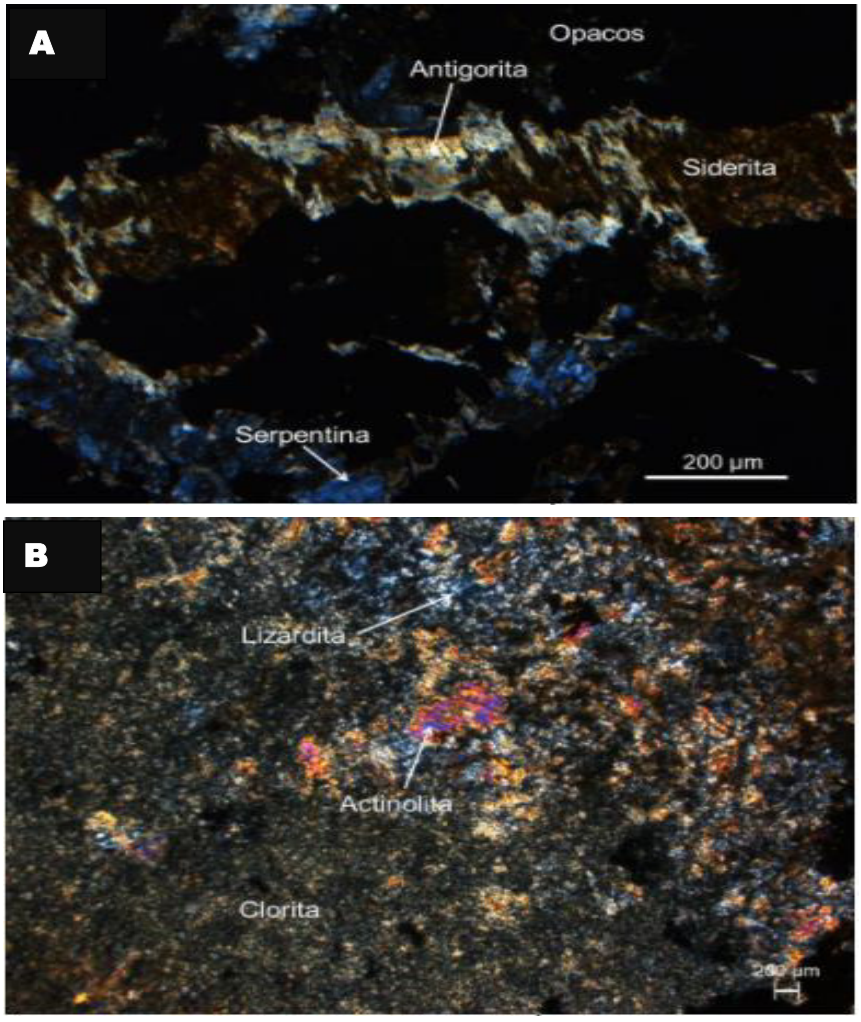


Figura 16. **Fotomicrografías de secciones delgadas en nicoles cruzados, documentando la alteración olivino-serpentina en la alteración Magnetita masiva.** Fuente: Elaboración propia

En la

Figura **16** podemos observar: A) Muestra GM-0033 (Skarn de magnetita masiva). Se muestra cúmulos de cristales de olivinos reemplazados por serpentina, y escasos cristales de antigorita como alteración del olivino. B) Muestra GM-0086 (Skarn de magnetita masiva). Presencia de lizardita (serpentina) a modo de matriz intercrecida con la clorita, rellenando intersticios entre la tremolita y actinolita.

Olivino – talco: En esta alteración, no se evidencia fuerte cantidad de talco (<3%).

Olivino (Fosterita) -> talco

3MgSiO4 (olivino) + H2O + 5SiO2 -> 2MgSi010(OH)2 (talco)

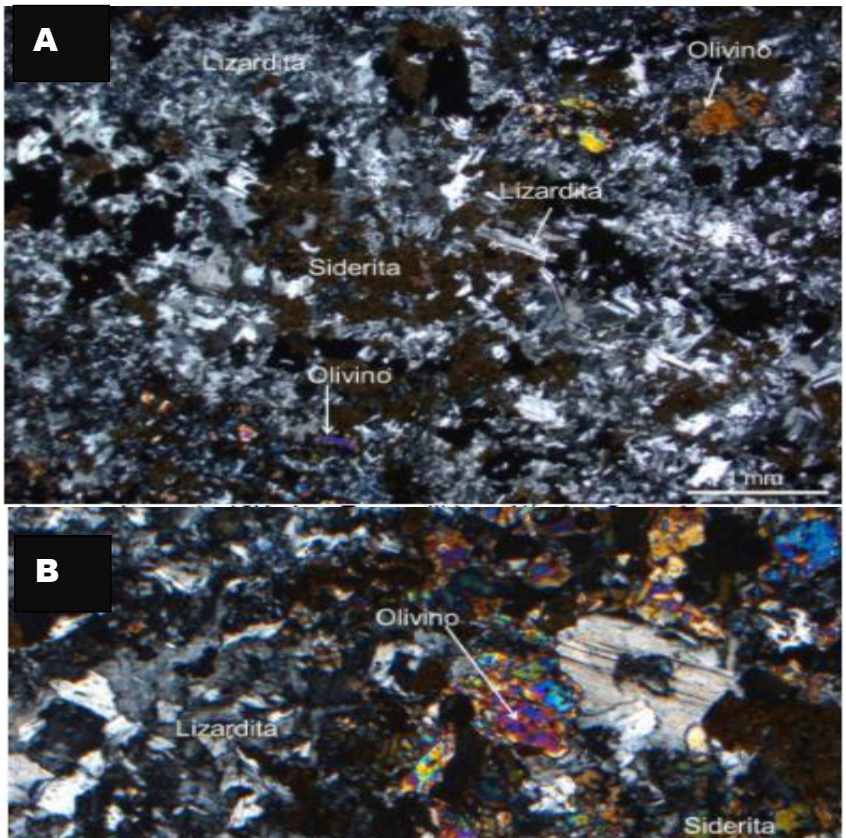


Figura 17. **Fotomicrografías de secciones delgadas en nicoles cruzados, documentando la alteración olivino-serpentina en la alteración Magnetita masiva.** Fuente: Elaboración propia

En la figura 17 podemos observar: A) Muestra GM-0064 (Skarn de magnetita masiva). El talco ocurre a manera de parches o cúmulos irregulares en la matriz, posiblemente reemplazando al olivino. B) Muestra GM-0034 (Skarn de magnetita masiva). Se muestra talco como relleno puntual de espacios intersticiales asociado con la serpentina y clorita.

Siderita-magnetita: En esta alteración, el Fe2+ sustituye al Mg, hasta llegar a formas siderita.

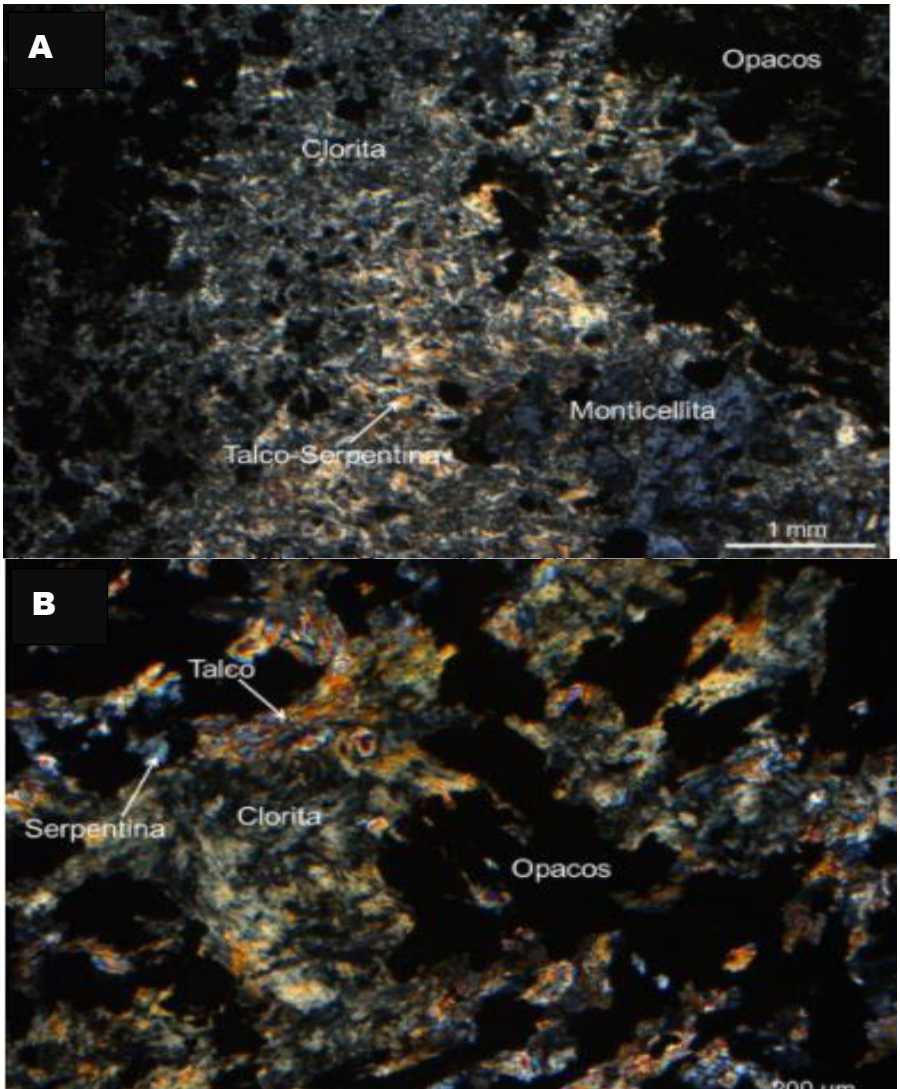


Figura 18. **Fotomicrografías de secciones delgadas en nicoles cruzados, documentando la alteración siderita-magnetita en la alteración Magnetita masiva.** Fuente: Elaboración propia

En la

Figura **18** se observan dos fotomicrografías que corresponden a la Muestra GM-0038 (Skarn de magnetita masiva). Además, se detecta la presencia de siderita producto de la alteración de la magnetita, ocurren en granos diseminados asociados con lizardita y parcialmente al olivino.

e. Alteración tremolita /actinolita

La alteración en los *Endoskarn* se desarrolla cerca a los intrusivos, principalmente en las granodioritas. Está caracterizada, principalmente, por piroxenos, tremolita y actinolita.

Diópsido -> Tremolita / Actinolita

PIROXENO (Mg, Fe) + 3CO2+ 2H2O → TREMOLITA/ACTINOLITA + CaCO3 + 2CUARZO

Olivino asociado a Actinolita

Figura 19. **Fotomicrografías de secciones delgadas en nicoles cruzados, documentando la alteración desarrollada en el endoskarn.** Fuente: Elaboración propia

En dicha

Figura **19** podemos observar: A) Muestra GM-0030 (Endoskarn Tremolita-actinolita). Cristales subhedrales de diópsido intercrecidos con actinolita, micas dispuestas entre los cristales de diópsido y actinolita. B) Muestra GM-

0052 (Endoskarn Tremolita- actinolita). Nótese detalle de cristales de olivino asociado a actinolita.

f. Alteración Endo Skarn

Endo skarn- tremolita /actinolita: En las muestras, se ha podido identificar un metasomatismo caracterizado por actinolita-tremolita, producto de la alteración de piroxenos (diópsido). También se tiene el reemplazamiento de Feldespatos K por actinolita-tremolita. Esta alteración se muestra de manera semipervasiva y masiva en el desarrollo del Skarn.

Diópsido -> Tremolita / Actinolita

PIROXENO (Mg, Fe) + 3CO2+ 2H2O → TREMOLITA/ACTINOLITA + CaCO3 + 2CUARZO.

En dicha Figura 20 podemos observar: A) Muestra GM-0028 (Hornfels-diópsido). Cristales de tremolita reemplazando a diópsido. B) Muestra GM-0056 (Hornfels-diopsido). Cristales relictos de diópsido rodeados de actinolita-tremolita. Nótese al centro ocurrencia masiva de actinolita. C) Muestra GM-0024 (Hornfels-diópsido). Ocurrencia masiva de cristales de tremolita superando tamaños de hasta 1mm. D) Muestra GM-0010 (Hornfel-diópsido). Feldespato potásico como mineral relicto siendo reemplazado por actinolita-tremolita. E) Muestra GM-0083 (Hornfel-diópsido). Presencia de cristales de granates intercrecidos con cristales de diópsido.

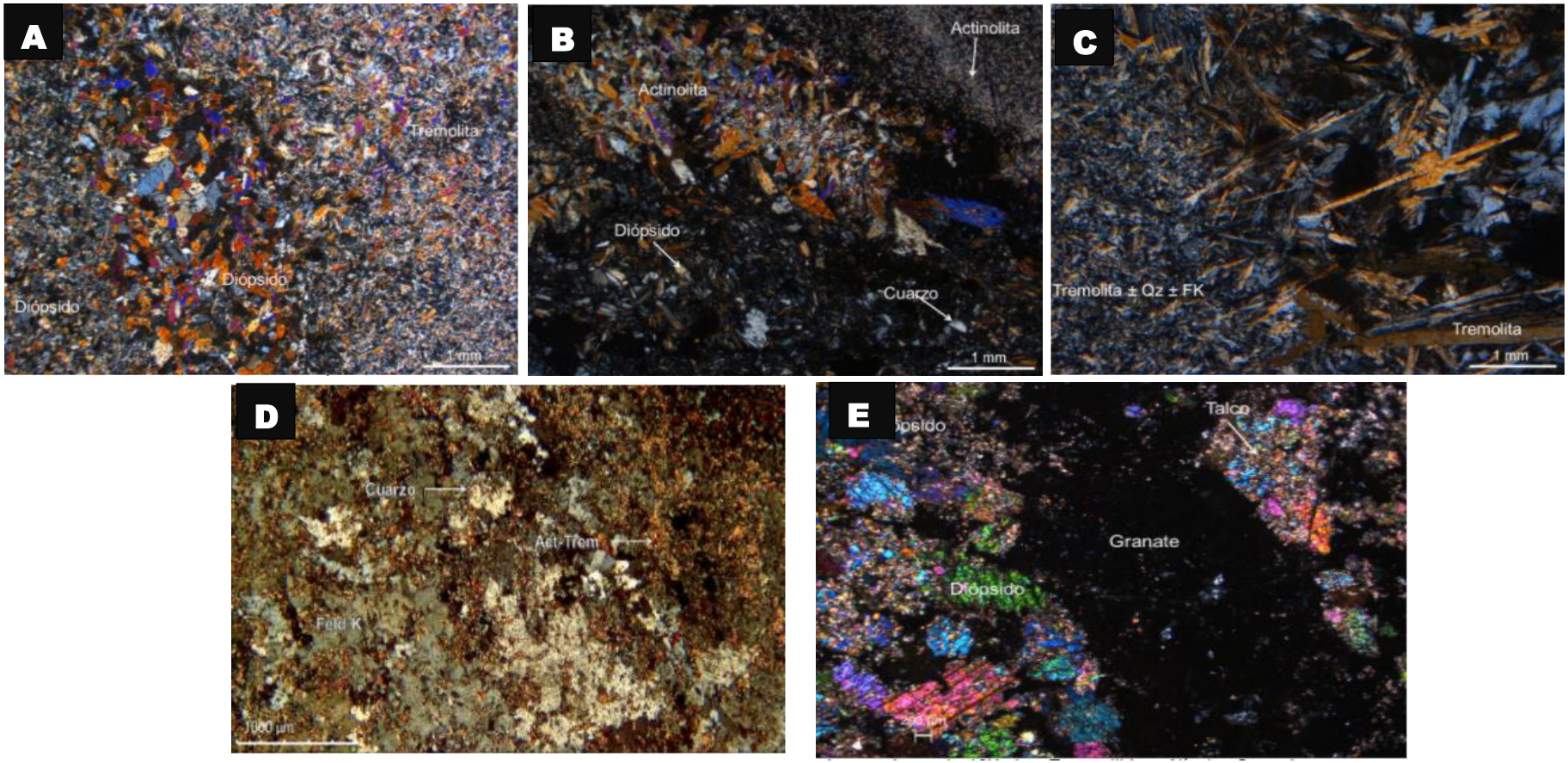


Figura 20. **Fotomicrografías de secciones delgadas en nicoles cruzados, documentando la alteración Endo Skarn-actinolita/ tremolita.** Fuente: Elaboración propia

g. Alteración supérgena

En el área del tajo, la alteración supérgena no está bien definida, la oxidación de los minerales es muy incipiente y se caracteriza por la presencia de limonita, jarosita, clorita. La presencia de calcosina como patinas cubriendo a la pirita, calcopirita, se observa en toda el área probablemente se proyecta varios metros debajo del tajo. El pobre desarrollo que alcanzó la alteración supérgena, así también el enriquecimiento de sulfuro secundario posiblemente se debió a la rápida erosión glaciar a que fue sometida la región durante el pleistoceno.

4.2.1.3. Mineralización de Toromocho

El yacimiento de Toromocho cuenta con rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, todas ellas responsables de la formación de sus propios tipos de cuerpos mineralizados. La mineralización se depositó en forma de stockwork y granos diseminados en las granodioritas San Francisco, Gertrudis y San Miguel, así como en los stocks de pórfido feldespático y pórfido de cuarzo.

En las vetas y mantos, los principales minerales de mena que predominan son la calcopirita, la tetraedrita, la enargita, la esfalerita y la galena. Los minerales de ganga más frecuentes son pirita, magnetita, cuarzo, carbonatos y anhidrita. Las vetas de los skarns y hornfels suelen ser menos continuas y no llegan a las profundidades de la roca. Tanto en términos de potencia como de grado, son inconsistentes. Las estructuras de cola de caballo son propensas a desarrollarse en los contactos con la granodiorita y el pórfido feldespático que también prefieren formar. (ver Figura 21). La galena muy cristalizada similar a la esfalerita, tetraedrita en forma muy fina de color rojizo.

Figura 21. **Veta Galena-Esfalerita-Tetraedrita.** Fuente: Elaboración propia

Se pueden encontrar cuerpos mineralizados en zonas de contacto en la zona de los stocks de San Francisco y Gertrudis. Estos cuerpos mineralizados están en contacto con la caliza Pucará, que ha sido fuertemente cambiada por silicatos hidratados. Estas entidades son asimétricas, y su formación puede atribuirse a la sustitución de la caliza hidratada. La mineralización puede ser algo enorme, pero la mayoría de las veces está uniformemente dispersa en granos, parches o globos oculares. Existe la posibilidad de que la mineralización finamente dispersa se encuentre en la granodiorita y el pórfido feldespático que se encuentran en las cercanías. (ver Figura 22).

Figura 22. **Cuerpos de Sulfuros Masivos de magnetita. Esfalerita-Calcopirita-Pirita cuya matriz es de serpentina magnetita cuyos cuerpos son lenticulares.** Fuente: Elaboración propia

La difusión de cobre porfídico puede encontrarse al sur-suroeste de la sección central de la zona de Morococha. Este tipo de dispersión de cobre parece estar conectado genéticamente con el pórfido feldespático y la granodiorita. La distribución del cobre va acompañada de mineralización de molibdeno y plata, pero en concentraciones modestas en cada uno de esos elementos. En la zona de dispersión también se observa un stockwork que incluye cobre, plata e incluso un poco de mineralización de molibdeno.

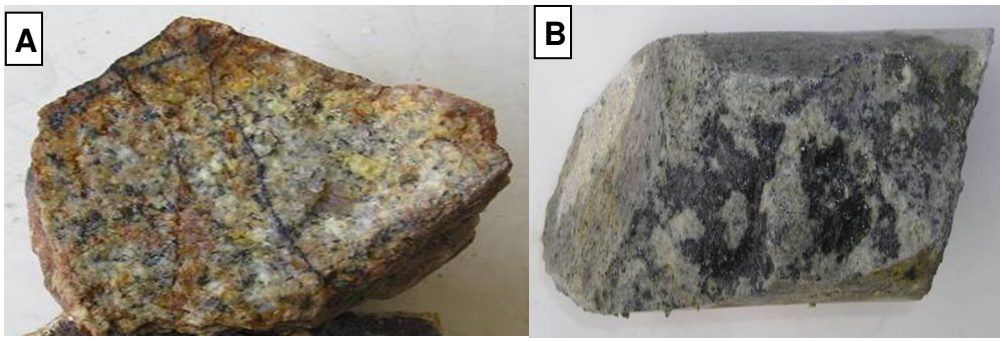


Figura 23. **Diseminaciones.** Fuente: Elaboración propia

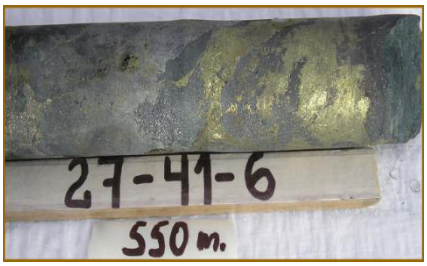
En la Figura 23 se observa: A) débil presencia de calcosina sobre impuesto a calcopirita en roca granodiorita de textura equigranular con débil presencia de

óxidos en fracturas (Jarosita). B) Fuerte presencia de calcosina, digenita sobre impuesta a calcopirita, pirita en pórfido feldespático con alteración fílica.

Hay muchos cientos de metros de profundidad por debajo del fondo del enriquecimiento antes de llegar a la zona de sulfato, que tiene diseminaciones de anhidrita y veteados. Según los resultados de las pruebas consecutivas de cobre, la mitad superior de la zona enriquecida tiene un contenido de cobre lixiviable superior al cincuenta por ciento. El estudio secuencial revela que la mitad inferior del manto débilmente enriquecido, que se encuentra por encima del fondo del enriquecimiento y en la parte superior de la zona principal, contiene entre un 15 y un 50 por ciento de cobre lixiviable. Esta porción del manto se encuentra por debajo del fondo del enriquecimiento.

La mineralización en Toromocho es descrita en la siguiente forma:

Cuadro 4. **Mineralización en el yacimiento Toromocho**

Mineralización	Descripción	Evidencia
Primaria y alteración	La mineralización de cobre primario de más alta ley puede encontrarse en mantos de magnetita y sulfuro masivo dentro de los skarns de los sedimentos del Pucará y en vetas de cuarzo y pirita de fuerte buzamiento dentro de los intrusivos y volcánicos de Catalina.	 *Mantos de Sulfuro Semi Masivo de Pirita-Magnetita-Calcopirita. parte central del yacimiento fuerte presencia de calcopirita y esfalerita la clorita se observa como parches y la magnetita de forma diseminada*
Alteración potásica con bajo contenido de pirita temprana	La alteración potásica de los intrusivos adoptó la forma de alteración biotita secundaria durante este evento deposicional temprano y de cobre. Esta alteración se caracterizó por vetas de hornblenda y calcopirita, cuarzo, un fondo de feldespato potásico/biotita de color oscuro más profundo y calcopirita diseminada relativamente abundante que contenía halos de feldespato potásico/biotita.	*Alteración potásica en pórfido feldespático*
	Vetillas tipo "A": Son difíciles de encontrar en los intrusivos de Toromocho y no representan una proporción significativa del cobre primario.	*Venilla EDM en Granodiorita*
	Vetillas tipo "B": Incluyen el elemento molibdeno. Son más numerosas que las vetas con la letra "A", sobre todo en las profundidades de los intrusivos y las rocas volcánicas de Catalina.	*Vetilla de cuarzo-molibdenita, tipo B, cortada y desplazada por una vetilla de cuarzo*
Alteración temprana de skarn Tremolita / Actinolita	La intrusión del stock de San Francisco del Terciario Superior transformó las calizas y dolomías de la Formación Pucará en hornfels de wollastonita y diópsido con	

	cuarzo anhidro y anhidrita, y las pizarras en hornfels de biotita/feldespática potásica.	
Superposición pirítica tardía	**Venillas de tipo EDM:** Con contenido de calcopirita en los intrusivos. Son cortadas sistemáticamente por las vetillas del tipo "D" piríticas con halos sericíticos. El intrusivo pórfido cuarcífero está sericitizado intensamente y contiene mineralización pirítica, siendo más penetrante y reflejándose en secciones transversales de patrones de alteración.	*Venillas Tipo EDM con pirita calcopirita calcosina en Granodiorita*
	Venillas Tipo "D": Las vetillas de calcopirita y actinolita en los skarn y hornfels son también cortadas consistentemente por las vetillas piríticas tardías con halos "tipo Arcilla" suave de las alteraciones tipo serpentina y clorita.	*Venillas Tipo "D" con halo fílico cuarzo pirita en pórfido feldespático*
Skarn de Serpentina Alterado	La otra mitad del skarn de tremolita/actinolita se denomina "skarn de serpentina alterado" porque incluye varias proporciones de material de tipo arcilla blanda y se define y muestra en secciones transversales.	*Skarn de Serpentina – Magnetita con fuerte presencia de forsterita de color verde muy puntual alterándose a talco cortado por venillas tardías de pirita calcopirita*
Arsénico pirítico tardío	La superposición de pirita tardía se compone no sólo de stockworks de menor escala de vetas piríticas y diseminaciones piríticas, sino también de fallas y vetas piríticas continuas de mayor tamaño. Estas características se han comentado en el párrafo anterior.	
Anhidrita	Debido a la presencia de diseminaciones de anhidrita y vetas y fracturas que han sido selladas por la anhidrita, todas las rocas que se encuentran dentro de la zona de sulfato son completamente impermeables.	

Fuente: Modificado de Flores (2019)

Empleando la difracción de rayos X, se identificó que la ley principal y más alta del yacimiento de cobre se extiende entre 500 y 600 m por debajo de la superficie, el cual se localiza dentro de un yacimiento de skarn de 1 a 2 km (ver Figura 24).

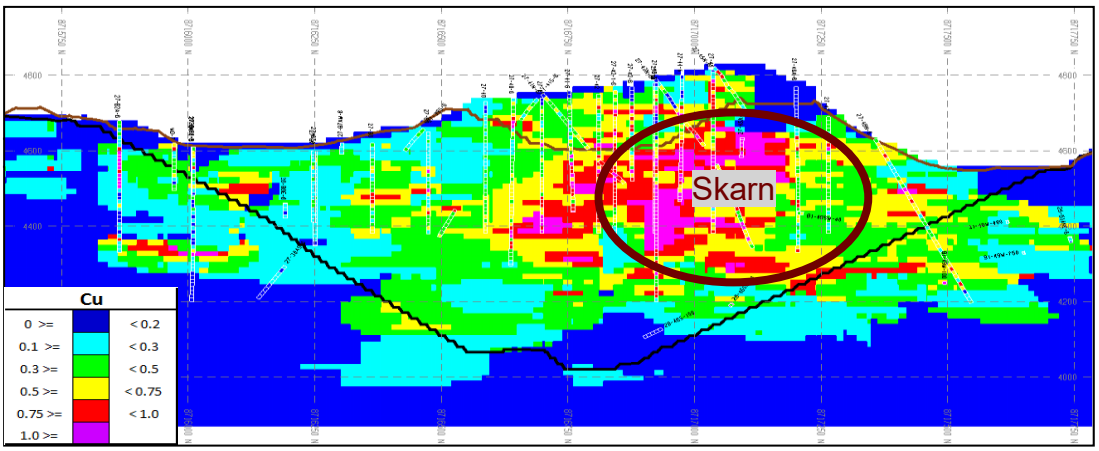


Figura 24. **Sección 27 W Cu.** Fuente: Modificado de Minera Chinalco Perú (2016)

En la parte principal y central del yacimiento, los patrones de distribución del molibdeno que se muestran en las secciones tienen la forma de conos invertidos o sección 27 al oeste del cobre. (ver Figura 25).

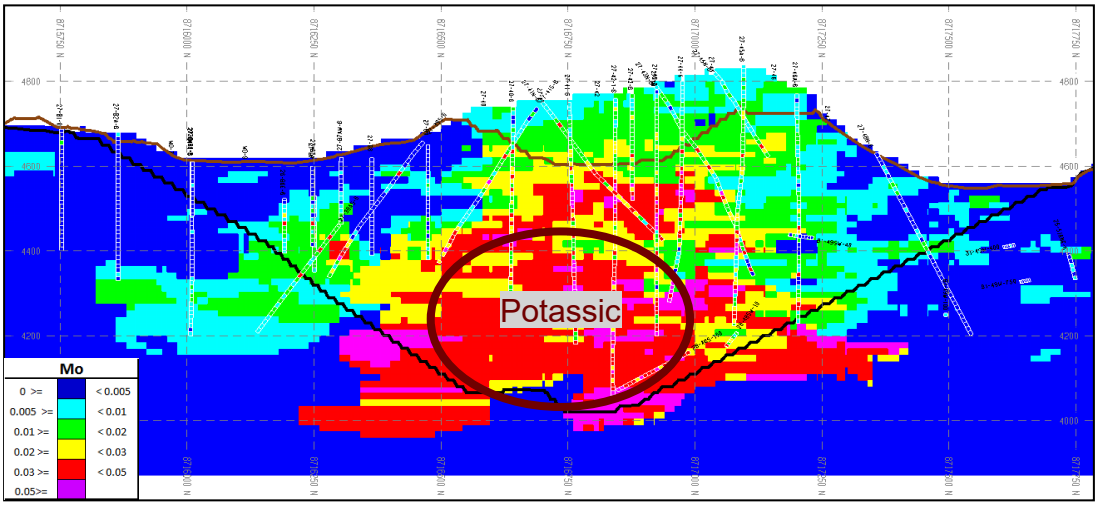


Figura 25. **Sección 27 W Molibdeno.** Fuente: Modificado de Minera Chinalco Perú (2016)

La abundancia de vetas de cuarzo-Mo "B" en la mineralización temprana de cobre en los skarns y en los intrusivos, respectivamente, se refleja en el patrón de cono invertido que se representa en las secciones. En Toromocho, la mineralización de enargita y tenantita es débil y desigual, lo que es consistente con la presencia de arsénico. Las concentraciones de arsénico suelen ser mayores cerca de la superficie y en altitudes superiores a los 4.700 metros.

Para Flores (2019), el enriquecimiento mineral en Toromocho es variado. En primer lugar, la presencia de calcocita supergénica es relativamente débil, irregular y discontinuo excepto localmente y donde se encuentran concentrados a lo largo de las estructuras en comparación con los hallados en yacimientos pórfidos cupríferos de El Salvador, Escondida y Chuquicamata en Chile. En segundo lugar, el enriquecimiento de plata en Toromocho es secundario dado que oscila desde aproximadamente 5 g/t en la zona primaria hasta cerca del 6 a 7 g/t en la zona enriquecida. En tercer lugar, el enriquecimiento de arsénico es alto (sobre las 1,000 ppm) en las zonas estructurales dentro las zonas intrusivas, es intermedio (de 200 a 500 ppm) en las áreas débilmente enriquecidas entre ellos (ver Figura 26).

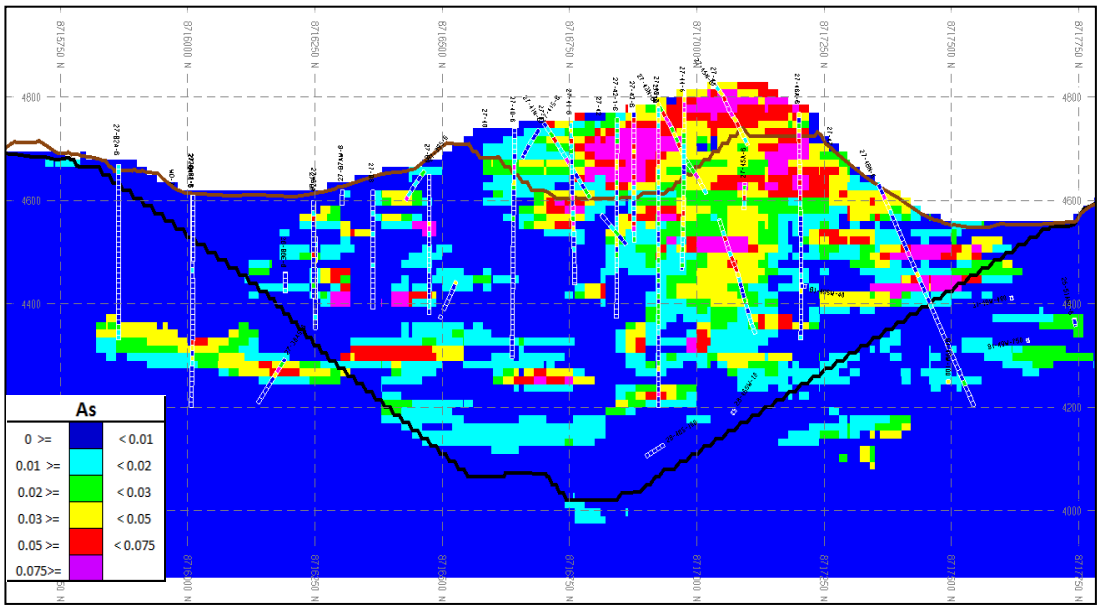


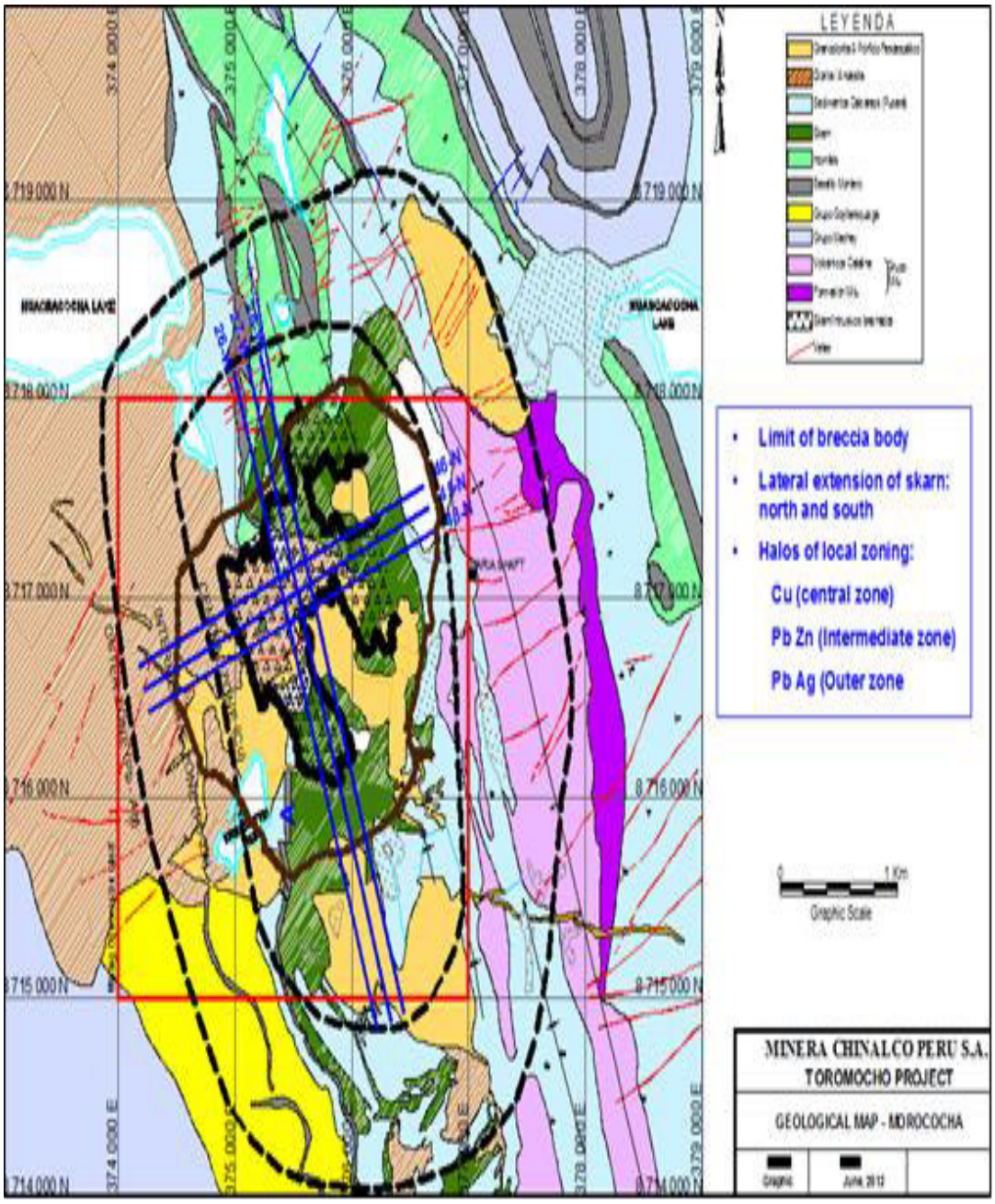
Figura 26. **Sección Geológica con Contenido de Arsénico.** Fuente: Modificado de Minera Chinalco Perú (2016)

La escala vertical reveló niveles bajos en cobre, molibdeno, arsénico y, posiblemente, en oro.

4.2.2. Zonamiento de la mineralización de Toromocho

4.2.2.1. Zonamiento Regional de Morococha

La mineralización de cobre es más frecuente en la zona central, en las regiones alrededor y dentro de los stocks de San Francisco y Gertrudis, así como en las regiones que rodean los skarns y hornfels. La mineralización de plomo y plata puede encontrarse en la zona exterior del distrito, que se extiende por los límites del mismo y se encuentra más allá de la zona central de cobre. La zona central de cobre está rodeada por una zona intermedia que contiene mineralización de zinc y plomo. (ver Figura 27).



	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS **DIRECCIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO** **FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA**
	Mapa Geológico de Zonamiento
	Elaborado por: Ronald Flores Barrón

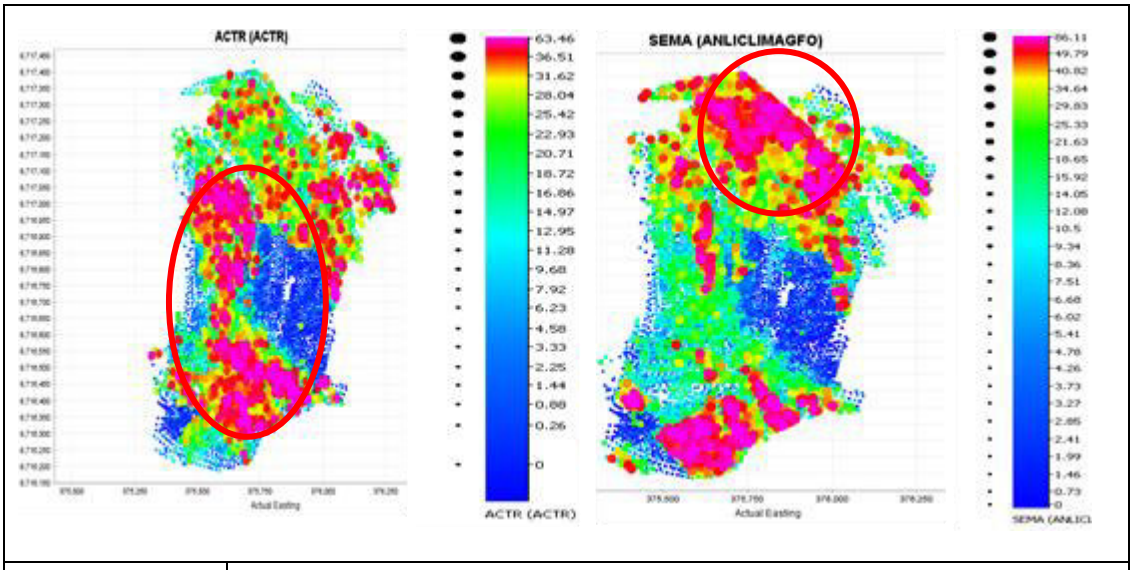
Figura 27. **Mapa Geológico de Zonamiento**. Fuente: Modificado de Minera Chinalco Perú (2012)

4.2.2.2. Zonamiento en el yacimiento Toromocho

Con ayuda de la difracción de rayos X (DRX), el logueo geológico y el cartografiado geológico, se definieron los siguientes zonamientos:

a) Zonamiento con alteración actinolita-tremolita y serpentina – clorita magnetita

Las zonas con alteraciones correspondieron a: (a) El zonamiento, con alteración actinolita-tremolita en el yacimiento Toromocho, es parte de las que están incluidas en los metasedimentos. Toda la secuencia meta sedimentaría se da en la zona central del tajo como brecha polimíctica cuyos clastos están en matriz de actinolita- tremolita. (b) La segunda alteración se ubica en la zona noreste con horizontes de serpentina – clorita magnetita. En la Figura 28 se aprecian los resultados gráficos.



	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS **DIRECCIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO** **FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA**
	Alteración actinolita-tremolita y serpentina – Clorita – magnetita (DRX)
	Elaborado por: Ronald Flores Barrón

Figura 28. **Alteración actinolita-tremolita y serpentina – Clorita – magnetita**. Fuente: Modificado de Minera Chinalco Perú (2017)

METASED = AC + TR+ AN + LI + CLI + MA + F0 + DI > 40%.

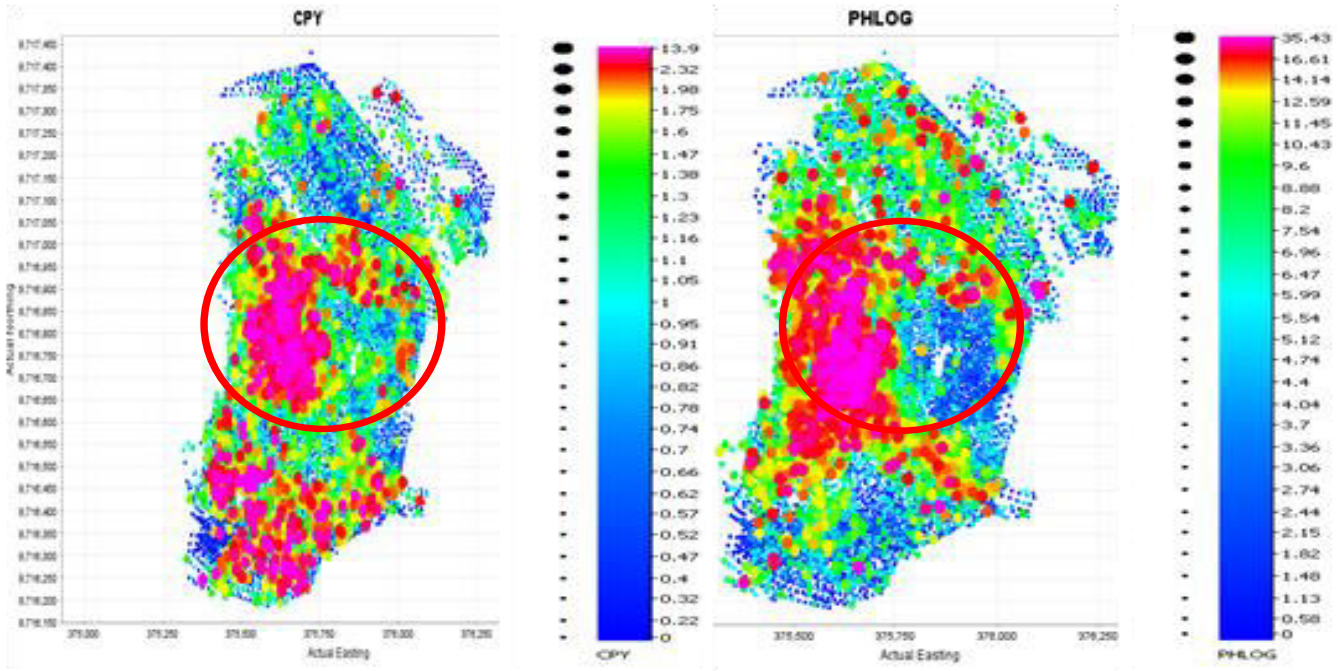
Este índice determina cuáles de las muestras están relacionadas a las rocas meta sedimentarias como:

Actinolita Tremolita = ACTR (AC+TR), Serpentina Magnetita = SEMA (AN+LI+CLI+MA+FO), Magnetita = MA (MA) y Hornfels = HO (DI)

En la escala de dureza Mohs: Actinolita (5), Tremolita (5), Antigorita (3), Lizardita (2.5), Clinocloro (2), Magnetita (6), Fosterita (6.5), Diópsido (6)

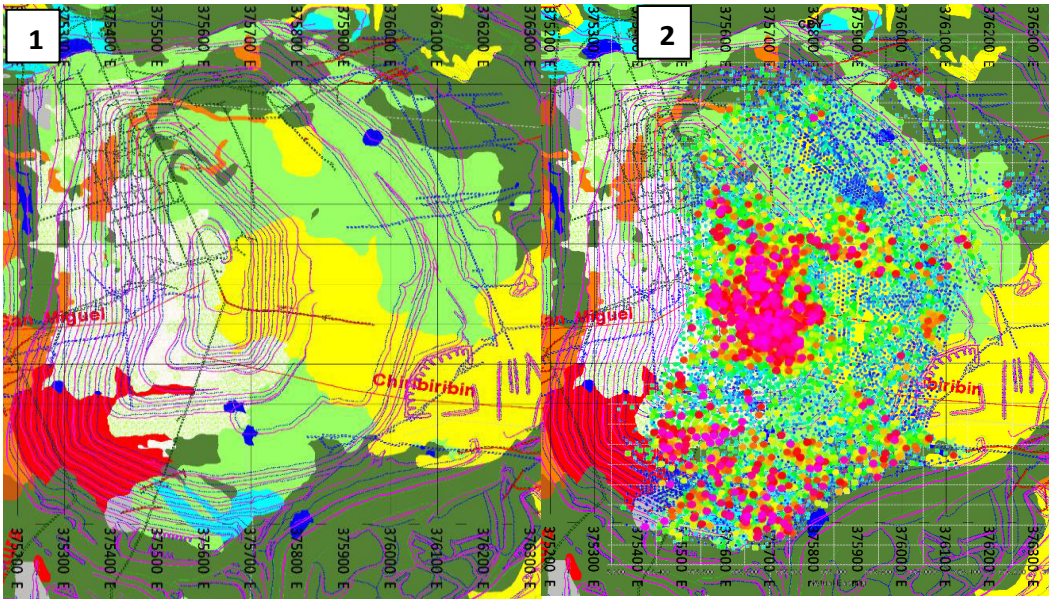
b) Zonamiento Calcopirita y Flogopita

En la parte central del tajo se observaron altos contenidos de Calcopirita asociados a la flogopita. Asimismo, en el lado Sur también se observaron altos valores de Calcopirita, pero no relacionado a la flogopita (ver Figura 29 y Figura 30).



	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS **DIRECCIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO** **FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA**
	Zonamiento Calcopirita y flogopita (DRX)
	Elaborado por: Ronald Flores Barrón

Figura 29. **Distribución Calcopirita y flogopita**. Fuente: Modificado de Minera Chinalco Perú (2019)



	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS **DIRECCIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO** **FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA**
	Mapa de distribución de Flogopita y Calcopirita
	Elaborado por: Ronald Flores Barrón

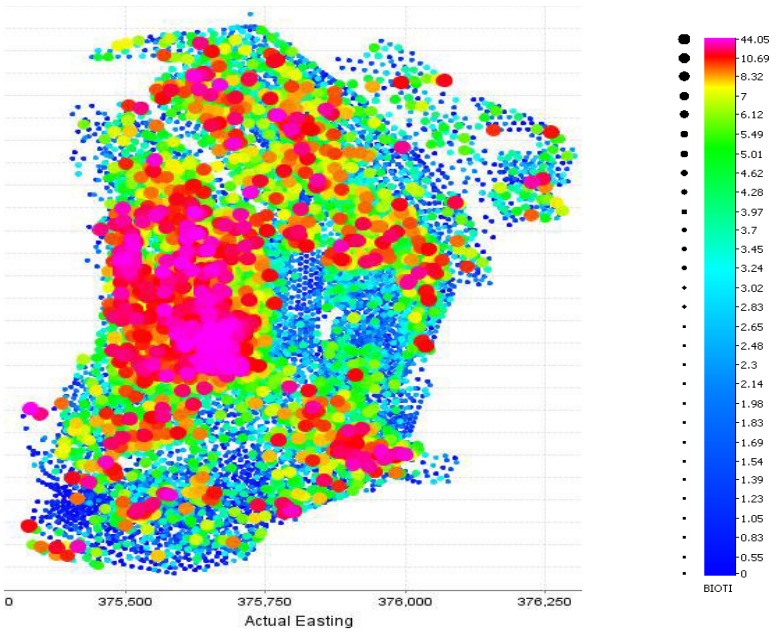
Figura 30. **Distribución de Flogopita y Calcopirita**. Fuente: Modificado de Minera Chinalco Perú (2019)

Se nota cierta distribución de los valores altos de flogopita con la ocurrencia de las brechas y un núcleo de calcopirita que es importante seguir a profundidad y lateralmente por presentar mineralización primaria importante.

c) Zonamiento de biotita

El tamaño de los fragmentos varía desde 1 a 15 centímetros, llegando ocasionalmente hasta 1.50 metros. Los minerales presentes en esta brecha están constituidos por fragmentos y material pulverizados de minerales como pirita, calcopirita, tenantita, magnetita, esfalerita, enargita, y molibdenita. Generalmente, las biotitas se encuentran bien marcadas en la zona Sur – Este del depósito, es decir, en el stock San Francisco en el cual se observan biotitas

en la alteración potásica, como también se tiene bien marcadas en la zona central relacionada a la brecha intrusiva (ver Figura 31).



	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS **DIRECCIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO** **FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA**
	Zonamiento Biotita
	Elaborado por: Ronald Flores Barrón

Figura 31. **Zonamiento Biotita.** *Fuente:* Modificado de Minera Chinalco Perú (2019)

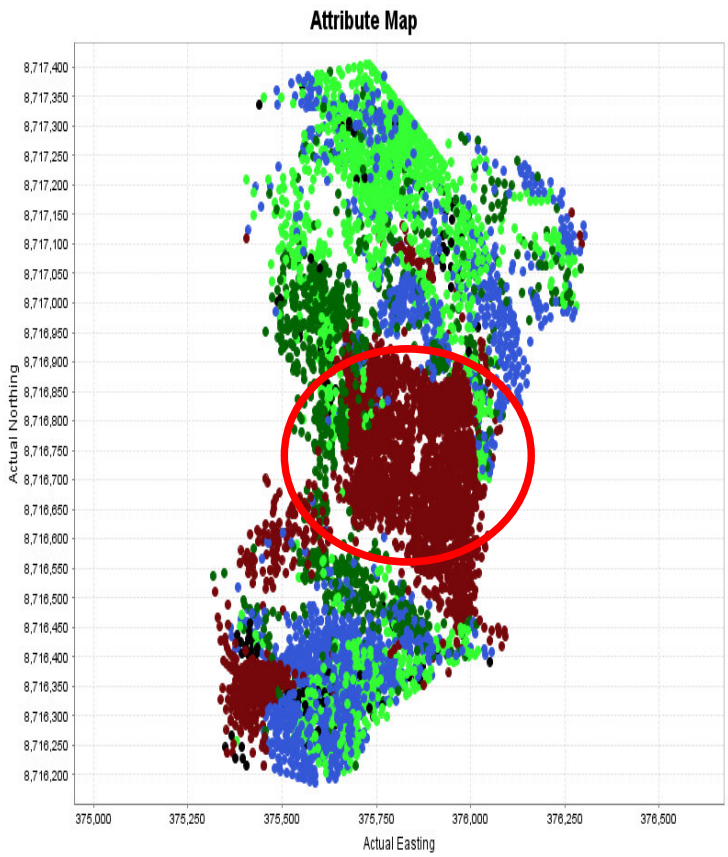
d) Zonamiento ígneos meta sedimentos

Considerando que en la primera parte se definieron algunos minerales característicos de los intrusivos, se procedió a usar dichos minerales para determinar qué muestras provienen de intrusivos y de meta sedimentos. Para ello, se usó la sumatoria de los minerales característicos de cada grupo litológico (ver Figura 32 y Figura 33).

$$IGNEO = QZ+AL+OR+MI+OL > 70\%.$$

Este índice determinó qué muestras están relacionadas a los diferentes intrusivos.

En la escala de dureza Mohs: Cuarzo (7), Albita (6), Ortoclasa (6), Microclina (6), Oligoclasa (6)



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

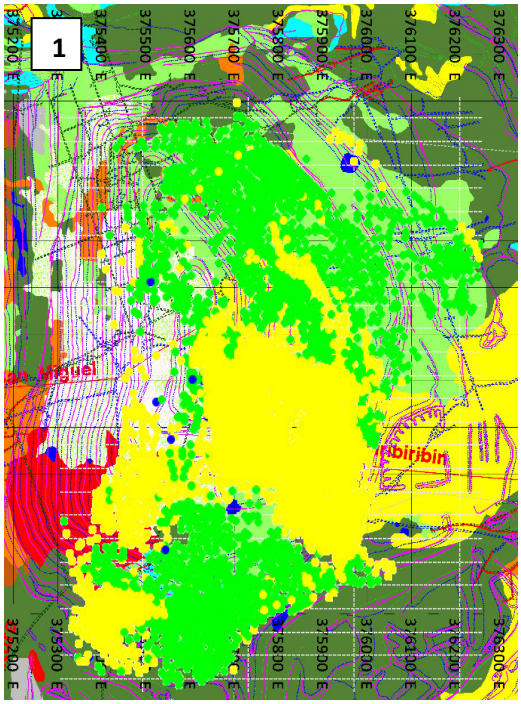
DIRECCIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO

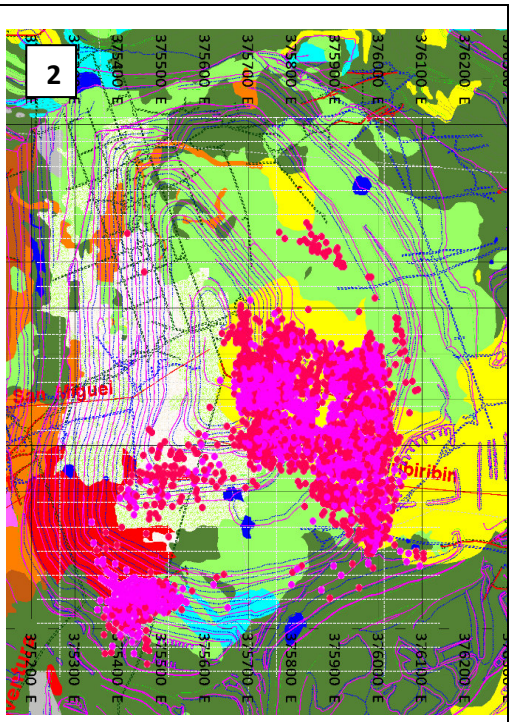
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

Zonamiento de ígneo meta sedimentos (1)

Elaborado por: Ronald Flores Barrón

Figura 32. **Zonamiento de ígneo meta sedimentos. 1) Mapa Geológico superficial, e Índice IGNEO > 60%, METASED > 40%. 2) Mapa Geológico superficial, e Índice IGNEO > 70%.** Fuente: Modificado de Minera Chinalco Perú (2019)





	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS **DIRECCIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO** **FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA**
	Zonamiento de ígneo meta sedimentos (2)
	Elaborado por: Ronald Flores Barrón

Figura 33. **Zonamiento de ígneo meta sedimentos. 1) Mapa Geológico superficial, e Índice IGNEO > 60%, METASED > 40%. 2) Mapa Geológico superficial, e Índice IGNEO > 70%.** *Fuente:* Modificado de Minera Chinalco Perú (2019)

El índice Ígneo > 60% presenta una distribución de los intrusivos mayor a la realidad sin embargo el índice Ígneo > 70% se ajusta muy bien a la distribución de intrusivos en el Tajo.

Considerando que estas litologías / alteraciones interpretadas, a partir de la mineralogía de DRX, tienen una correlación con el mapeo y logueo de campo al 85%, se recomienda probar con límites de ±5% hasta llegar a tener una correlación de 95% entre la interpretación de DRX y las observaciones geológicas.

e) Zonamiento hornfels de diópsido y talco

Los mayores contenidos de Hornfels de Diópsido se da al lado sur del Tajo, donde el diópsido en gran totalidad se está alterado a actinolita tremolita a comparación de la zona norte el hornfels. Este contiene mayor cuarzo y sílice con pequeños horizontes de cuarcitas además en los intrusivos se tiene valores altos de talco < 1% y los valores más altos se tiene en la parte central hacia el Norte (ver Figura 34).

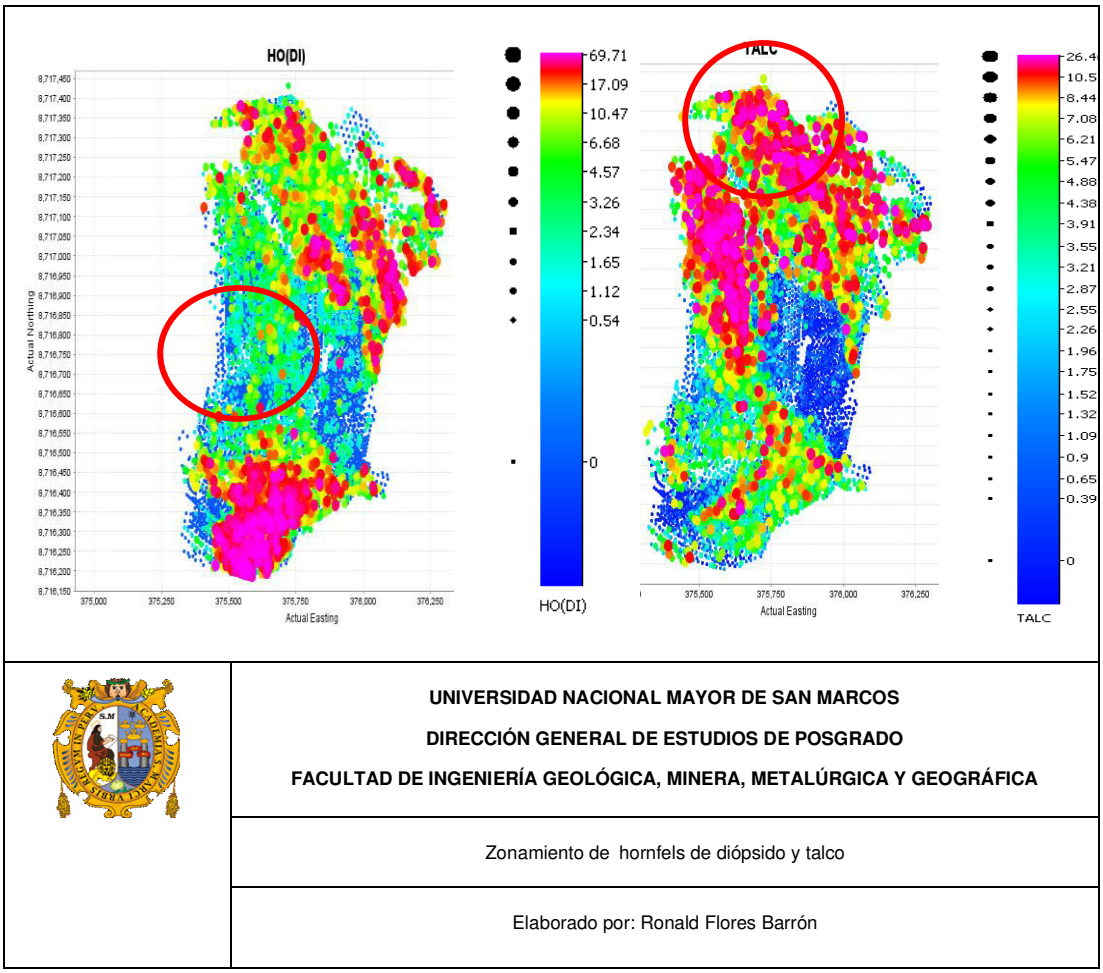


Figura 34. **Zonamiento de hornfels de diópsido y talco**. *Fuente:* Modificado de Minera Chinalco Perú (2019)

f) Zonamiento serpentina magnetita

Serpentina Magnetita > 30% SEMA.

Serpentina Magnetita > 30% SEMA (AN+LI+MA+CLI) Solo los BH que presentan <20% MAG.

Estos metasedimentos se encuentra Norte y Nor-Este del yacimiento característicos de *skarn* de serpentina clorita magnetita en algunos tramos con interestratificación de horizontes de hornfels de diópsido clorita, la presencia de magnetita se debe a pequeños mantos masivos y semi masivos de magnetita con sulfuros (ver Figura 35).

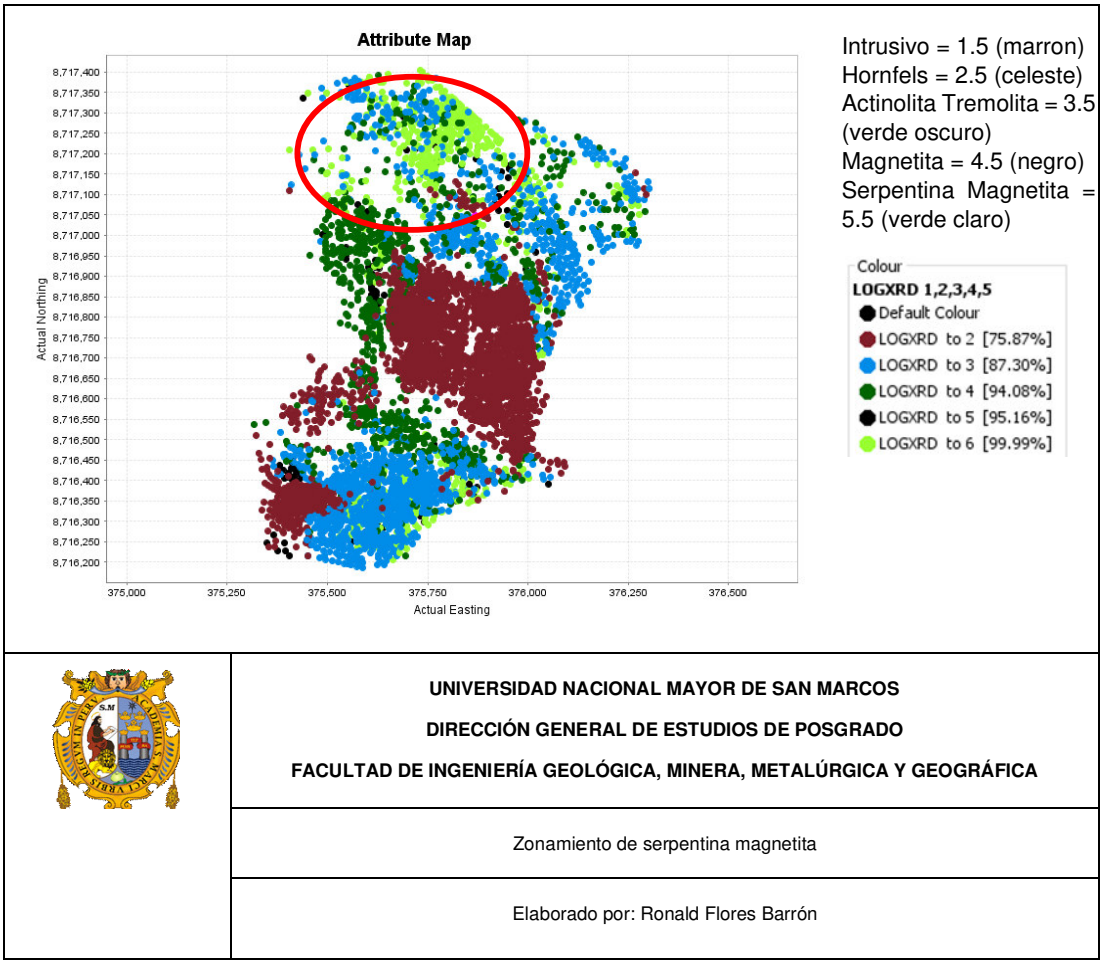


Figura 35. **Serpentina Magnetita > 40 % SEMA**. *Fuente:* Modificado de Minera Chinalco Perú (2019)

Serpentina Magnetita > 40 % SEMA (AN+LI+MA+CLI) Solo los BH que presentan <20% MAG. Con este límite, se controla la distribución de dicha alteración por lo que se recomienda este límite.

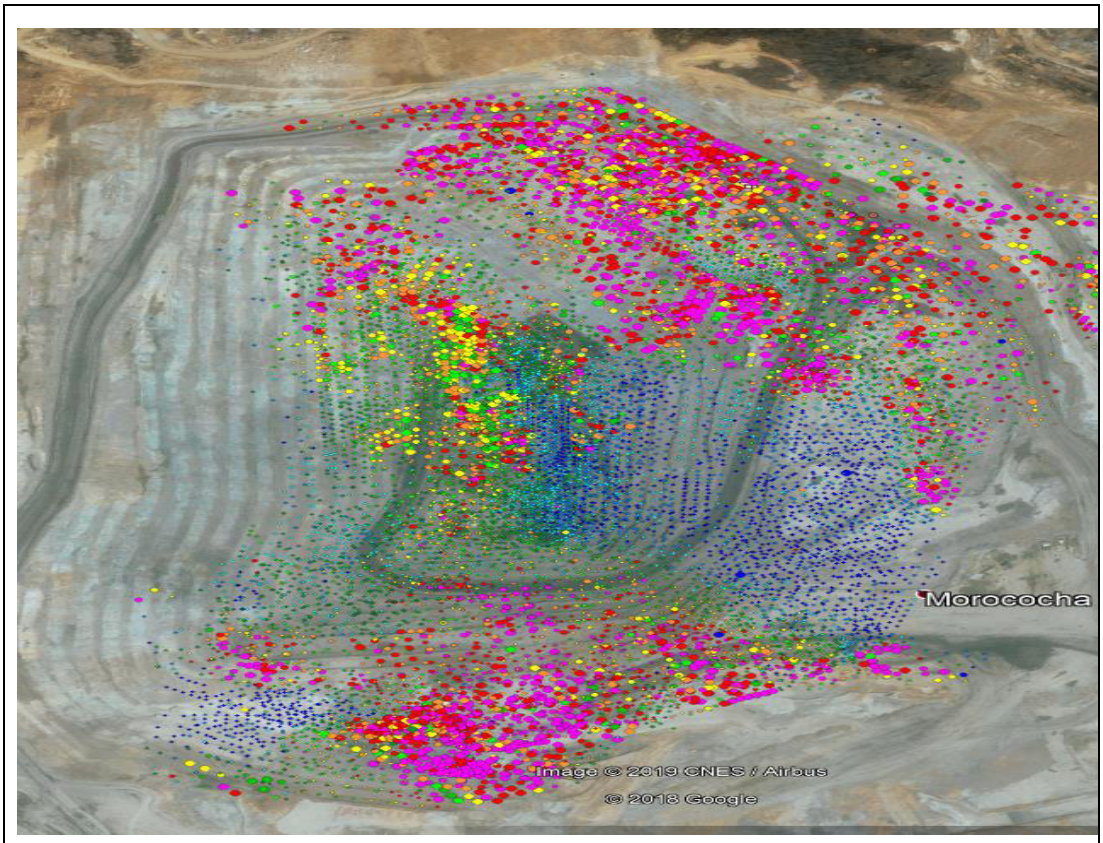
A continuación, en el Cuadro 5 se observa el nivel de correlación entre los minerales, incluidos los metasedimentos, los cuales destacaron por ser buenos.

Cuadro 5. **Matriz de correlación de los minerales**

Correlation - 13133	ACTR (ACTR)	SEMA (ANLICLIMAFO)	HO (DI)	METASED	ACTIN	TREM	ANTIG	LIZAR	CLC	MAGN	FO	DIOPS
ACTR (ACTR): Actinolita - Tremolita	1	0.097	0.36	0.71	0.98	0.14	0.063	-0.01	0.21	-0.03	-0.04	0.36
SEMA (ANLICLIMAFO)	0.097	1	0.074	0.72	0.098	9.46E-04	0.8	0.38	0.77	0.7	0.54	0.074
HO : Hornfels diópsido	0.36	0.074	1	0.53	0.35	0.052	0.091	0.034	0.056	0.018	0.009	1
METASED: Metasedimentos	0.71	0.72	0.53	1	0.69	0.088	0.58	0.25	0.63	0.44	0.33	0.53
ACTIN: Actinolita	0.98	0.098	0.35	0.69	1	-0.048	0.063	-0.01	0.2	-0.03	-0.04	0.35
TREM: Tremolita	0.14	9.46E-04	0.052	0.088	-0.048	1	0.001	0.016	0.015	-0.02	0.004	0.052
ANTIG: Antigorita	0.063	0.8	0.091	0.58	0.063	0.0014	1	0.17	0.42	0.41	0.31	0.091
LIZAR: Lizardita	-0.006	0.38	0.034	0.25	-0.009	0.016	0.17	1	0.26	0.23	0.17	0.034
CLC: Clinocloro	0.21	0.77	0.056	0.63	0.2	0.015	0.42	0.26	1	0.35	0.29	0.056
MAGN: Magnesio	-0.031	0.7	0.018	0.44	-0.028	-0.015	0.41	0.23	0.35	1	0.36	0.018
FO: Forsterita	-0.035	0.54	0.009	0.33	-0.036	0.0036	0.31	0.17	0.29	0.36	1	0.009
DIOPS: Diópsido	0.36	0.074	1	0.53	0.35	0.052	0.091	0.034	0.056	0.018	0.009	1

Fuente: Modificado de Minera Chinalco Perú (2019)

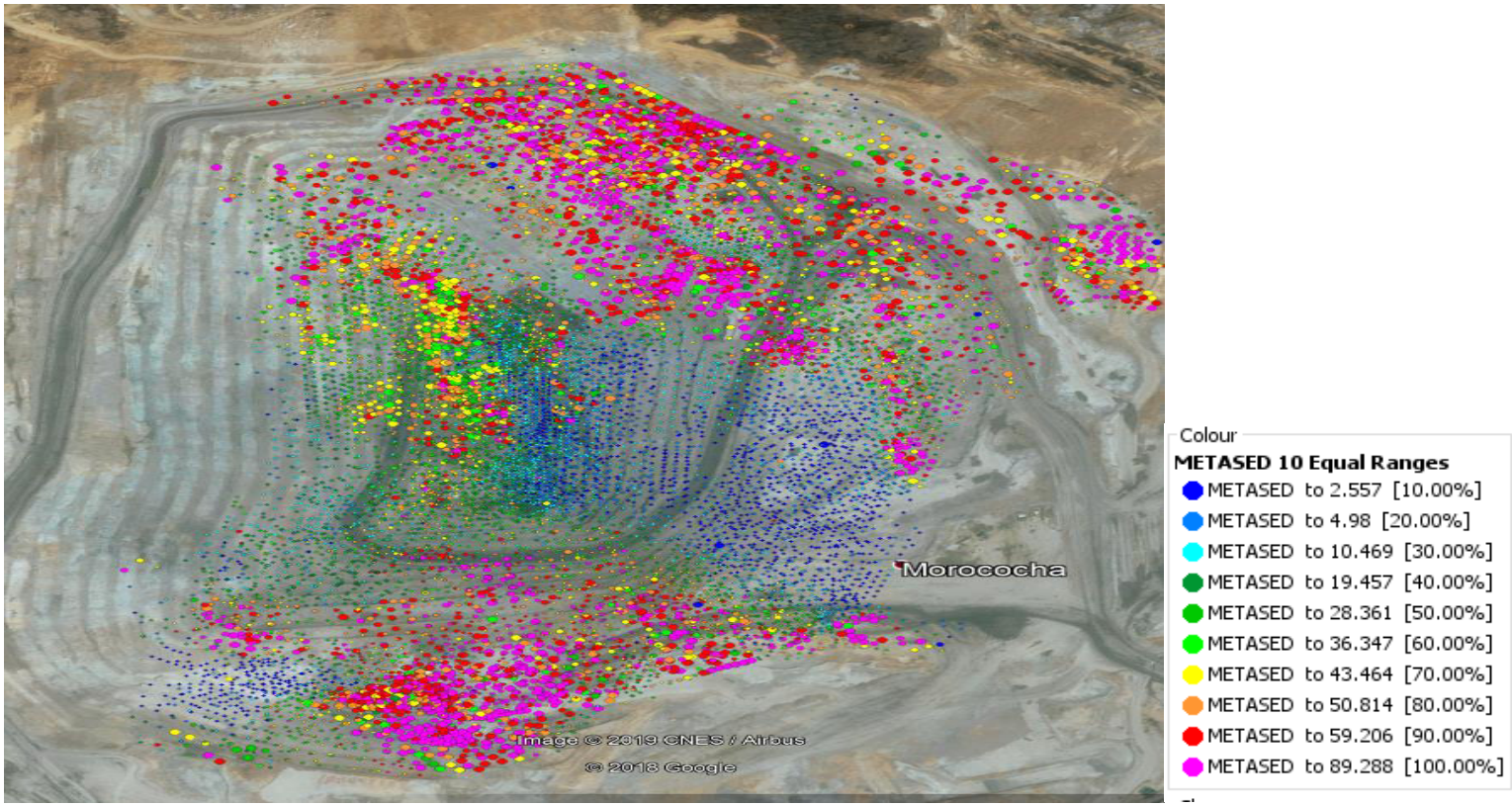
En la



Colour
METASED 10 Equal Ranges
- METASED to 2.557 [10.00%]
- METASED to 4.98 [20.00%]
- METASED to 10.469 [30.00%]
- METASED to 19.457 [40.00%]
- METASED to 28.361 [50.00%]
- METASED to 36.347 [60.00%]
- METASED to 43.464 [70.00%]
- METASED to 50.814 [80.00%]
- METASED to 59.206 [90.00%]
- METASED to 89.288 [100.00%]

	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS **DIRECCIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO** **FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA**
	Mapa litológico y de alteraciones
	Elaborado por: Ronald Flores Barrón

Figura **36** se observan los puntos de dispersión de los minerales, incluidos los metasedimentos, los cuales se caracterizaron por tener una buena correlación.

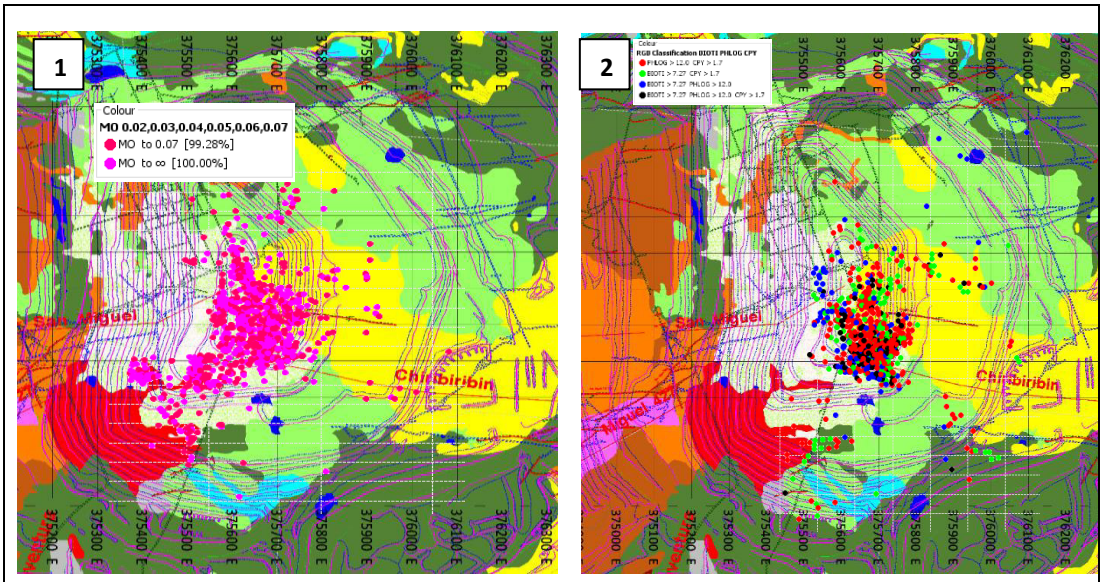


UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS **DIRECCIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO** **FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA**
Mapa litológico y de alteraciones
Elaborado por: Ronald Flores Barrón

Figura 36. **Puntos de dispersión de los minerales.** Fuente: Elaboración propia

g) Zonamiento de Molibdeno Flogopita Biotita Calcopirita

Los altos contenidos de flogopita, biotita, calcopirita, asociados a valores altos de molibdeno, que está sobre los 600 ppm, son importantes seguir a profundidad y lateralmente por presentar mineralización primaria importante. En las brechas, ubicadas en la parte central del yacimiento, se observaron altos contenidos de flogopita, biotita, calcopirita asociada a valores altos de molibdeno que es importante seguir a profundidad y lateralmente por presentar mineralización primaria importante (ver Figura 37).



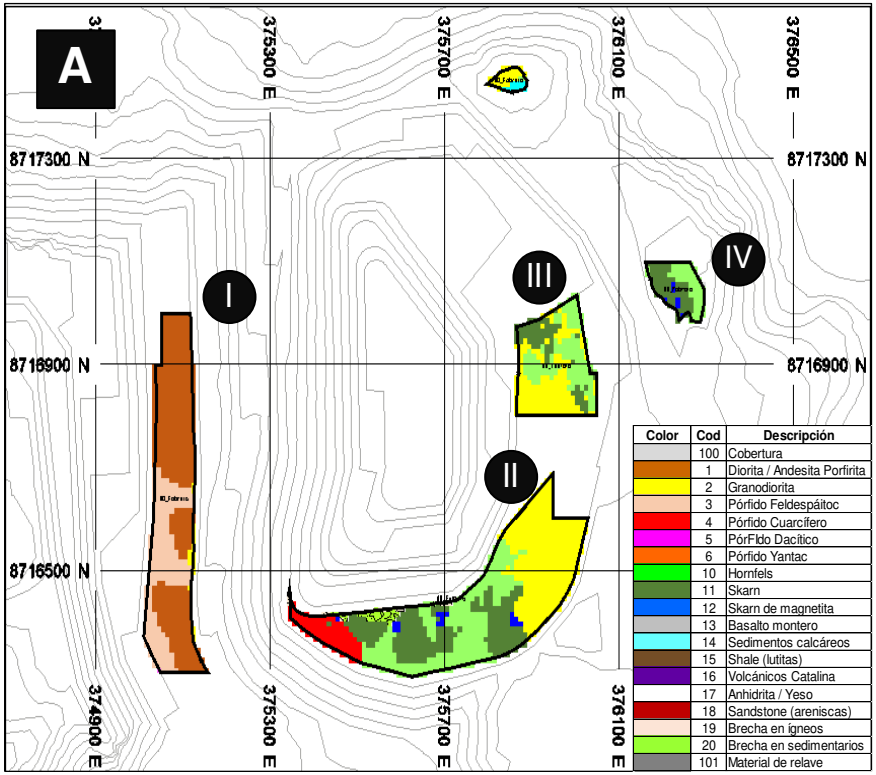
	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS **DIRECCIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO** **FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA**
	Zonamiento de molibdeno flogopita biotita calcopirita
	Elaborado por: Ronald Flores Barrón

Figura 37. **Molibdeno flogopita biotita calcopirita**. Fuente: Modificado de Minera Chinalco Perú (2019)

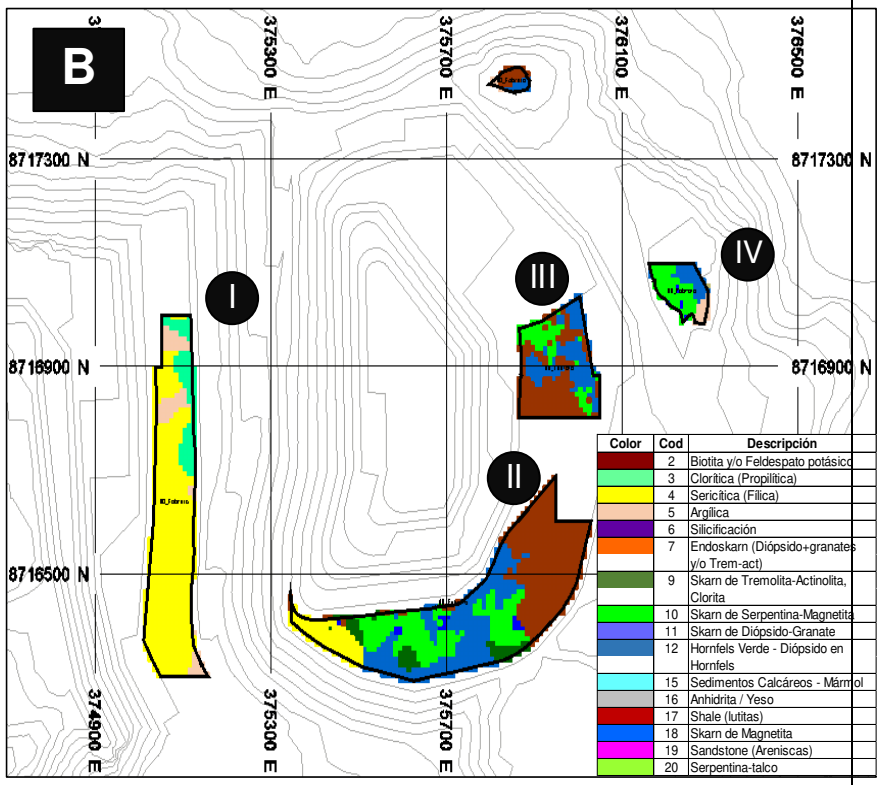
4.2.3. Minado seguro en Toromocho

Antes de establecer el minado seguro en el yacimiento Toromocho, se analizó el perfil litológico y las alteraciones de las zonas minadas. En la Figura 38 se observan las características litológicas y de alteraciones de cuatro Bancos: (a) El Banco 4725 presentó diorita cortado por un pórfido feldespático con alteración fílica, (b) el Banco 4635 presentó una secuencia sedimentaria de

hornfels de diópsido interestratificado con skarn de actinolita-tremolita más al oeste un pórfido cuarcífero con alteración fílica, y al este con granodiorita con alteración potásica, y al este con granodiorita, (c) el Banco 4590 presentó intrusivo granodiorítico con alteración potásica con colgados de skarn de serpentina y hornfels y (d) el Banco 4575 presentó una secuencia sedimentaria de Skarn de serpentina magnetita con intercalaciones de hornfels de diópsido clorita.



Mapa litológico, febrero 2019
Banco 4725 (I) – 4635 (II) – 4590 (III) – 4575 (IV)



Mapa de alteraciones, febrero 2019
Banco 4725 (I) – 4635 (II) – 4590 (III) – 4575 (IV)

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
DIRECCIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

Mapa litológico y de alteraciones

Elaborado por: Ronald Flores Barrón

Figura 38. **Mapa litológico y de alteraciones, febrero 2019**. Fuente: Modificado de Minera Chinalco Perú (2019)

4.2.3.1. Minerales contaminantes

Durante el minado, se identificaron minerales contaminantes que perjudicaron su desarrollo. A modo de determinar un nivel de mejora, se reconocieron los contaminantes registrados en los planes de minado de 2016 y 2019:

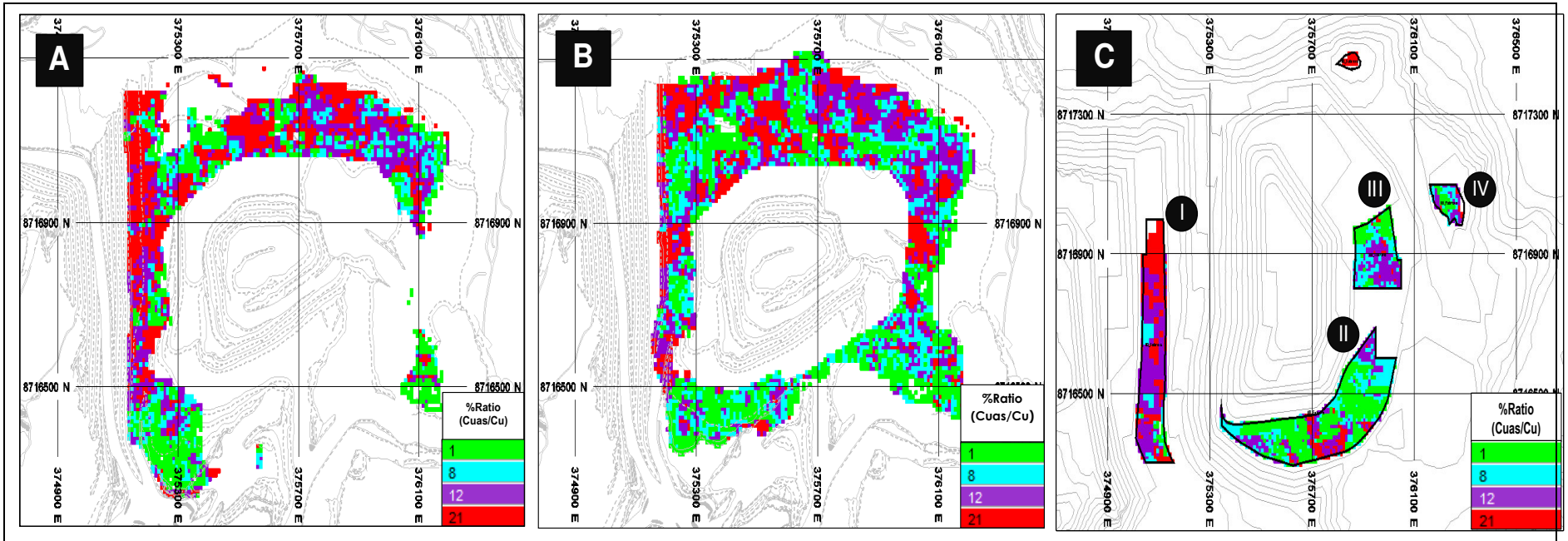
Cuadro 6. **Contaminantes Minado 2016 y 2019**

Año	Mes		As%	Mg%	Flúor ppm	Zn%	Fe%	RatoX%	Talc%
2016	Ene	Banco 4710	0.0313	0.39	2015	0.0906	7.38	4.19	-
	Feb	Banco 4710	0.0365	1.32	1654	0.0960	6.05	11.91	-
	Mar	Banco 4710	0.0328	0.05	1447	0.1076	7.07	10.02	-
	Abr	Banco 4710	0.0393	0.00	1620	0.1029	7.35	8.12	-
	May	Banco 4710	0.0300	3.05	1619	0.1341	9.85	8.31	-
	Jun	Banco 4710	0.0373	6.14	1667	0.1438	8.85	8.20	-
	Jul	Banco 4710	0.0327	7.02	1718	0.0787	7.93	6.91	-
	Ago	Banco 4710	0.0329	8.32	1926	0.1047	9.18	6.28	-
	Sep	Banco 4710	0.0328	8.72	1929	0.0965	8.45	6.31	-
	Oct	Banco 4710	0.0427	6.94	1722	0.1223	9.82	6.44	-
	Nov	Banco 4710	0.0433	8.38	1933	0.1166	10.82	7.44	-
	Dic	Banco 4710	0.0388	7.73	2402	0.0797	9.28	5.48	-
	Promedio		**0.0359**	**4.95**	**1814**	**0.1062**	**8.59**	**7.32**	**-**
2019	Feb	Banco 4725	0.0300	1.31	1257	0.1800	3.17	16.99	0.63
		Banco 4635	0.0200	13.86	1990	0.2800	17.42	11.82	3.36
		Banco 4590	0.0200	9.67	1850	0.1500	7.37	10.26	4.11
		Banco 4575	0.0200	9.78	2818	0.1100	8.93	12.30	2.94
	Promedio		**0.0200**	**9.67**	**2098**	**0.1500**	**8.39**	**11.22**	**3.59**

Fuente: Modificado de Minado del año 2016 y Minado del mes de febrero 2019.

Acorde al Cuadro 6, en 2016 se registró mensualmente 0.03% de arsénico, 4.95% de magnesio, 1,814 ppm de flúor, 0.11% de zinc, 8.59% de hierro y 7.32% de Cuas/Cu. En 2019, estos valores aumentaron (excepto del arsénico y hierro que disminuyeron a 0.02% y 8.39%, respectivamente): en promedio, los bancos registraron 9.67% de magnesio, 2,098 ppm de flúor, 0.15% de zinc y 11.22% de Cuas/Cu. Además, se identificó la presencia de talco cuya media para los cuatro bancos fue de 3.59%.

En las figuras 39, 40, 41, 42 y 43 se observan los valores de Cuas/Cu, arsénico, zinc, flúor y magnesio registrados en seis bancos distintos.



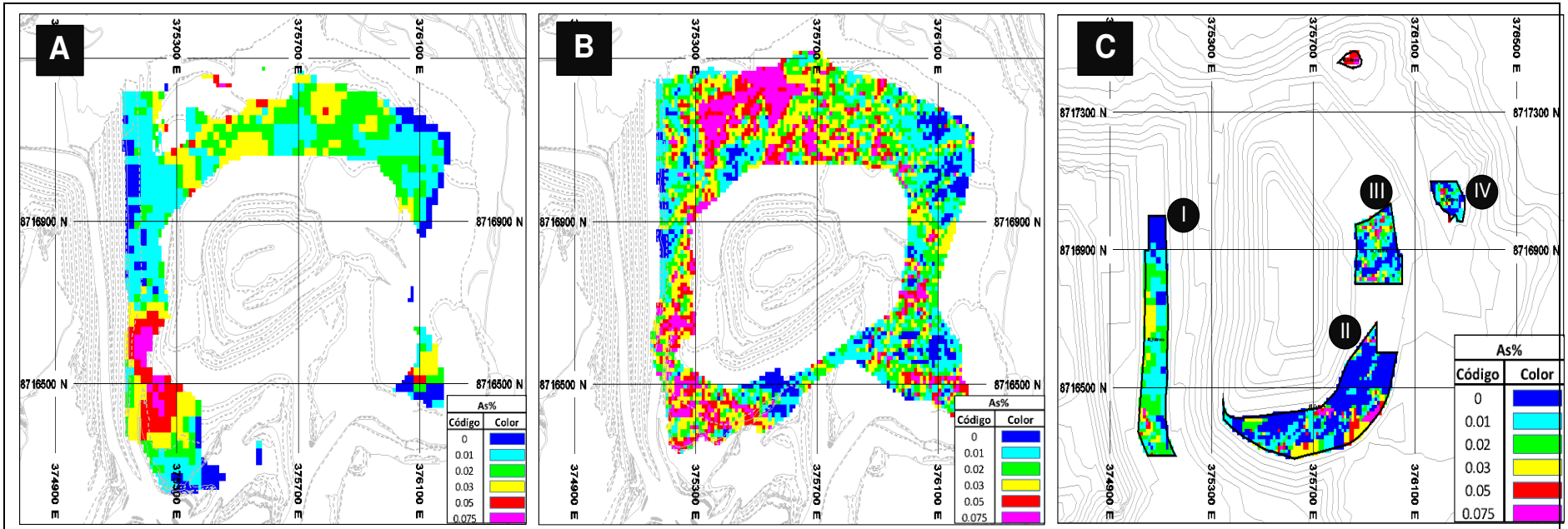
Mapa del minado del año 2016 Banco 4710	Mapa del minado del año 2016 Banco 4695	Mapa del minado de febrero 2019 Banco 4725 (I) – 4635 (II) – 4590 (III) – 4575 (IV)

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
DIRECCIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

Mapa del Minado RatoX %

Elaborado por: Ronald Flores Barrón

Figura 39. **Mapa del Minado RatoX %.** Fuente: Modificado de Minera Chinalco Perú (2017)



Mapa del minado del año 2016 Banco 4710	Mapa del minado del año 2016 Banco 4695	Mapa del minado de febrero 2019 Banco 4725 (I) – 4635 (II) – 4590 (III) – 4575 (IV)

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
DIRECCIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

Mapa del Minado de Arsénico %

Elaborado por: Ronald Flores Barrón

Figura 40. ***Mapa del Minado de Arsénico %.*** Fuente: Modificado de Minera Chinalco Perú (2017)

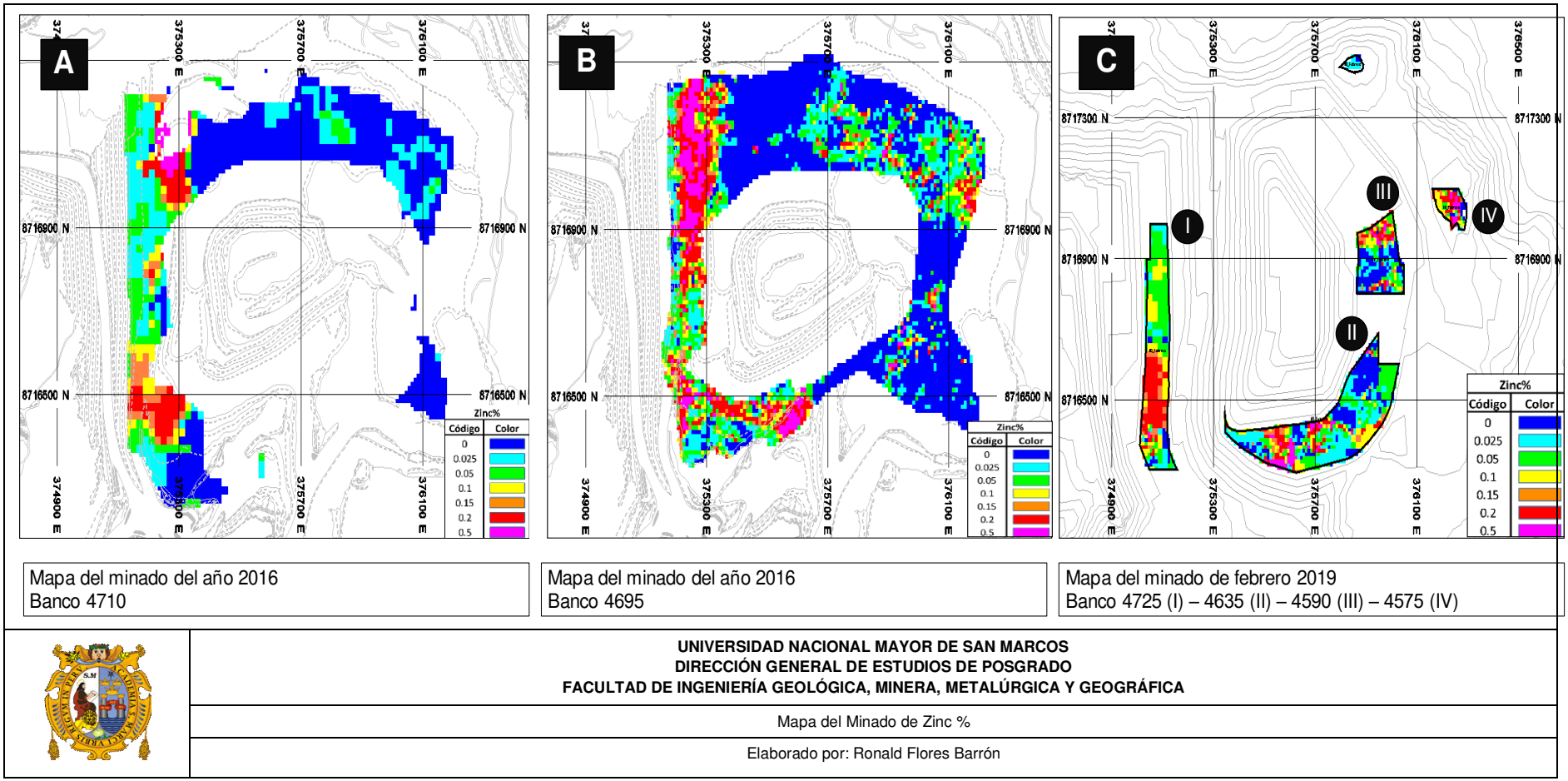
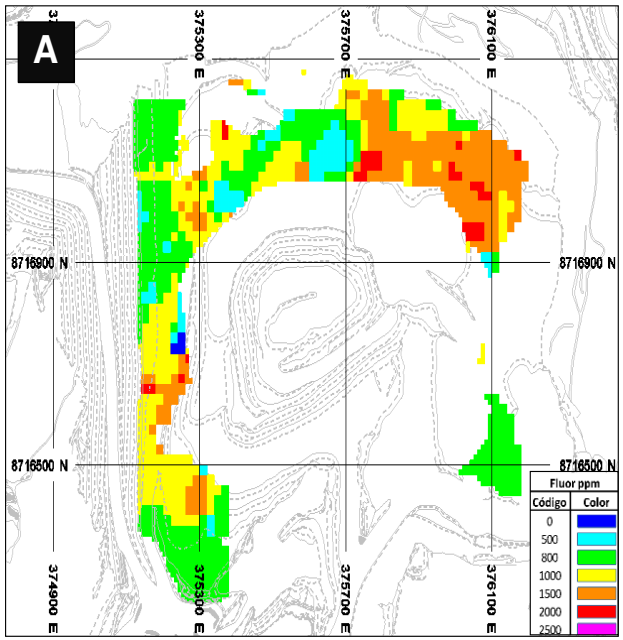
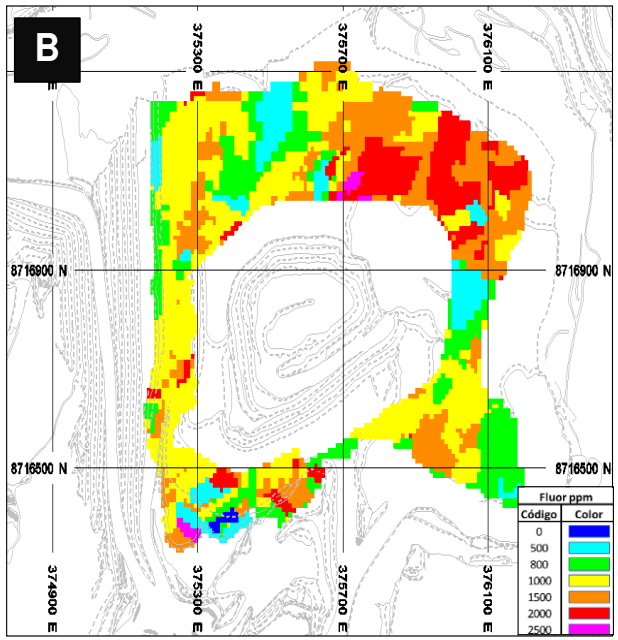


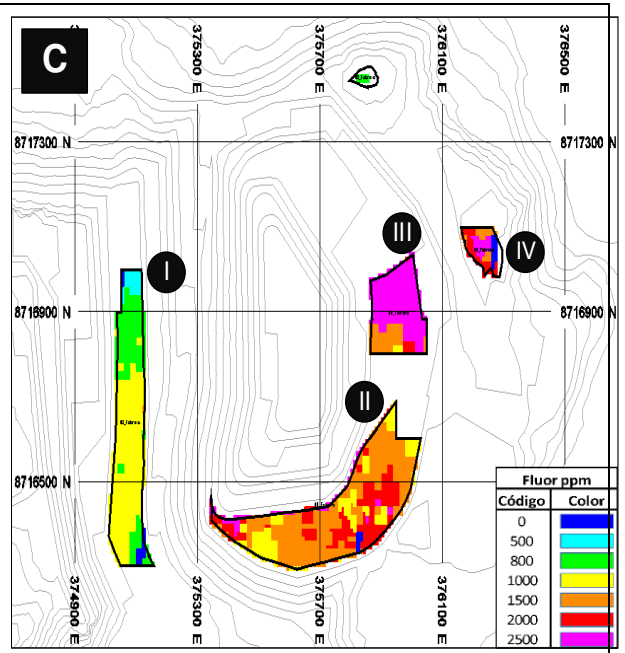
Figura 41. **Mapa del Minado de Zinc %.** Fuente: Modificado de Minera Chinalco Perú (2017)



Mapa del minado del año 2016
Banco 4710



Mapa del minado del año 2016
Banco 4695



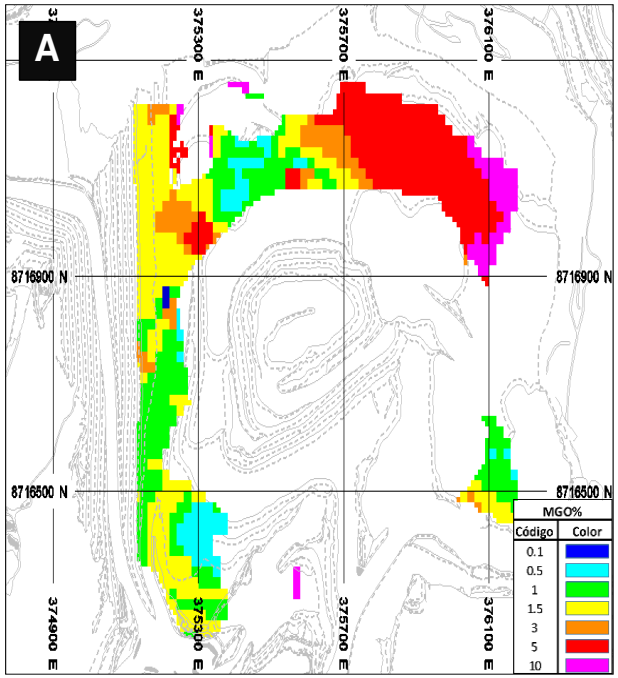
Mapa del minado de febrero 2019
Banco 4725 (I) – 4635 (II) – 4590 (III) – 4575 (IV)

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
DIRECCIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

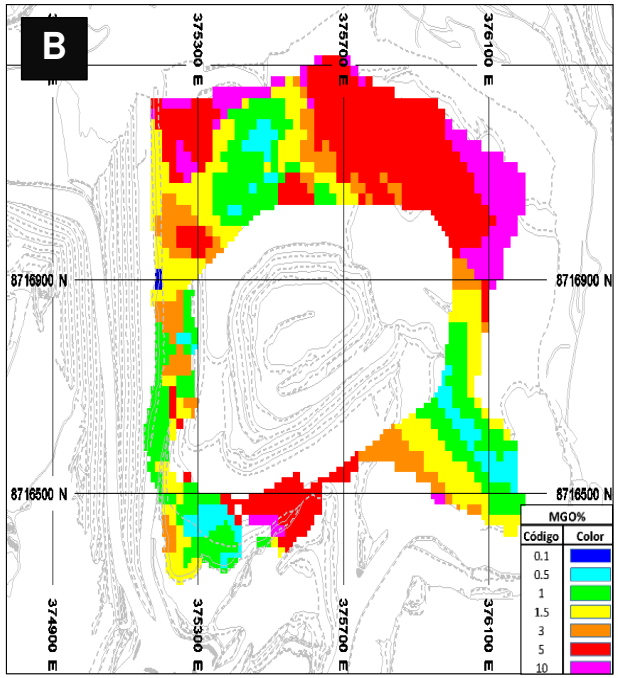
Mapa del Minado de Flúor en ppm

Elaborado por: Ronald Flores Barrón

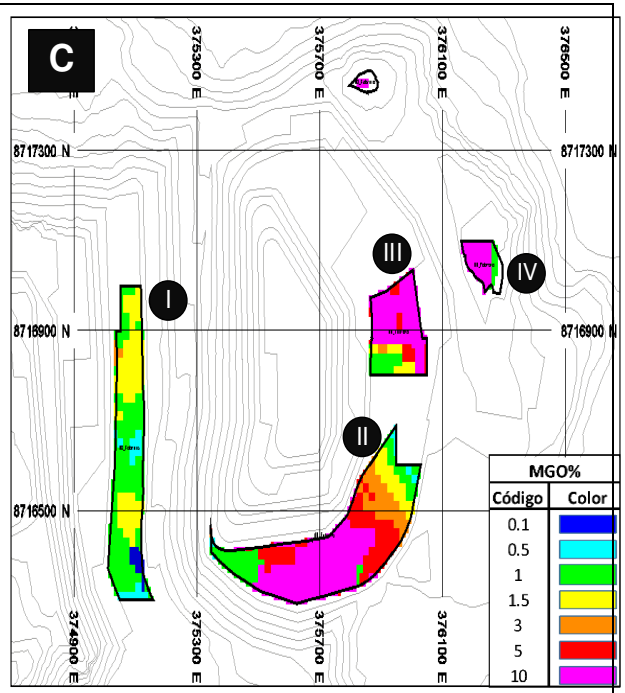
Figura 42. **Mapa del Minado de Flúor en ppm.** Fuente: Modificado de Minera Chinalco Perú (2017)



Mapa del minado del año 2016
Banco 4710



Mapa del minado del año 2016
Banco 4695



Mapa del minado de febrero 2019
Banco 4725 (I) – 4635 (II) – 4590 (III) – 4575 (IV)

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
DIRECCIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

Mapa del Minado de Magnesio %

Elaborado por: Ronald Flores Barrón

*Figura 43.***Mapa del Minado de Magnesio %.** Fuente: Modificado de Minera Chinalco Perú (2017)

La presencia y cantidad de contaminantes se debió a la litología del lugar.

La Figura 39 muestra: En los ítems A y B se identificaron valores altos en Cuas/Cu de 12 – 21%. El ítem C presentó resultados variados: el Banco 4725 presentó valores altos de Cuas/Cu de 21%; el Banco 4635 tuvo valores de 1 a 8% de Cuas/Cu; el Banco 4590 registró un valor Cuas/Cu de 12%; y el Banco 4575 presentó en promedio 8% de Cuas/Cu.

La Figura 40 muestra: En los ítems A y B se identificaron valores altos de arsénico (entre 0.05 – 0.075%) a causa de la presencia de vetas de Cuarzo-Enargita-Zinc-Tenantita. Además, en el nor-este de la zona A la secuencia de skarn con intercalación de hornfels de diópsido clorita tuvo valores intermedios de 0.01% y 0.02%. En el ítem C, los niveles de arsénico fueron similares para los cuatro Bancos dado que presentaron valores intermedios entre 0.01 – 0.02 y 0.02 – 0.05; este hecho se originó por la presencia de la veta de cuarzo-enargita.

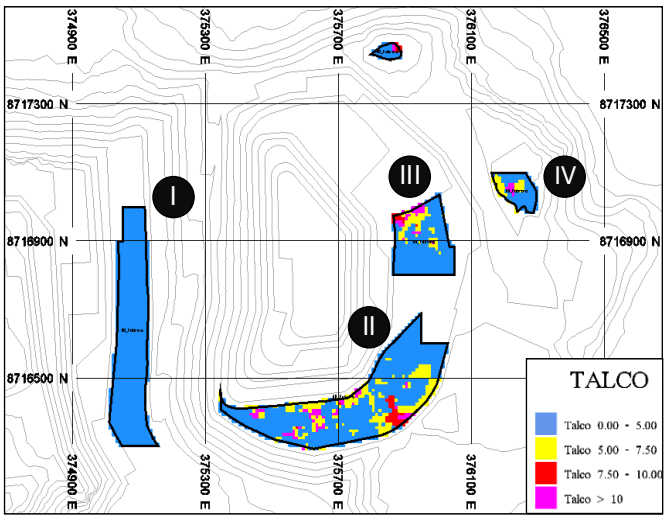
La Figura 41 muestra: En los ítems A y B se identificaron valores altos de zinc (entre 0.2 – 0.5%) a causa de la presencia de vetas de Cuarzo-Enargita-Zinc-Tenantita. Sin embargo, en la zona nor-este del ítem A, los valores de zinc fueron muy bajos. En el ítem C se hallaron distintos niveles de zinc: los Bancos 4725 y 4575 registraron valores altos (0.5%) por la veta de zinc-enargita mientras los Bancos 4635 y 4590 registraron valores intermedios (entre 0.2 – 0.5%).

La Figura 42 muestra: En los ítems A y B se identificaron valores intermedios de flúor (de 1,000 a 1,500 ppm para el Banco 4710 y de 1,500 a 2,000 ppm para el Banco 4695) a causa de diorita cortado por el pórfido feldespático que tiene bajos niveles de flúor. En el ítem C se descubrieron niveles diferentes de flúor: el Banco 4725 presentó un valor intermedio de 1,000 ppm; el Banco 4635 presentó valores intermedios-altos entre 1,500 y 2,500 ppm por la presencia de fuerte flogopita (micas); los Bancos 4590 y 4575 presentaron valores altos de 2,500 ppm por la presencia de micas.

La Figura 43 muestra: En el ítem A, la zona norte a sur registró valores muy bajos de magnesio por ser una zona de intrusivos. Por otro lado, el ítem B y la zona nor-este del ítem A presentaron valores altos de 5 – 10% de magnesio

porque allí se encontró talco, micas y minerales magnesianos. En el ítem C se encontraron niveles parcialmente similares de magnesio: solamente el Banco 4725 presentó valores muy bajos por encontrarse en una zona de intrusivos, entretanto, el resto de Bancos registraron la presencia de 10% de minerales magnesianos como micas, biotitas talco.

En la zona minada también se reconoció la presencia de talco; sin embargo, sus niveles fueron bajos (entre 0 – 5%), con algunas excepciones en los que se identificó la presencia de hasta valores superiores a 10% (ver Figura 44).



Mapa del minado de febrero 2019
Banco 4725 (I) – 4635 (II) – 4590 (III) – 4575 (IV)

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

DIRECCIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

Mapa de presencia de talco (%)

Elaborado por: Ronald Flores Barrón

Figura 44. **Mapa de presencia de Talco %.** Fuente: Modificado de Minera Chinalco Perú (2019)

En el Cuadro 7 se presenta un resumen sobre la concentración de minerales hallados durante el minado del año 2016. En promedio, el Plan de Minado de Alto Talco envió 72,300 toneladas con una ley de Cu 0.58, el AsCon fue 1.53,

el consumo de cal fue de 5.28 kg/ton y presentó una dureza de 2.84. Asimismo, el Plan de Minado de Talco Stock-pile envió 40,000 toneladas con una ley de Cu 0.28, el AsCon fue 1.25, el consumo de cal fue de 6.50 kg/ton y presentó una dureza de 3.28. En síntesis, se identificaron altos valores de talco depositados en stock y, a la vez, remanipulados por contener altos leyes de cobre promedio (0.70%). Los minerales insolubles presentaron valores altos de flúor en promedio (1,532 ppm) y de talco (21%). Estos causaron problemas espumándose en casi la totalidad de los espesadores trayendo problemas en la recuperación muy bajas, por no contar con una planta de preflotación de cobre donde se deprime el talco y flota el cobre

Cuadro 7. **Presencia de cobre, minerales contaminantes y perfil litológico**

Plan de minado	Equipo de carguío	Polígonos	Ton	Cu			AsCon			Flúor	Mg	Cal	Dureza			Rec	Litología						Alteración
				Min	Max	Promedio	Min	Max	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Min	Max	Promedio	Promedio	Intrusivo	Sk - Serp Talco	Sk - Serp Mt P	Skarn - Act	Hornfels	Brecha	
Alto talco	P01	4695-01093	17,300	0.5	0.75	0.56	1.22	6.5	3.00	1,200	3.5	4.6	2	3	2.9	81	50%			50%			Fílica, Tremolita
	P02	Stock Este	35,000	0.44	0.65	0.52	0.88	1.35	1.04	1,600	3.2	5.5	3	3	3	78	90%			10%			Potásica-Fílica tremolita
	P02	Stock Talco	15,000			0.7			1.06	2,500	4.5	7			2.5	74		100%					Serpentina Talco
	LT01	Stock Baden M6	5,000			0.65			2.24	2,000	3.5	6.5			2.7	80	80%					20%	Fílica
	Ton Total		**72,300**	**Ley Cu**		**0.58**			**1.53**	**1,532**	**2.98**	**5.28**	**Dureza**		**2.84**	**78.03**	**61%**	**21%**	**0%**	**17%**	**0%**	**1%**	
Talco stock-pile	Stock Pile	Stock Pile	40,000			0.3			1.25	2,397	5.90	6.5			3.3	80	50%	10%	10%		30%		Potásico, Diópsido, Serpentina-Talco
	Ton Total		**40,000**	**Ley Cu**		**0.28**			**1.25**	**2,397**	**5.90**	**6.50**	**Dureza**		**3.28**	**80.00**	**50%**	**10%**	**10%**	**0%**	**30%**	**0%**	

Fuente: Elaboración propia con base en el Plan de minado de Minera Chinalco Perú (2017)

Hasta este punto, se comprobó la presencia de minerales contaminantes en distintas partes de las zonas minadas de Toromocho, por ello, se deben establecer los valores máximos recomendables de dichos minerales para comenzar con el minado.

Cuadro 8. **Valores máximos recomendados para controlar el abastecimiento de mineral**

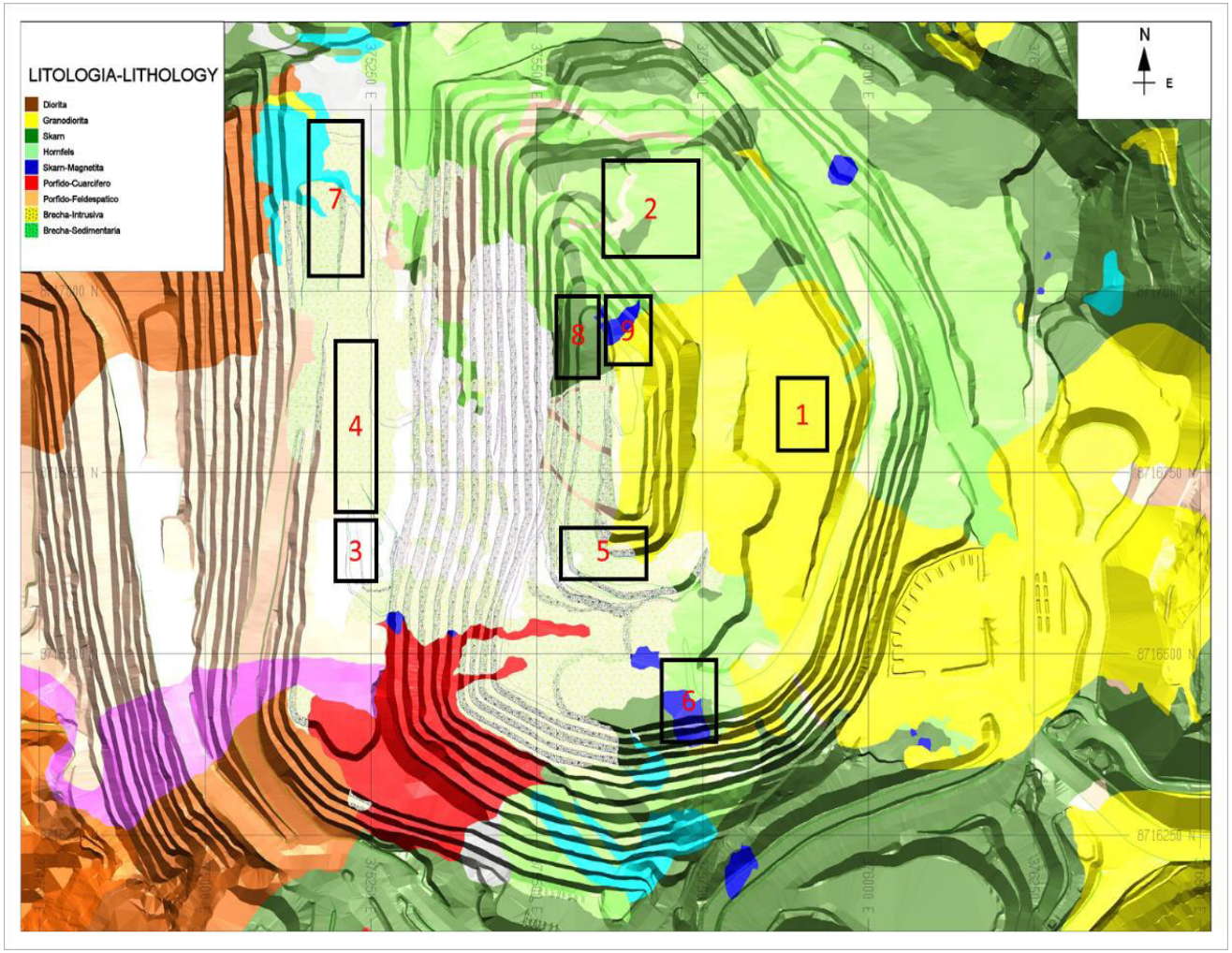
Ítem	Valor máximo
Flúor	≤ 1,000 ppm
Magnesio	≤ 2%
Arsénico	≤ 0.5%
Zinc	≤ 3%
Talco	≤ 6%
Óxido de cobre	≤ 16%
Skarn Serpentina-Magnetita	≤ 30%
Hornfels	≤ 30%
Skarn Actinolita-tremolita	≤ 40%
As en cabeza	≤ 0.035%

Fuente: Modificado de Minera Chinalco Perú (2019)

4.2.3.2. Evaluación metalúrgica de cobre secuencial

Con ayuda del equipo de análisis DRX es posible la lectura de hasta 90 muestras diarias de pulpas de mineral extraídas de los Blast Hole con el propósito de identificar el contenido mineral de la roca y, en consecuencia, los minerales insolubles (talco, flúor, magnesio, etc.). La información resultante se correlacionaría con los mapeos en campo, lo que permitiría la realización de un zonamiento general de los tipos de rocas que hubo en la mina (entre intrusivas y sedimentarias).

Se extrajeron 09 muestras que correspondieron a zonas con distintos tipos de litología y alteración (ver **Error! Reference source not found.**), las cuales presentaron una ley alta de Cu (>0.6%) y Cu disuelto en ácido sulfúrico analizado en mina (>10%). Dichas muestras fueron sometidas a las pruebas Difracción de Rayos X (DRX) y Tescan Integrated Mineral Analyzer (TIMA-X).



LEYENDA	
Cód	**Descripción**
1	Granodiorita F2
2	Serpentina F2-NE
3	Brecha ígnea F3-S
4	Brecha sedimentaria F3-S
5	Brecha sedimentaria F2
6	Magnetita F2-SE
7	Brecha sedimentaria F3-N
8	Serpentina F2-RMP
9	Magnetita F2-RMP

Figura 45. **Plano Geológico de ubicación de las Muestras Extraídas**. Fuente: Modificado de Minera Chinalco Perú (2019)

En el Anexo 2 se encuentran los resultados del análisis DRX de las nueve muestras extraídas. En este se detectó que los minerales con mayor predominancia en el tajo fueron el Cuarzo, Ortoclasa, Actinolita-Tremolita, Antigorita-Lizardita, Pirita, Magnetita, Flogopita, Muscovita, Clinocloro, Talco y Diópsido.

El TIMA-X es uno de los sistemas de mineralogía automatizados, el cual proporciona un análisis cuantitativo de muestras de minerales, concentrados, rocas, relaves, etc. y va enfocado a la búsqueda de minerales de interés. Este analizador utiliza la energía de dispersión de rayos X (EDX) y de electrones retrodispersados (BSE) para identificar minerales y compararlos con las entradas en una biblioteca de minerales. Puntualmente, los resultados se encuentran en el Anexo 3, en donde se detallan los sulfuros, óxidos, carbonatos y silicatos hallados en las diferentes zonas muestreadas de mina. Los formadores de roca fueron el cuarzo, plagioclasas, etc. y las alteraciones fueron anfíboles, biotita, feldespatos potásicos, piroxenos, cloritas, muscovitas, epidotas y pocos granates.

El análisis TIMA-X permitió caracterizar el porcentaje de óxidos de cobre y otros minerales (entre estos, los contaminantes) para las nueve muestras. Las zonas de mineralización del cobre se determinan mediante el análisis de cobre secuencial, en el que una porción de muestra es disuelta, en primer lugar, en el ácido sulfúrico (el cual teóricamente disuelve los elementos mineralógicos de Cu de la zona de óxidos). Luego, lo restante en Cianuro de Sodio (el cual teóricamente disuelve los elementos mineralógicos de la zona de Enriquecimiento Secundario) y, por último, se tiene el Cu residual (compuesto por los sulfuros primarios). A continuación, se presentan los resultados.

Cuadro 9. **Resultados de Análisis Químico de Cu Secuencial y Cu soluble en ácido cítrico.**

Nombre	Código	Cu (%)	Ag (g/t)	As (%)	Fe (%)	Mo (%)	Zn (%)	Mg (%)	F (ppm)
GND F2	TIMA01	0.72	5.4	0.017	5.3	0.0135	0.069	4.29	6020
SERP F2-NE	TIMA02	0.89	3.7	0.017	16.1	0.01	0.063	15.12	6760
BXI F3-S	TIMA03	0.97	11.7	0.108	13.8	0.0207	0.125	2.19	5180
BXSED F3-S	TIMA04	1.11	15.7	0.037	26.1	0.0111	0.43	5.52	4710
BXSED F2	TIMA05	1.03	3.1	0.008	9.1	0.0172	0.031	11.85	7940
MGT F2-SE	TIMA06	0.97	6.2	0.003	26.6	0.0015	0.056	19.15	5470
BXSED F3-N	TIMA07	0.96	9.7	0.011	12	0.0008	0.662	9.43	2810
SERP F2-MP	TIMA08	1.35	4.4	0.013	29.3	0.0136	0.055	13.58	7510
MGT F2-RMP	TIMA09	1.40	5	0.015	38.4	0.0153	0.055	8.54	5780
SERP MAGT F4	TIMA10	0.97	7	0.015	19.6	0.0019	0.57	13.6	5410

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 46 se observa una diferencia absoluta entre Cu Secuencial y Cu Soluble en Ácido Sulfúrico, el cual es en promedio 3.5%. Por ello, se asume que los óxidos proporcionan un gran aporte de cobre.

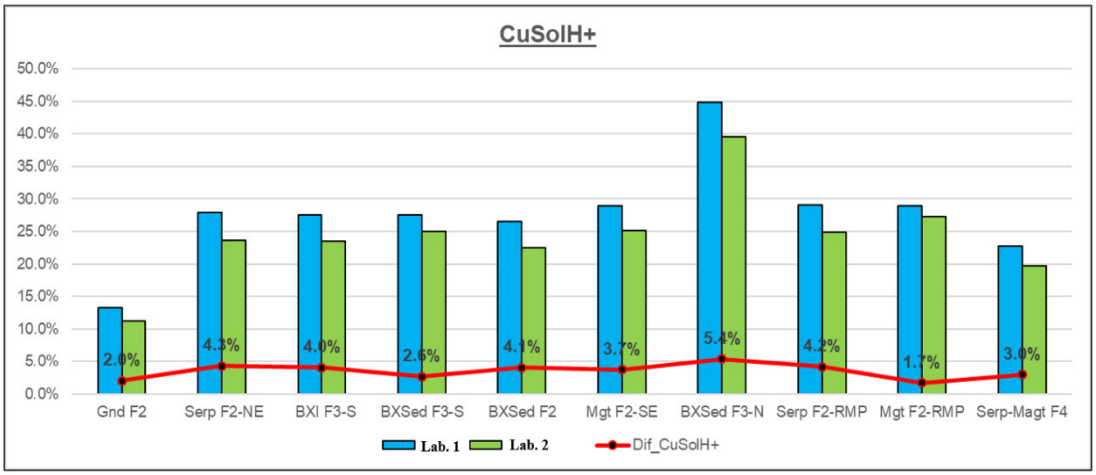


Figura 46. **Comparación Cu Secuencial - Cu Soluble en Ácido Sulfúrico (CuSolH+).** Fuente: Elaboración propia

En la Figura 47 se observa una diferencia absoluta en promedio de 1.6% entre Cu Secuencial y Cu Soluble en Cianuro.

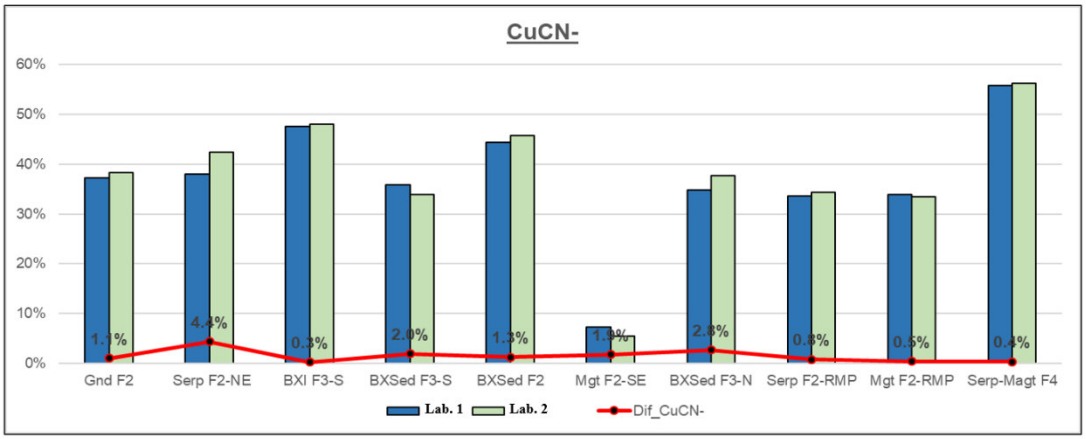


Figura 47. **Comparación Cu Secuencial - Cu Soluble en Cianuro (CuCN).** Fuente: Elaboración propia

En la Figura 48 se observa una diferencia absoluta en promedio de 3.1% entre Cu Secuencial y Cu Residual.

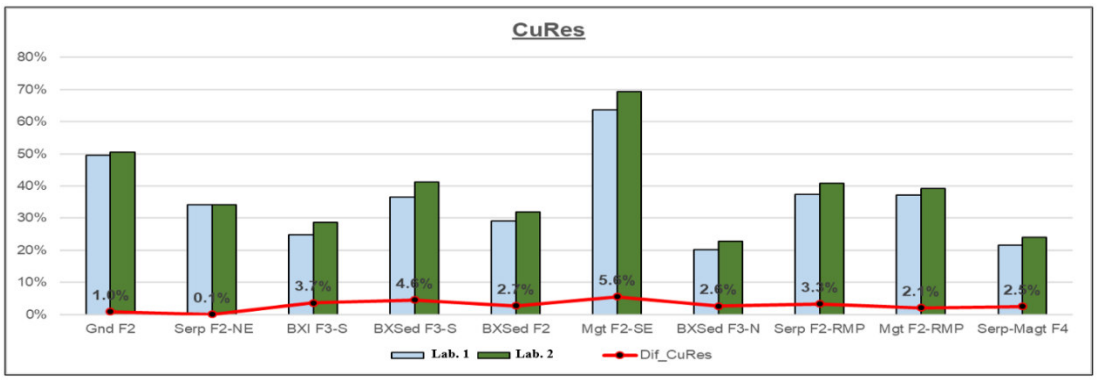


Figura 48. **Comparación Cu Secuencial - Cu Residual (CuRes).** Fuente: Elaboración propia

En la Figura 49 se observa los resultados promediados de todas las muestras. El CuSolH+ es 24.1% y de CuS cítrico es de 12.4%. Los resultados de CuScítrico (Laboratorio 1) representan en promedio el 52.3% del total de CuSolH+ (Laboratorio 1).

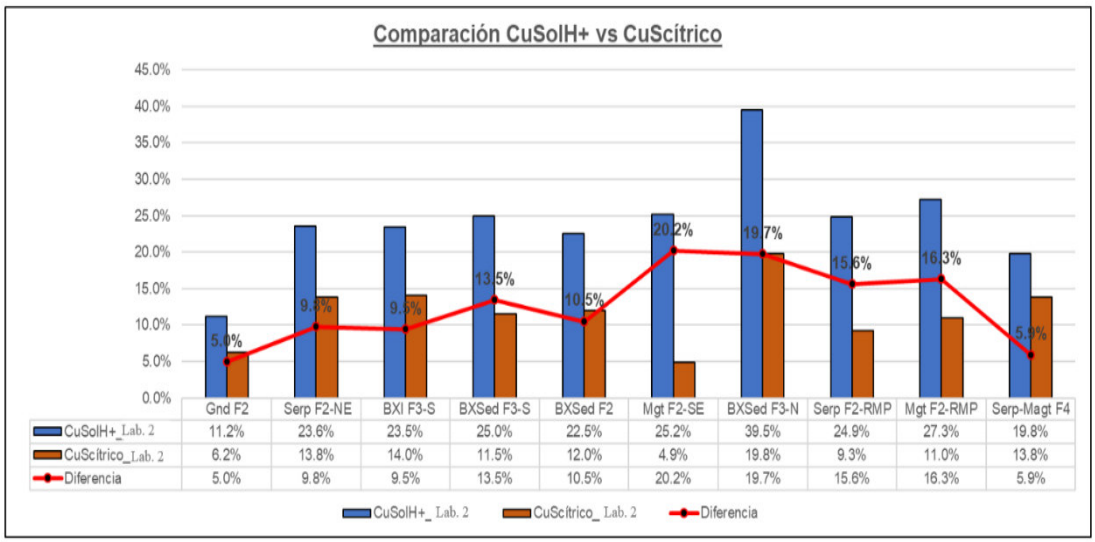


Figura 49. **Comparación CuSolH + (Laboratorio1) vs. CuS cítrico (Cu soluble en Ácido Cítrico -Laboratorio 1).** Fuente: Elaboración propia

En la Figura 50 se observa los resultados promediados de todas las muestras. El CuSolH+ es de 27.6% y el CuScítrico es de 12.4%. Los resultados de CuScítrico (Laboratorio 2) representan en promedio el 45.4% del total de CuSolH+ (Laboratorio 1).

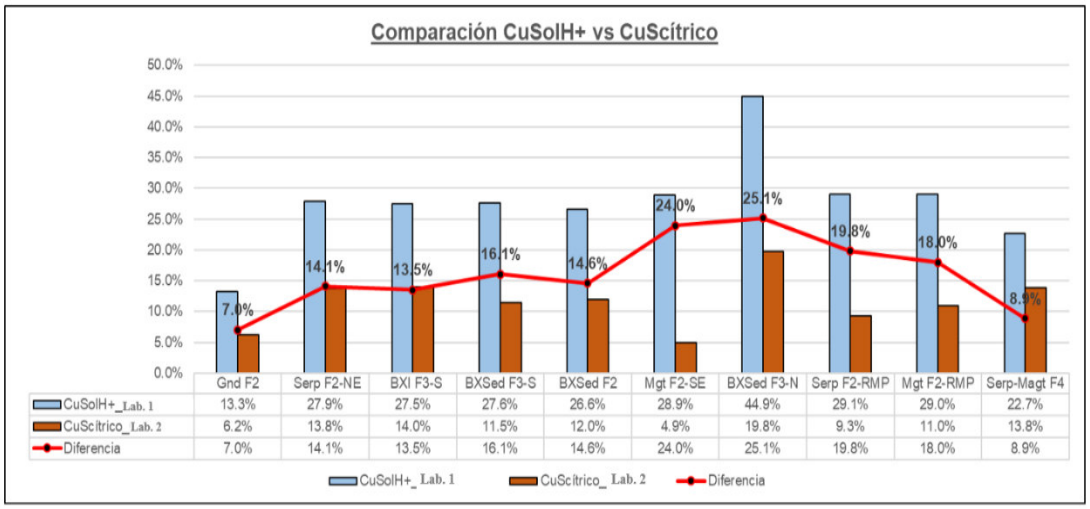


Figura 50. **Comparación CuSolH+ (Laboratorio 1) vs. CuS cítrico (Laboratorio 2).** Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de cobre disuelto para cada muestra y su respectiva mineralogía se detalla a continuación:

Cuadro 10. **Porcentaje de Cu Disueltos**

	CU – SS				CU - CN				CU - RESIDUAL			
	Óxidos	Calcocita (cc), Covelita (cv)	Bornita (bn)	Calcopirita (cpy)	Óxidos	Calcocita (cc), Covelita (cv)	Bornita (bn)	Calcopirita (cpy)	Óxidos	Calcocita (cc), Covelita (cv)	Bornita (bn)	Calcopirita (cpy)
Gnd F2	64%				36%	97%			3%	100%	100%	100%
Serp F2-NE	100%	2%				98%	24%			76%	100%	100%
BXI F3-S	100%	20%				80%	73%			27%	100%	100%
BXSed F3-S	100%	13%				87%	41%			59%	100%	100%
BXSed F2	100%	12%				88%	10%			90%	100%	
Mgt F2-SE	100%	100%	100%	28%				8%			65%	
BXSed F3-N	100%	31%				69%	50%			50%	100%	100%
Serp F2-RMP	100%	26%				74%	73%			27%	100%	100%
Mgt F2-RMP	100%	21%				79%	60%			40%	100%	100%
Serp-Magt F4	72%				28%	100%	89%			11%	100%	100%

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 11. **Mineralogía de Cobre**

	MINERALOGÍA DE COBRE							CU SECUENCIAL		
	ÓXIDOS		SECUNDARIOS		PRIMARIOS					
Muestra	Malaquita / Azurita	Brocantita	Calcocita (cc)	Covelita (cv)	Bornita (bn)	Enargita(en) / Tenantita	Calcopirita (cpy)	Cu_SS	Cu_CN	Cu_R
Gnd F2	0.0%	20.7%	30.5%	0.3%	27.9%	1.1%	19.5%	13.3%	37.2%	49.5%
Serp F2-NE	0.1%	27.1%	35.4%	0.1%	12.7%	0.9%	23.7%	27.9%	38.0%	34.2%
BXI F3-S	0.0%	22.0%	27.5%	0.1%	34.7%	7.4%	8.3%	27.5%	47.6%	24.9%
BXSed F3-S	0.1%	23.6%	31.2%	0.0%	20.5%	2.3%	22.2%	27.6%	35.8%	36.6%
BXSed F2	0.1%	20.7%	48.6%	0.3%	11.7%	0.0%	18.6%	26.6%	44.3%	29.1%
Mgt F2-SE	0.0%	0.6%	0.9%	0.0%	0.4%	0.0%	98.1%	28.9%	7.4%	63.7%
BXSed F3-N	1.4%	30.5%	41.5%	0.1%	12.5%	0.7%	13.3%	44.9%	34.9%	20.2%
Serp F2-RMP	0.0%	20.9%	31.5%	0.2%	13.8%	0.1%	33.5%	29.1%	33.6%	37.4%
Mgt F2-RMP	0.0%	22.6%	30.4%	0.2%	16.1%	0.1%	30.5%	29.0%	33.9%	37.1%
Serp-Magt F4	0.2%	31.5%	18.2%	4.1%	27.6%	2.7%	15.7%	22.7%	55.7%	21.6%

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al Cuadro 10 y al Cuadro 11, el ácido sulfúrico disuelve el 100% de los óxidos de Cu más el 20% del cobre secundario (cc, cv) aproximadamente. El cianuro disuelve aproximadamente el 86% de Cu

secundario y el 50% de la bornita secundaria. Como Cu Residual se tiene el 100% de la calcopirita, enargita y el 50% de la bornita primaria aproximadamente. La muestra Mgt F2-SE se encuentra en observación, porque en la muestra el 98% del aporte de Cu proviene de la calcopirita. No obstante, una gran parte de la calcopirita se está disolviendo con el ácido sulfúrico. Asimismo, las muestras Gnd F2 y Serp-Magt F4, pues todo el óxido de Cu no se está disolviendo completamente en el ácido sulfúrico.

Las zonas de mineralización de Cu en Toromocho son los siguientes:

- Óxidos: malaquita/azurita, brocantita y otros óxidos de Cu.
- Enriquecimiento secundario: calcocita, covelita, bornita secundaria.
- Sulfuros primarios: calcopirita, enargita/ tetraedrita y bornita primaria.

El ácido cítrico disuelve 100% de óxidos (brochantita, malaquita/azurita) a diferencia del ácido sulfúrico que disuelve el 100% de los óxidos más el 20% de Cu secundario (calcocita y covelita) aproximadamente. Los resultados Cu disuelto en ácido cítrico representan el 52.3% de la disolución de Cu en ácido sulfúrico según el laboratorio externo N°2 y 45.4% según laboratorio externo N°1. El ácido sulfúrico, al disolver 20% más de Cu secundarios, se está añadiendo el 10% aproximadamente de ley de Cu a los óxidos del Cu total. En el cobre total, el aporte de Cu según las zonas de mineralización son los aproximadamente los siguientes: 32% la ley de Cu proviene de los óxidos (22% netamente de óxidos y 10% de Cu secundarios) por disolución en ácido sulfúrico, 46% de Cu secundarios (por disolución en cianuro) y 22% de Cu primarios. El cianuro disuelve el 86% de los cobres secundarios y 50% de la bornita aproximadamente. Como Cu residual se tiene el 100% de calcopirita y enargita y el 50% de la bornita.

La calcocita y bornita tienen una correlación inversa, pues a medida que la calcocita aumenta la bornita disminuye y viceversa. Las zonas con más calcocita se encuentran en la brecha sedimentaria de la fase 2 y fase 3, luego en el *skarn* de serpentina-Magnetita de la fase 2, parte norte, asimismo en la granodiorita y en porcentaje menores en la brecha intrusiva y skarn de serpentina-magnetita de la fase 4. Las zonas con más bornita se encuentran en la brecha intrusiva, la granodiorita, en el *skarn* de serpentina-magnetita de

la fase 4 y en menores porcentajes en el *skarn* de serpentina de la fase 2 y las brechas sedimentarias de la fase 2 y 3. La bornita secundaria predomina más en la brecha intrusiva de la fase 3 y el *skarn* de serpentina magnetita de la fase 4, luego en el skarn de serpentina-magnetita de la fase 2. La bornita primaria predomina más en la granodiorita y en la brecha sedimentaria de la fase 2. Las zonas con más contenido de calcopirita se encuentran el *skarn* de serpentina- magnetita de la fase 2, seguido de la granodiorita y la brecha sedimentaria de la fase 2, en la fase 3 y la fase 4 el contenido de la calcopirita es menor, la calcopirita como cobre primario.

Los elementos mineralógicos más característicos en la mina, según los análisis de DRX y TIMA X, son el cuarzo, plagioclasas, feldespato potásico, actinolita-tremolita, antigorita-lizardita, pirita, magnetita, Moscovita-flogopita, clinocloro, talco y diópsido. Los elementos mineralógicos en menor porcentaje en la mina según los análisis de DRX y TIMA X son la epídota, granate, calcita y dolomita.

La distribución de los minerales de especies valiosas de cobre es graficada a continuación.

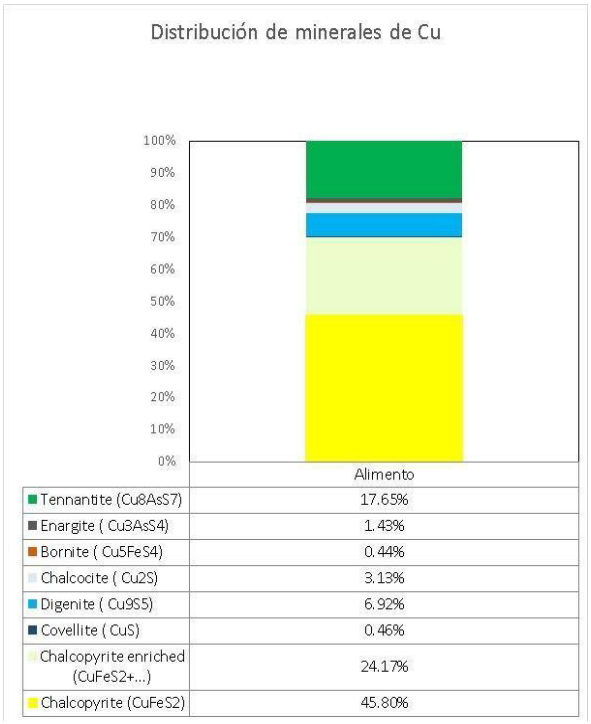
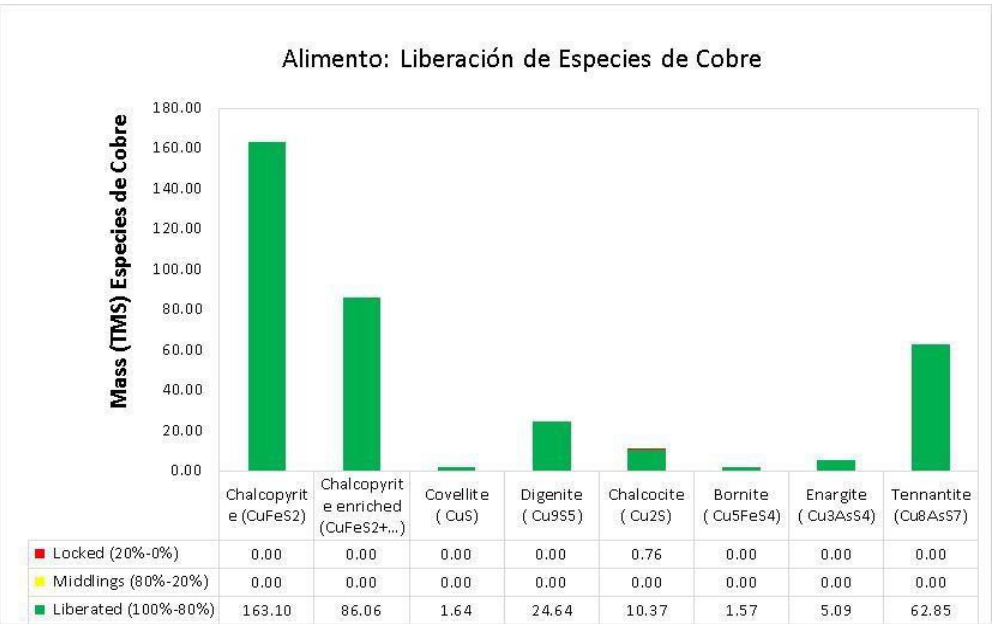


Figura 51. **Distribución Minerales de Cobre.** Fuente: Elaboración propia

En la Figura 51 se muestra que, de las 356.08 toneladas de cobre alimentadas a la planta, 62.85 toneladas están como cobre gris conformando un 17.65%; 249.16 toneladas de calcopirita y calcopirita enriquecida muy fáciles de recuperar; 39.98 toneladas como cobres secundarios sobre todo digenita; 5.09 toneladas de enargita (cobre-arsénico). Es importante mencionar que el mineral contiene un gran porcentaje de cobres grises (cobre-arsénico y plata) modificando la cinética de flotación.

La liberación de especies de cobre es graficada a continuación.



	Chalcopyrite (CuFeS2)	Chalcopyrite enriched (CuFeS2+...)	Covellite (CuS)	Digenite (Cu9S5)	Chalcocite (Cu2S)	Bornite (Cu5FeS4)	Enargite (Cu3AsS4)	Tennantite (Cu8AsS7)
Locked (20%-0%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.76	0.00	0.00	0.00
Middlings (80%-20%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Liberated (100%-80%)	163.10	86.06	1.64	24.64	10.37	1.57	5.09	62.85

Figura 52. **Liberación Especies de Cobre.** Fuente: Elaboración propia

Los grados de liberación del mineral que ingresa a planta tiene un G.L.>95. Como se observa en la Figura 52 casi el 100% de las partículas valiosas están libres, no tienen ningún tipo de entrelazamiento con ganga ni con los demás contaminantes.

En el reporte de parámetros geometalúrgicos, se está incluyendo un formato para concluir mejor respecto de las especies mineralógicas.

Cuadro 12. **Especies de Cobre Según Polígonos de Mineral**

n°	Código de Mineral	Especies de cobre (% peso)							
		Calcopirita (cp)	Calcopirita enriquecida (cps)	Covelita (cv)	Digenita (dg)	Calcocita (cc)	Bornita (bn)	Enargita (en)	Cobre gris (CuGRs)
1	4635-01005-01	29.13%	54.25%	1.39%	3.05%	0.64%	0.71%	0.00%	10.83%
2	4635-01005-02	31.90%	42.45%	1.04%	11.63%	1.55%	0.29%	0.99%	10.14%
3	4635-01005-03	30.99%	48.34%	1.33%	10.83%	0.35%	0.00%	0.00%	8.15%
4	4635-01005-04	29.00%	49.67%	0.19%	8.01%	3.41%	0.00%	0.00%	9.72%
5	4635-01017-01	55.88%	24.55%	2.02%	1.25%	0.73%	0.00%	0.00%	15.26%
6	4635-01017-02	41.64%	22.69%	0.27%	1.04%	6.19%	0.00%	0.00%	28.17%

Fuente: Elaboración propia

En el Cuadro 12 se muestra que los parámetros geometalúrgicos tiene dos clases de calcopirita una es calcopirita primaria y la otra es calcopirita secundaria. La concentración de ambas calcopiritas es alta en su mayoría; por otra parte, la concentración de sulfuros (como covelita, digenita, calcocita y bornita), sulfosales de cobre y cobres grises es menor.

Las especies de esfalerita identificadas fueron esfaleritas limpias y esfaleritas con inclusiones de calcopiritas y cobres grises (ver Figura 53). Estos afectaron el tratamiento metalúrgico que, como se determinó anteriormente, son penalizables si sobrepasan el límite de 3% de zinc.

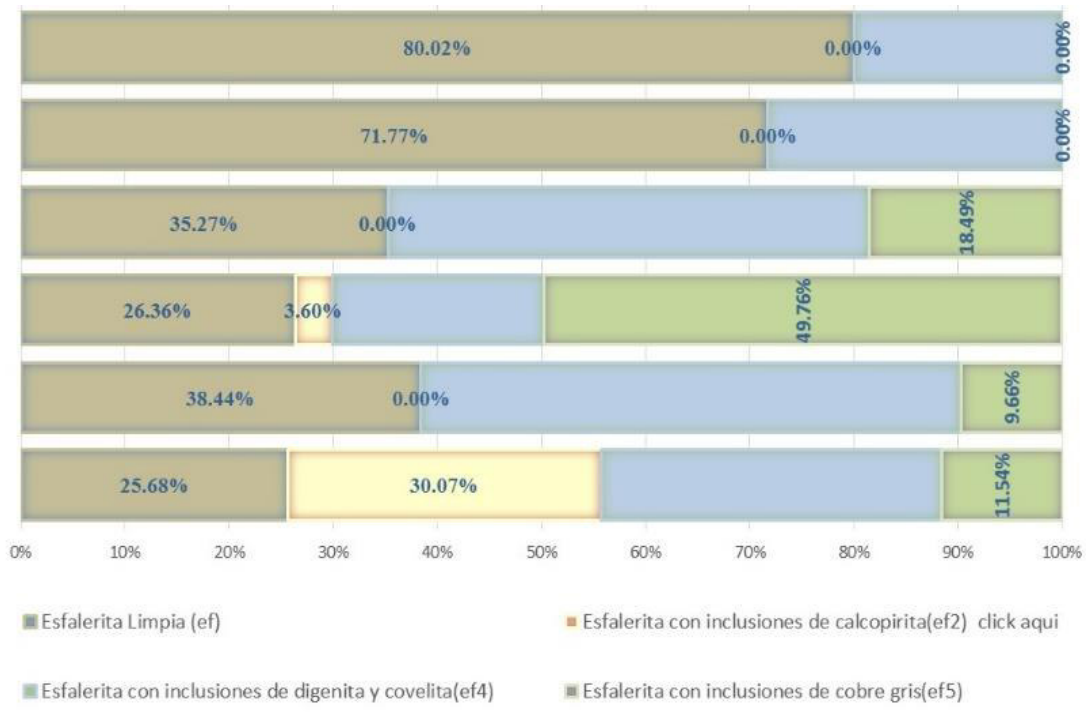


Figura 53. **Especies de Zinc.** Fuente: Basado en Canepa (1989)

Una descripción cualitativa en el microscopio de la muestra concentrada de zinc indica lo siguiente: Importante presencia de esfalerita del tipo marmatita y menor presencia de la especie de esfalerita 2, (ef. 2) que son esfaleritas con inclusiones finas de calcopirita y hierro , se aprecia cantidades menores y libres de cobre como calcopirita y hierro como pirita y pirrotita. Los insolubles o gangas son de una especie de menor presencia y están amarradas especialmente con esfalerita además se observa galena. También se aprecia algunos granos de esfalerita tipo 3 que son inclusiones de pirrotita en esfalerita.

Que la mayor cantidad de especies mena de zinc esfalerita (ef) + esfalerita 2 + esfalerita 3 (ef2+ef3) presentes en el concentrado de zinc están severamente libres, igualmente se encuentra libre de calcopirita.

Las gangas no quedan liberadas en tramos menores como una secuencia lógica, sino que el concentrado de zinc se observa las gangas tiene una presencia especial porque en todas las fracciones de tamaño tiene poca liberación.

La mena de zinc por esfalerita (ef) esfalerita 2 (ef2) y esfalerita 3 (ef3) representan un total del 91.9 % en pesos, la relación de esfaleritas contaminadas por calcopirita y pirrotita a esfalerita limpia es de 4.3%, entonces no sería una causa definitiva de contaminación de concentrado de zinc en la flotación porque el límite sea al 20% puede tener serios problemas de selectividad en flotación.

Las esfaleritas tipo 2 y 3 son difíciles de liberar por remolienda solo representa 4.1%del total de esfalerita del concentrado. (Manzaneda 2010)

4.2.4. Optimización del tratamiento metalúrgico del yacimiento Toromocho

Las pruebas metalúrgicas realizadas en el yacimiento Toromocho se han desarrollado desde 1970. Una de estas es conocida como flotación más áspera, la cual fue útil para evaluar los minerales insolubles. En primer lugar, se evaluaron siete compuestos de tipo roca y sus respectivos subcompuestos, los cuales son descritos en el Cuadro 13. También se colocó una identificación que refiere a los compuestos a lo largo del informe.

Cuadro 13. **Compuestos de los tipos de roca**

Identificación de compuesto de tipo de roca	Descripción del compuesto	ID y (Número de subcompuestos)
IB+20	Intrusive, Breccia (Soluble Copper > 20%)	1,2,3 → (3)
I+20	Intrusive, No Breccia (Soluble Copper > 20%)	1,2,3,4,5,6,7 → (7)
I-20	Intrusive, No Breccia (Soluble Copper < 20%)	1,3,4,5,7,8,9,10,11,12 → (10)
SB+20	Skarn, Breccia (Soluble Copper > 20%)	1,2,3,4,5,6 → (6)
SB-20	Skarn, Breccia (Soluble Copper < 20%)	1,2,3,4 → (4)
S+20	Skarn, No Breccia (Soluble Copper > 20%)	1,2,3,4,5,6 → (6)
S-20	Skarn, No Breccia (Soluble Copper < 20%)	1,2,3,4,5,6,7 → (7)

Fuente: Elaboración propia

Los intervalos utilizados en cada compuesto fueron especificados por Consultores Independientes de Minería (IMC). Se realizó una prueba de flotación más rugosa insoluble a pH 10.5 en cada compuesto sin colectores de sulfuro y se desarrolló una indicación de la mineralogía mediante análisis de Difracción de Rayos X (DRX). El concentrado de talco más áspero se

analizó en un intento de identificar los minerales que se reportaban al concentrado.

El resumen de los resultados para cada uno de los siete compuestos tipo roca de la prueba de flotación se muestra a continuación:

Cuadro 14. **Resultados de flotación más áspera de talco**

Composite	Calculated Head			Insoluble Concentrate						
	Assay (%)			Assay (%)				Recovery (%)		
	Cu	Ag (g/t)	Mo	Cu	Ag (g/t)	Mo	Insol.	Cu	Ag	Mo
IB+20	0.66	5.40	0.016	8.80	46	0.820	52.3	14.18	8.96	55.62
I+20	0.66	11.01	0.015	9.50	139	0.246	55.5	22.19	19.42	25.87
SB+20	0.59	6.76	0.010	5.00	53	0.138	67.8	31.04	28.61	51.06
S+20	0.69	10.30	0.010	0.68	7	0.021	79.8	5.48	3.77	12.07
I-20	0.63	8.36	0.041	8.35	70	0.248	57.9	68.26	43.09	30.89
SB-20	0.61	9.30	0.027	7.55	75	0.285	53.2	67.57	44.14	57.92
S-20	0.59	9.85	0.015	0.43	8.5	0.014	78.2	7.82	9.28	10.09

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al Cuadro 14, las rocas tipo skarn no brechado mayor y menor al 20% del cobre soluble (S+20 y S-20) lograron la mejor respuesta en este tratamiento. El resto de compuestos obtuvo un resultado negativo ya que las pérdidas de sulfuro fueron significativas. El análisis DRX mostró diferencias entre los componentes insolubles más abundantes en los compuestos skarn no brechado y los otros compuestos tipo roca.

La diferencia promedio de las especies insolubles se describe a continuación.

Cuadro 15. **Minerales en talco en el concentrado**

Minerals	S+20 y S- 20	Otros componentes de tipo de roca
Talco	33.65	11.46
Chlorite	10.70	3.22
Hornblende	14.35	6.98
Phlogopite	17.95	21.04
Quartz	7.80	15.06
Lizardite	3.65	0.34

Fuente: Elaboración propia

Según el Cuadro 15, los compuestos de skarn tuvieron el contenido más alto de talco en el concentrado con 33.65%; mientras que los otros tipos de rocas contuvieron aproximadamente un 11.46% de talco.

4.2.4.1. Recuperación de sulfuro del concentrado de talco y colas de talco

Como parte de la optimización del tratamiento metalúrgico, se efectuaron pruebas de pre-flotación de talco y recuperación de sulfuros en todos los compuestos tipo roca skarn, tanto en los concentrados como en los relaves. Este procedimiento cumple con los siguientes pasos: eliminar el talco naturalmente antes de que los sulfuros floten, deprimir los sulfuros presentes en el concentrado de talco, reactivar y hacer flotar nuevamente los sulfuros para reciclarlos, separándolos del talco y el producto circuito limpiador. Para ello, se empleó bisulfato de sodio como depresor de sulfuro y ácido sulfúrico como modificador de pH en el circuito de talco; los sulfuros se hicieron flotar usando amil xantato de potasio (PAX) como colector. Dado que el primer concentrado limpiador eliminador de talco se recicló y no se cuantificó, se desconoce la cantidad total de sulfuros recuperados y/o reciclados

Durante el periodo del estudio de factibilidad se plantearon 7 Unidades Geo Metalúrgicas (UGM) básicamente clasificados por el tipo de roca (ver Cuadro

16). En dicho momento, no se detectó que el talco sería el principal problema en el concentrado final.

Cuadro 16. **Clasificación de UGM**

UGM	Litología	Grado de Solubilidad	Alteración
I + 20	Intrusivos	>20%	Potásica, Clorita
IB + 20	Intrusivos	> 20%	Fílica, Argílica, Endoskarn
S + 20	Skarn + Sedimentarios	>20%	Serpentina, Diopsido
SB + 20	Skarn + Sedimentarios	>20%	Actinolita – Tremolita
S – 20	Skarn + Sedimentarios	<20%	Serpentina, Diopsido
SB -20	Skarn + Sedimentarios	<20%	Actinolita – Tremolita
1 - 20	Intrusivos	<20%	All

Fuente: Elaboración propia

El grado de Concentrado que produjo la empresa Minera Chinalco Perú se vio afectado por el incremento del contenido de Talco y la presencia de contaminantes como el flúor, magnesio y zinc. En el Cuadro 17 se presentan los tipos de mineral clasificados según alteración con el contenido de talco, previamente analizado con DRX. A partir de ello, se aprecia que la alteración serpentina-talco tiene más alto contenido de talco.

Cuadro 17. **Cuadro de minerales y alteraciones con Contenido de Talco**

Minerales Ganga NF	Intrusivo Potásico y Fílico	Rango Intrusivo Brechado (%)	Hornfels Diópsido clorita (%)	Rango Skarn Serp – Mag (%)	Skarn Serp – talco (%)	Rango skarn Act – Trem (%)
Flogopita	0 - 6	14 - 17	12	9 - 15	13	17 – 18
Talco		3	2	2 - 6	17	3 - 4
Lizardita (serpentina)				2 - 6	8	

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se observa el análisis mineralógico de cada etapa de flotación de la planta de procesos.

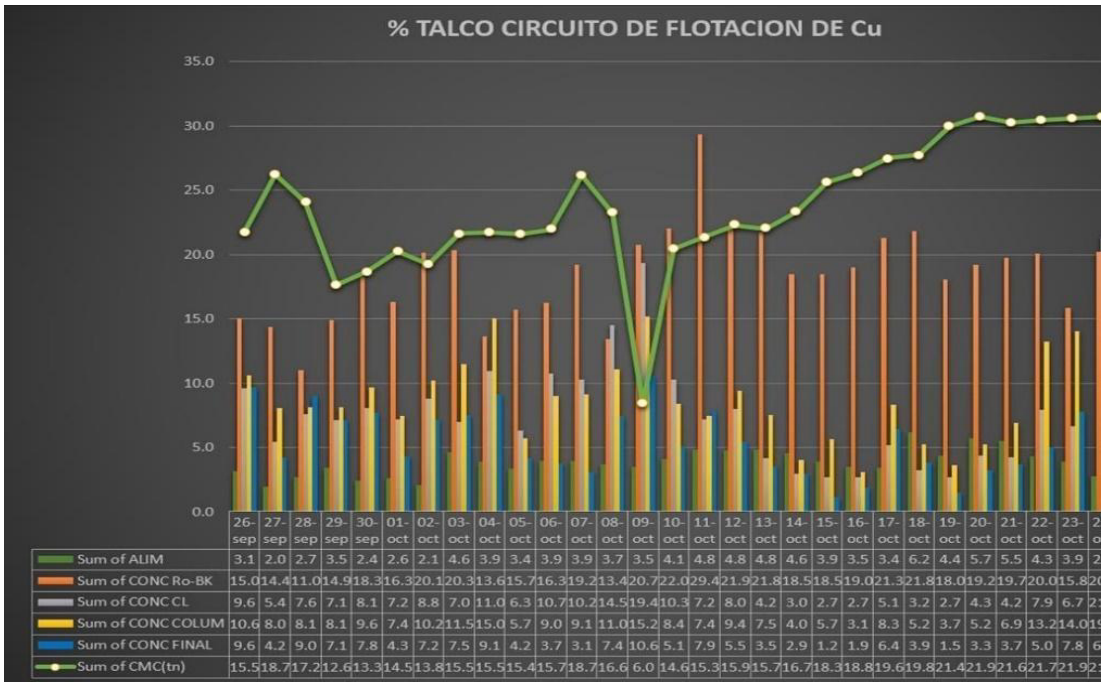
Cuadro 18. **Resultados de DRX en el Concentrado Bulk y Concentrado Final**

	Com. Alim. Ro-Bk	Comp. Conc. Ro-Bk	Comp. Conc. Cl-Bk	Comp. Conc. Columnas	Comp. Conc. Final	Comp. Alim. Ro-Bk	
						GA	GB
Anfíbol (Actinolita)	19.81	7.59	7.78	3.197	5.545	23.72	16.48
Calcopirita	1.46	19.12	43.42	52.75	51.496	1.43	1.49
Clorita (Clinocloro)	5.31	5.97	2.12	0.734	0.451	6.92	3.93
Covelita			0.26	0.466	0.303		
Cuarzo	18.96	3.59	3.16	1.79	0.821	14.63	22.65
Cuprita	0.00	0.61				0.00	0.00
Digenita	0.00	0.91	3.61	6.327	2.864	0.00	0.00
Enargita			1.91				
Feldespato - K (Ortoclasa)	7.28	0.00				1.41	12.27
Feldespato (Microlina)	3.94	0.00				8.57	0
Magnetitia	2.74	0.00				2.92	2.58
Mica (Biotita)	10.08	5.36	0.84	1.744	2.105	5.71	13.8
Mica (Flogopita)	7.76	8.93	4.37	4.207	1.269	13.91	2.53
Mica (Muscovita)	0.02	0.00				0.00	0.03
Molibdenita	0.00	0.23	0.11	0.164	0.187	0.00	0.00
Pirita	9.13	22.45	24.89	15.575	26.01	9.37	8.93
Plagioclasa (Albita)	0.48	0.00				0.00	0.88
Plagioclasa (Oligoclasa)	7.18	0.00				6.88	7.44
Serpentina (Antigorita)	2.52	6.62	2.08	3.616	3.618	1.17	3.68
Talco	3.33	18.60	4.84	8.979	4.942	3.70	3.30
Tennantita			0.60	0.45	0.297		

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al cuadro 18, en el alimento RoBk se identificó la presencia de un tipo de mineral proveniente del blending, siendo este Skarn de serpentina con intrusivo potásico con contenido de talco. Además, se evidenció que los minerales concentrados (con valor económico) en cada etapa fueron la calcopirita, calcosina, tenantita, digenita; sin embargo, el talco contaminó el concentrado a causa de su flotación natural.

La distribución del talco en cada etapa de la flotación se aprecia en la Figura **54**. En ella, se reconoce la recuperación de talco en la etapa Rough Bulk (*RoBk*), comprobando que sus niveles son superiores en comparación al resto de etapas.



	26-sep	27-sep	28-sep	29-sep	30-sep	01-oct	02-oct	03-oct	04-oct	05-oct	06-oct	07-oct	08-oct	09-oct	10-oct	11-oct	12-oct	13-oct	14-oct	15-oct	16-oct	17-oct	18-oct	19-oct	20-oct	21-oct	22-oct	23-oct	2
Sum of ALIM	3.1	2.0	2.7	3.5	2.4	2.6	2.1	4.6	3.9	3.4	3.9	3.9	3.7	3.5	4.1	4.8	4.8	4.8	4.6	3.9	3.5	3.4	6.2	4.4	5.7	5.5	4.3	3.9	2
Sum of CONC Ro-BK	15.0	14.4	11.0	14.9	18.3	16.3	20.1	20.3	13.6	15.7	16.3	19.2	13.4	20.7	22.0	29.4	21.9	21.8	18.5	18.5	19.0	21.3	21.8	18.0	19.2	19.7	20.0	15.8	2
Sum of CONC CL	9.6	5.4	7.6	7.1	8.1	7.2	8.8	7.0	11.0	6.3	10.7	10.2	14.5	19.4	10.3	7.2	8.0	4.2	3.0	2.7	2.7	5.1	3.2	2.7	4.3	4.2	7.9	6.7	2
Sum of CONC COLUM	10.6	8.0	8.1	8.1	9.6	7.4	10.2	11.5	15.0	5.7	9.0	9.1	11.0	15.2	8.4	7.4	9.4	7.5	4.0	5.7	3.1	8.3	5.2	3.7	5.2	6.9	13.2	14.0	1
Sum of CONC FINAL	9.6	4.2	9.0	7.1	7.8	4.3	7.2	7.5	9.1	4.2	3.7	3.1	7.4	10.6	5.1	7.9	5.5	3.5	2.9	1.2	1.9	6.4	3.9	1.5	3.3	3.7	5.0	7.8	6
Sum of CMC(tn)	15.5	18.7	17.2	12.6	13.3	14.5	13.8	15.5	15.5	15.4	15.7	18.7	16.6	6.0	14.6	15.3	15.9	15.7	16.7	18.3	18.8	19.6	19.8	21.4	21.9	21.6	21.7	21.9	2

Figura 54. **Porcentaje de Talco en el Circuito de Flotación de Cobre.** Fuente: Elaboración propia

Para controlar el porcentaje de talco, se agrega CNC en la etapa Ro Bk del cual el concentrado es el alimento a la etapa cleaner bulk cobre en el cual se encuentran las columnas. Las celdas columnas están diseñadas para limpiar insolubles sin embargo debido al tamaño de grano del talco, muy pequeño, y a su flotabilidad natural es que en las celdas columnas tienden concentrarse no en gran manera como lo es en la etapa Rough Bulk (RoBk). Como última etapa de limpieza, se tiene el circuito de Molibdeno en el cual es circuito de flotación inversa en donde se agrega NaSH para poder limpiar el concentrado final de Cu.

4.2.4.2. Cuadro de Polígonos de Mineral

En la Figura 55, se muestra que los polígonos que contienen talco son los Polígonos 4665-01102, 4665-01141, y el reflejo en los espesadores es muy evidente.

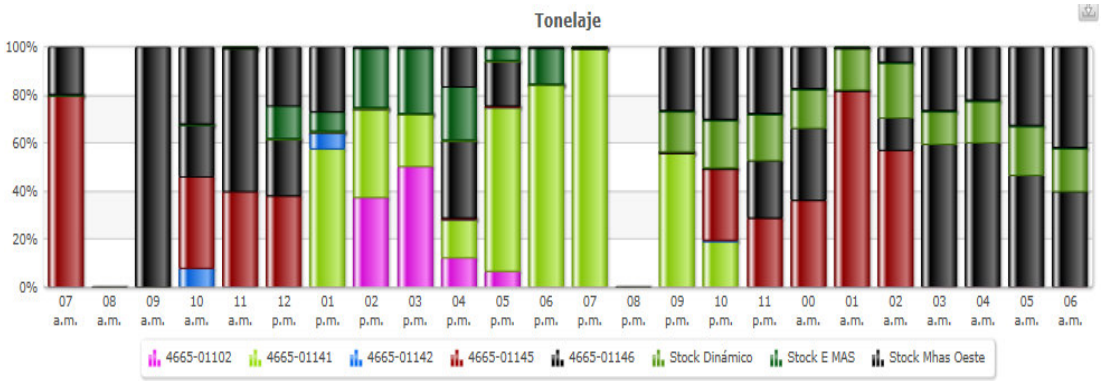


Figura 55. **Talco enviado a planta concentradora**. *Fuente:* Elaboración propia

Los espesadores en el concentrado (*bulk* y cobre) perdieron interface debido al mayor ingreso de mineral serpentina talco con baja velocidad de sedimentación lo que provocó la presencia de sólidos en el overflow del espesador Bulk contaminando el tanque de agua para el proceso.

Figura 56. **Recuperación en espesadores**. *Fuente:* Elaboración propia

En la figura 56 se registró la recuperación en los espesadores: 1) Se halló un bajo nivel recuperación de aguas claras debido a minerales ultrafinos, el uso

de aspersores de agua a presión para poder separar las lamas de mineral de la superficie del espesador. 2) La recuperación de cobre debido al agua contaminada que recircula al proceso de iones pesados los cuales no permiten que haya un buen perfomance de los reactivos de flotación.

Figura 57. **Recuperación en tanque de agua.** Fuente: Elaboración propia

En la Figura 57 se registró la recuperación en el tanque de agua: 1) Se encuentra la fotografía del tanque de agua contaminada con una baja Recuperación de cobre pobre colección de Cu debido a que no hubo buena separación sólido líquido en el espesado ocasionando la obtención de aguas contaminadas el cual afecta a la recuperación de cobre. 2) La baja recuperación de cobre de aguas claras debido a minerales ultra finos.

Figura 58. **Recuperación de cobre.** Fuente: Elaboración propia

En la Figura 58 se observó el bajo concentrado de Cobre, la espuma representó la flotación de todos los minerales insolubles (Talco) provenientes del tajo donde la recuperación fue muy baja que llegó a un aproximado de 60% de Cu.

Otras muestras obtenidas del concentrado con contenidos contaminantes de flúor y talco enviados al laboratorio externo por análisis de DRX tuvieron los siguientes resultados:

Cuadro 19. **Resultados de minerales concentrados en las muestras con DRX**

		Resultado aproximado (%)							
Nombre del mineral	**Fórmula general**	**Muestra Brecha – Actinolita – Tremolita**	**Muestra Skarn – Serpentina – Magnetita**	**Muestra Skarn – Serpentina – Talco**	**Muestra N° 4650-01068 de DRX (de polígono)**	**Muestras de la NATA ESP. BULK**	**Muestra COMP. CONC.CU 24.07.15 DRX**	**Muestra LT1503779.007/ COMP.CONC.CU (B) 23.07.15**	**Concentrados enviados a laboratorio externo**
Antigorita	(Mg, Fe) 3Si2O5(OH)4	-	-	-	28	-	3	-	-
Anfibol (Actinolita)	Ca2(Mg,Fe)5Si8O22(OH)2	34	13	29	-	-	3	4	-
Bornita	Cu5FeS4	-	-	-	-	-	-	-	2
Calcopirita	CuFeS2	-	<L.D.	-	<L.D.	41	15	19	-
Clorita (Clinocloro)	(Mg,Fe)5Al(Si3Al)O10(OH)8	9	14	22	23	2	16	13	-
Covelita	CuS	-	-	-	-	5	-	2	10
Cuarzo	SiO2	16	6	3	<L.D.	2	2	<L.D.	2
Digenita	Cu9S5	-	-	-	-	8	4	8	-
Enargita	Cu3AsS4	-	-	-	-	-	-	-	16
Epidota	Ca2 (Fe, Al) 3(SiO4) 3(OH)	-	6	-	-	-	-	-	-
Esfalerita	(Zn,Fe)S	-	-	-	-	7	2	2	7
Feldespato – K (Ortoclasa)	KAlSi3O8	-	6	-	-	-	-	-	-
Granate (Andradita)	Ca3Fe2(SiO4)3	-	9	-	-	-	-	-	-
Magnetita	Fe3O4	-	<L.D.	-	-	-	-	-	-
Mica (Flogopita)	KMg3AlSi3O10(OH,F)2	17	11	13	-	7	13	14	3
Molibdenita	MoS2	<L.D.	-	-	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.
Plagioclasa (Andesina)	(Ca,Na)(Al,Si)4O8	15	-	-	-	-	-	-	-
Pirita	FeS2	<L.D.	16	5	11	5	10	10	15
Serpentina (Lizardita)	Mg3Si2O5(OH)4	-	6	8	-	-	-	-	-
Siderita	FeCO3	-	6	-	-	-	-	-	-
Talco	Mg3Si4O10(OH)2	4	2	17	34	18	25	23	19
Tenanntita	(Cu,Fe)12As4S13	-	-	-	-	2	<L.D.	<L.D.	7
Yeso	CaSO4.2(H2O)	-	-	-	-	-	3	-	2

Fuente: Elaboración propia

En los concentrados de despacho, el contenido promedio mensual de magnesio fue de 3.7% y el promedio mensual de flúor fue de 891.1 ppm. Durante ese tiempo, se tuvo el tratamiento de minerales conteniendo serpentinas con alteración clorita y talco. Esta característica incrementó los niveles de magnesio y flúor en los concentrados producidos.

Las alternativas para el tratamiento de los silicatos (flogopita y talco) consisten en pruebas a fin de reducir el flúor y magnesio en el concentrado final del cobre. Se tomaron en cuenta cinco mecanismos que tendrían el mismo propósito. La Figura 59 muestra los valores de flúor según cada alternativa. La opción que obtuvo un mejor resultado fue CMC (Carboxyl Methyl Cellulose) en la etapa cleaner dado que obtuvo un radio de reducción de 0.19 (flúor en concentrado / flúor en cabeza) comparado al proceso sin CMC de 0.57.

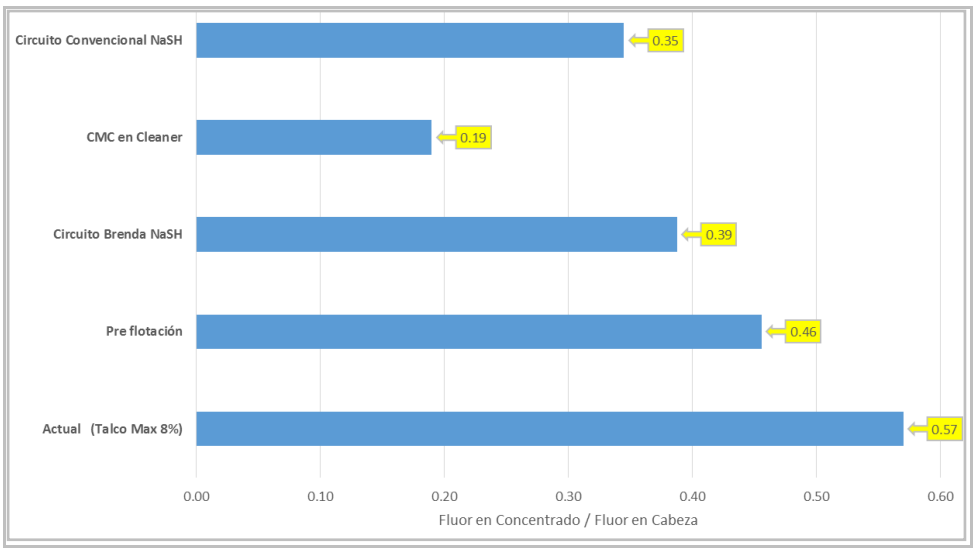


Figura 59. **Alternativas para reducir el flúor.** Fuente: Elaboración propia

El concentrado de RoBk mejora con la adición de CMC. De acuerdo al Cuadro 20, en el concentrado cleaner bulk el grado de cobre sube de 9.6% hasta 14.1% y el flúor disminuye de 1,364 hasta 500 ppm con respecto a la prueba estándar. Por otro lado, para consumos mayores de 1,000 g/t de CMC, la recuperación es afectada. Para implementar la dosificación del CMC en planta, se realizaron pruebas de sedimentación en laboratorio para los

concentrados *bulk* y cobre, así como para el relave y observar el efecto del CMC en la sedimentación.

Cuadro 20. **Balance Metalúrgico con la adición de CMC**

		Cu	Fe	Ins	Flúor
Concentrado Rougher % g/t		4.92	32.63	24.30	1,140.97
Concentrado cleaner bulk % g/t	STD	9.63	27.52	27.76	1,363.77
	250	8.87	29.45	26.09	1,233.30
	500	9.79	28.14	26.46	1,215.79
	1000	14.13	33.35	11.53	490.97
	1500	13.19	33.03	11.69	500.87
Recuperación cleaner bulk % g/t	STD	94.78	38.70	57.73	56.89
	250	95.29	46.15	62.13	61.76
	500	95.11	42.61	53.70	57.71
	1000	91.55	33.49	14.78	12.94
	1500	91.04	35.47	14.37	13.34

Fuente: Elaboración propia

Se aprovechó un circuito de tanques agitadores y se acondicionó una línea de preparación de CMC manualmente para iniciar la prueba. En el Anexo 4 se observa la implementación en prueba industrial. Los resultados de dicha prueba con respecto a la litología se detallan en el siguiente cuadro.

Cuadro 21. **Litología del mineral después de la prueba industrial**

	Sin CMC	Con CMC
Diorita	0.32%	0.00%
Granodiorita	32.40%	41.33%
Skarn	40.39%	50.07%
Hornfels	26.89%	8.60%

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al Cuadro 21, existe mayor presencia de silicatos (talco - silicatos) en un periodo de prueba con dosificación de CMC respecto al periodo sin dosificación de CMC. Por ende, existe mayor presencia de flúor y magnesio con CMC. En la siguiente figura se compara el antes y después de la dosificación de CMC con minerales insolubles (talco y flúor).

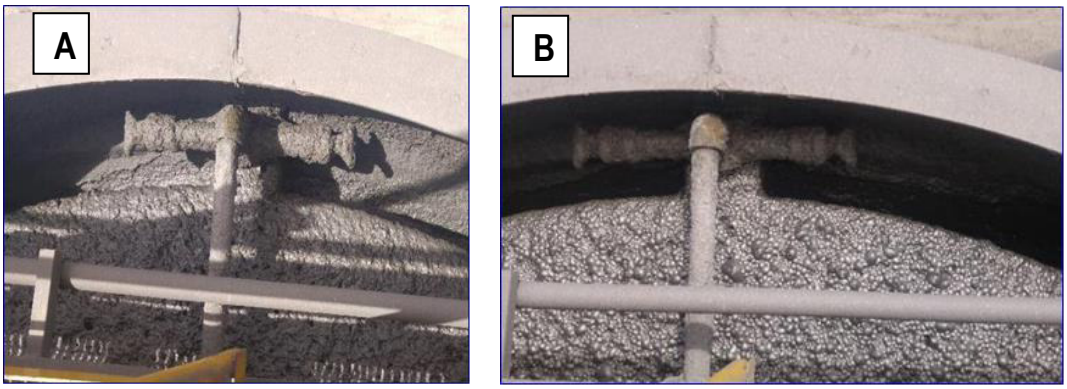


Figura 60. **Antes y después de la dosificación de CMC en contenidos de minerales insolubles.** Fuente: Elaboración propia

En la Figura 60 se observa: A) Antes de la dosificación de CMC, los minerales insolubles se encuentran intactos. B) Después de la dosificación de CMC, surge espuma de los minerales insolubles.

4.2.4.3. Estudios mineralógicos al concentrado de cobre

Se efectuó una caracterización mineralógica después del análisis con el propósito de tomar una decisión acertada y con criterio. Los polígonos de mineral presentaron la siguiente información:

Cuadro 22. **Ensayo químico de los polígonos de mineral**

Polígono	%Cu	%Mo	Ag (gr/tn)	%Fe	%As	%Zn
4725-01016	0.445	0.0128	17.190	5.950	0.092	0.261
4725-01017	1.653	0.0157	55.468	15.245	0.334	0.532
4725-01018	0.543	0.0093	18.232	6.707	0.098	0.169
4725-01019	0.331	0.0127	10.059	6.017	0.038	0.058
4725-01020	0.300	0.0100	8.814	4.196	0.055	0.032
4725-01021	0.299	0.0144	7.377	4.678	0.028	0.038

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al Cuadro 22, la muestra del polígono 4725-01017 presentó alta ley de cobre, fierro y arsénico. La muestra 4725-01018 también presentó una buena ley de cobre y arsénico. Para interpretar el análisis químico, se recurrió al estudio de especies mineralógicas, clasificándolos según la magnitud de su presencia (ver Cuadro 23).

Cuadro 23. **Cuadro de Especies Mineralógicas**

Nombre	Abreviatura	Fórmula	Peso Específico
Especies Mayores			
Gangas	GGs	Variado	2.7
Pirita	py	FeS_2	5
Especies Menores			
Calcopirita	cp	$CuFeS_2$	4.2
Digenita	dg	Cu_9S_5	5.7
Cobre gris	CuGRs	Variado	4.4
Covelita	cv	CuS	4.6
Enargita	en	$Cu_2S\ AsS_5$	4.4
Especies Escasas			
Esfalerita	ef	(Zn,Fe)S	4.1
Molibdenita	mb	MoS_2	4.7
Bornita	bn	Cu_5FeS_4	5.1

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, se efectuó un balance metalúrgico a nivel experimental de la muestra inicial 4725-01016 y final de 4725-01020 (ver Cuadro 24).

Cuadro 24. **Cuadro de balance metalúrgico**

	Productos	% peso	Leyes (% g/t)						Recuperación (%)					
			Cu	Mo	Ag	Fe	As	Zn	Cu	Mo	Ag	Fe	As	Zn
Muestra 4725-01016	Cabeza	100	0.45	0.01	15.83	5.34	0.08	0.27	100	100	100	100	100	100
	Concentrado	2.21	17.19	0.08	410.5	22.58	2.23	11.57	84.09	18.08	57.39	9.35	59.46	94.79
	Relave	97.79	0.07	0.01	6.9	4.95	0.03	0.01	15.91	81.92	42.61	90.65	40.54	5.21
Muestra 4725-01020	Cabeza	100	0.35	0.01	11.12	4.49	0.05	0.04	100	100	100	100	100	100
	Concentrado	1.04	26.12	0.15	387.6	20.38	1.45	3.10	77.97	16.31	36.41	4.74	31.86	78.21
	Relave	98.96	0.08	0.01	7.14	4.32	0.03	0.01	22.03	83.69	63.59	95.26	68.14	21.79

Fuente: Elaboración propia

Con respecto a la muestra 4725-01016, se identificó:

- Buena recuperación de cobre con baja calidad de concentrado, los contaminantes del concentrado son básicamente fierro, zinc y arsénico de acuerdo con las leyes.
- Los contaminantes. - según las fotografías microscópicas se observa que el fierro se presenta como pirita enriquecida en los bordes con cobres primarios (calcopirita) y secundarios (digenita, covelita). El zinc presenta en gran proporción como esfalerita con diseminaciones de calcopirita. El arsénico se encuentra como mixto de enargita con ganga; por lo mencionado la baja calidad, es debido a que las partículas contaminantes se comportan como la especie que lo rodea en los bordes y al dosificar los reactivos para estas especies los contaminantes son recuperadas perjudicando la calidad del concentrado.
- Las especies valiosas. - el cobre se presenta en gran cantidad como calcopirita, cobres secundarios (digenita, covelita y bornita), cobres grises. También tiene una cantidad a considerar de enargita como inclusiones en la ganga, este tipo de partículas se comporta como ganga aportando a la pérdida de valores de cobre. La plata se presenta como cobres grises, el molibdeno como molibdenita.

Con respecto a la muestra 4725-01020, se identificó:

- Regular recuperación de cobre con buena calidad de concentrado, los contaminantes del concentrado son básicamente arsénico y zinc de acuerdo con las leyes.
- Los contaminantes. - según las fotografías microscópicas, el arsénico se encuentra como enargita libre y en gran proporción como cobre gris (tennantita) en mixtos con ganga. La poca cantidad de zinc se encuentra libre y al no utilizar depresores fácilmente flota junto a las especies de interés.
- Las especies valiosas: el cobre se presenta en proporciones similares entre cobres secundarios y calcopirita, una cantidad a considerar de enargita y cobres gris (cobre y plata); la plata se encuentra como cobre gris (mayor cantidad tenantita y en menor cantidad como tetraedrita).

Las evidencias de las muestras se ubican en el Anexo 5. Seguidamente, se analizó el consumo de Carboxyl Methyl Cellulose (CMC). En la siguiente figura se observa el nivel de correlación entre el consumo CMC y la calidad del cobre.

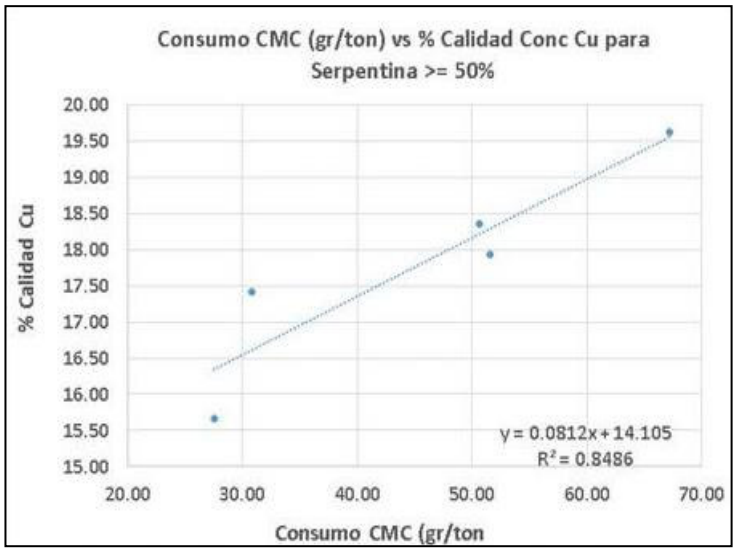


Figura 61. **Relación entre el consumo CMC y la calidad de cobre.** Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la Figura 61, a mayor contenido de talco en CMC, es más efectivo y más aun con gangas naturalmente flotables. Para lograr un grado mínimo de 20%, se requirió 700g/l de CMC con respecto al flujo con respecto al flujo del circuito “cleaner bulk” y con respecto a la alimentación será 70 g/t más “pull rougher bulk”: 10%. El uso de los depresores CMC, en el circuito “cleaner bulk” de cobre, ayudaron a la depresión de los silicatos hidrofóbicos que flotaron naturalmente para consumos de CMC mayores a 500 g/t. La dosificación del depresor CMC en la etapa “cleaner bulk” permitió incrementar el grado del concentrado final de cobre en 1.8% y la recuperación se mantuvo tal como se analizó en la prueba industrial.

La depresión del flúor fue notable en el circuito total de cobre como consecuencia que en la etapa del “cleaner bulk” fue muy efectiva. Esto ayudó a enviar menos masa hacia el circuito “cleaner” cobre. La efectividad de la depresión del CMC se apreció más en las especies mineralógicas flogopita, y talco tal como se hace notar en los análisis de DRX. Si bien es cierto que la recuperación de cobre, en la etapa “cleaner bulk” (donde se dosificó el CMC) fue afectada ligeramente. Sin embargo, esta se incrementó en la etapa “cleaner” cobre, debido a que tuvo un más alto grado de cobre con opción de recuperar más los valores de cobre. Es muy importante seleccionar el espumante adecuado para minimizar la flotación de talco, espumante fuerte (Poliglicol) promueve la flotación del talco.

Como medida adicional para tratar el concentrado final de cobre se aplicó la flotación inversa; de este modo, se disminuyeron los contaminantes, talco, flúor y magnesio. Es decir, en dicho concentrado se efectuó una flotación de insolubles deprimiendo cobre con NaSH; dicho circuito tendría una etapa rougher y dos etapas de limpieza. Se realizaron diferentes pruebas en laboratorio, en el siguiente gráfico se observa los resultados.

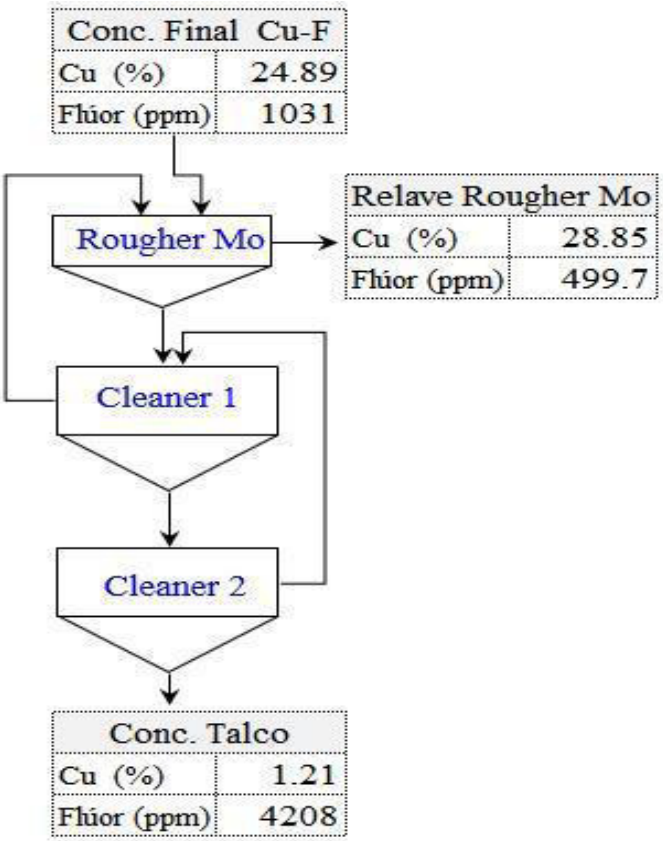


Figura 62. **Diagrama del Concentrado.** Fuente: Elaboración propia

En la Figura 62 se aprecia que el concentrado de cobre se ha incrementado desde 24.89% hasta 28.85%, el flúor ha disminuido desde 1,031 hasta 500 ppm, y se tiene 1.21% de cobre en el concentrado de talco. La disminución de flúor cubre los gastos operativos del circuito y pérdida del cobre, ofrece una ganancia a la empresa haciendo rentable este proyecto, pero es necesario analizar este circuito cuando se tiene flotación de molibdeno.

Con los procedimientos establecidos, el nuevo balance metalúrgico demuestra que la recuperación de cobre es de 84.00% en promedio (ver Cuadro 25). Esto se debe de un buen blending enviado desde mina y también, y con lo que corresponde al magnesio y flúor también las leyes en el concentrado son bajos respetando los límites penalizables. Esto se debe al consumo del CMC y al tratamiento con el NaHS a partir de la fecha mejoró bastante el grado y la recuperación del concentrado.

Cuadro 25. **Recuperación Concentrada de Cobre**

PLANTA DE PROCESOS	UNIDADES	Mar-30	Mie-01	Jue-02	Vie-03	Sab-04	Dom-05	Lun-06	Mar-07	Mie-08	Jue-09	Vie-10	Sab-11	Dom-12	Lun-13	Mar-14	Mie-15
Toneladas molidas	TMS	125,850.72	119,850.72	116,819.56	114,511.89	114,499.30	130,128.06	106,800.48	108,954.27	2,446.50	-	23,640.34	85,663.06	110,267.65	111,300.06	119,365.17	117,085.1
Humedad mineral	%	4.45	4.45	4.10	4.21	4.14	4.19	4.30	4.57	4.62	-	4.34	4.35	4.45	4.38	4.38	4.1
Toneladas molidas por hora	tph	5,243.78	5,243.78	4,867.48	4,771.33	4,770.80	5,422.00	4,450.02	4,539.76	2,536.47	-	2,229.93	4,383.98	4,594.49	4,637.50	4,973.55	4,878.5
Horas de operación (Molino SAG)	h	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	0.96	-	10.60	19.54	24.00	24.00	24.00	24.0
Mineral alimentado																	
Cu	%	0.67	0.55	0.70	0.76	0.70	0.82	0.61	0.65	0.66	-	0.60	0.80	0.87	0.80	0.79	0.8
Recuperación Cu en Conc Cu	%	83.41	70.21	70.10	83.12	75.69	82.23	83.13	84.15	83.71	-	83.27	84.00	84.37	84.74	84.92	84.2
Ag	g/t	5.09	6.42	9.21	15.70	11.03	11.08	9.13	10.27	8.76	-	8.49	10.26	9.80	8.87	11.36	10.5
Recuperación Ag en Conc Cu	%	64.79	37.45	59.25	78.58	62.30	70.01	68.39	68.95	68.62	-	71.92	68.48	73.11	77.61	78.48	72.5
Mo	%	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	-	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.0
Zn	%	0.04	0.06	0.08	0.11	0.07	0.07	0.08	0.07	0.06	-	0.08	0.09	0.10	0.06	0.08	0.0
As	%	0.03	0.042	0.036	0.060	0.050	0.060	0.051	0.054	0.051	-	0.047	0.054	0.056	0.056	0.069	0.07

Fuente: Elaboración propia

4.3. Pruebas de hipótesis

4.3.1. Hipótesis general

HG: *La evaluación del zonamiento mineralógico con difracción de rayos X permitirá optimizar el tratamiento metalúrgico en el yacimiento Toromocho.*

La evaluación del zonamiento mineralógico aplicando la difracción de rayos X permitió optimizar el tratamiento metalúrgico en el yacimiento Toromocho, por ello, se cumplió con la hipótesis planteada. Los resultados de la difracción de rayos X determinaron el zonamiento del depósito con las características de los minerales y contaminantes que se encontraron en cada parte del yacimiento. Basándose en ello, se pudo establecer un mejor tratamiento metalúrgico con una mejor dosificación. Como resultado, el porcentaje de recuperación de minerales fue elevada de 60% a 80%.

4.3.2. Hipótesis específicas

HE1: *La caracterización de la geología local, mineralogía y mineralización permitirá optimizar el tratamiento metalúrgico en el yacimiento Toromocho.*

La caracterización del yacimiento Toromocho ayudó a optimizar el tratamiento metalúrgico, por ello, se cumplió con la hipótesis específica 1. Conocer los aspectos fundamentales del área en análisis fue útil para continuar con el zonamiento mineralógico. Con ello, fue posible reconocer que el yacimiento Toromocho estaba compuesto por skarn y hornfels de diópsido y rellenado con plomo, zinc y plata, los cuales se encontraron emplazados y diseminados en calizas, así como también en contactos volcánicos y en cuerpos piritosos diseminados con mineralización de cobre. Esta no fue la única estrategia para mejorar el tratamiento, sino que sirvió de base para continuar con el zonamiento aplicando difracción de rayos X.

HE2: La definición del zonamiento mineralógico en el yacimiento Toromocho será posible con la difracción rayos X.

El zonamiento mineralógico en el yacimiento Toromocho fue posible con la difracción rayos X, por ello, se cumplió con la hipótesis específica 2. Se definieron las zonas a nivel regional donde la mineralización de cobre se

concentraba; estas se localizaron en el centro, alrededor y dentro de los stocks en San Francisco y Gertrudis. Asimismo, se localizó otras zonas (intermedia y exterior) que contenían zinc, plomo y plata. A nivel local, se identificaron zonamientos de alteración actinolita-tremolita, serpentina y magnetita, las cuales estuvieron incluidas en los metasedimentos. Los rayos X localizaron (a) el zonamiento de calcopirita y flogopita en la parte Central del tajo donde se encontraron altos contenidos de Calcopirita asociados a la flogopita, y también en el lado Sur; (b) el zonamiento de biotita, que se hallaron bien marcadas en la zona Sur - Este del depósito, es decir, en el stock San Francisco en el cual se observaron biotitas en la alteración potásica, como también se encontraron bien marcadas en la zona central relacionada a la brecha intrusiva.

HE3: La determinación de las leyes con límites permitirá realizar una actividad de minado seguro en el yacimiento Toromocho.

Las leyes con límites permitieron efectuar una actividad de minado seguro en el yacimiento Toromocho, por ello, se cumplió con la hipótesis específica 3. Se establecieron el nivel de contaminación no permisible: la concentración de flúor debería ser menor a 1000 ppm, el magnesio menor al 2%, el zinc menor a 3% y el arsénico menor 0.5%. Adicionalmente, se reconocieron las alteraciones hidrotermales y los zonamientos para realizar los polígonos de mineral y blending. Con ello, el minado e incluso el tratamiento metalúrgico no se expone a niveles penalizables de contaminación y se previenen situaciones negativas para el trabajador y el medio ambiente.

HE4: El tratamiento metalúrgico en el yacimiento Toromocho será optimizado.

El tratamiento metalúrgico en el yacimiento Toromocho se optimizó, por ello, se cumplió con la hipótesis específica 4. A través de la identificación de características geológicas y mineralógicas, definición del zonamiento y determinación de las leyes con límites para el minado y blending, se logró mejorar el tratamiento de mineral se inició con una recuperación de 60%, porcentaje que creció a 80%. En el uso del CMC, se pudo controlar la flotación de los minerales contaminantes, deprimiendo todos los minerales insolubles

con el CMC obteniendo buena recuperación del concentrado y el grado de cobre.

4.4. Presentación de resultados

A continuación, se presentan los resultados según los objetivos planteados:

OG: Evaluar el zonamiento mineralógico con difracción de rayos X para la optimización del tratamiento metalúrgico en el yacimiento Toromocho.

La presente investigación logró evaluar el zonamiento mineralógico en el yacimiento Toromocho utilizando la difracción de rayos X. Con ello, se pudo conocer el contenido mineralógico, establecer los parámetros para el minado y elevar la recuperación de los minerales en 20% aproximadamente; este último hecho representa la optimización del tratamiento metalúrgico.

OE1: Caracterizar la geología local, mineralogía y mineralización del yacimiento Toromocho.

En primer lugar, el análisis previo constó en la caracterización de la geología local, mineralogía y mineralización del yacimiento Toromocho para conocer los aspectos básicos. El yacimiento Toromocho es de tipo pórfido skarn con una extensión de 5 km por 6 km. Geológicamente, está constituida por rocas volcánicas del Mitú y calizas del Pucará, intrusivos, skarn, hornfels y alteraciones.

La mineralización viene dada por las vetas que cruzan de este a oeste todo el distrito de Morococha. Estas vetas están llenas de minerales de plomo, zinc y plata y mantos de zinc que se localizan en la caliza y en forma diseminada. Además, estos mantos de zinc se localizan en la caliza y en los contactos volcánicos - cuerpos intrusivos de caliza y también diseminados de pirita con mineralización de cobre.

La mina Toromocho es un pórfido de cobre molibdeno que se encuentra en las calizas del metalotecto Pucará y sus derivados metamórficos. También se encuentra dentro de una variedad de rocas intrusivas en cuyos contactos se han desarrollado zonas de skarn, hornfels y mármoles. Además, hay lentes de brechas intrusivas e hidrotermales. Los halos de alteración hidrotermal son

característicos de un yacimiento de tipo pórfido de cobre con zonas concéntricas alrededor de una zona central donde predomina la alteración potásica, la biotización secundaria de cuarzo-pirita, la zona fílica de cuarzo-sericita, y en la periferia una alteración propilítica con conjuntos de epidota-clorita-calcita y esfena. Estas zonas rodean una zona central donde la alteración potásica.

OE2: Definir el zonamiento mineralógico para el yacimiento Toromocho aplicando la difracción de rayos X.

En segundo lugar, se aplicó la difracción de rayos X para definir el zonamiento mineralógico en el yacimiento Toromocho. De este modo, se identificó que el cobre se concentraba en la zona central, alrededor y dentro de los stocks de San Francisco y Gertrudis y en los alrededores de los skarns y hornfels. Además, en la zona intermedia que circundaba la zona central del cobre se identificó mineralización de zinc y plomo mientras que en la zona exterior que abarca los márgenes del distrito se identificó mineralización de plomo y plata.

OE3: Determinar las leyes con límites para realizar una actividad de minado seguro en el yacimiento Toromocho.

En tercer lugar, se determinaron las leyes con límites con el propósito de efectuar un minado seguro en el yacimiento Toromocho. Esto se realizó a través del reconocimiento de los valores penalizables de minerales contaminantes. Es decir, el minado no puede realizarse en caso de que las concentraciones de flúor, magnesio, zinc y arsénico superaran 1000 ppm, 2%, 3% y 0.5%, respectivamente.

Teniendo en cuenta los valores mencionados en el párrafo anterior, las alteraciones hidrotermales, el zonamiento de actinolita tremolita, el zonamiento de calcopirita y flogopita y el zonamiento de biotita tanto en las zonas central, Nor-Este y Sur de dicho yacimiento, se realizaron los polígonos de mineral y el blending.

OE4: Optimizar el tratamiento metalúrgico en el yacimiento Toromocho.

En cuarto lugar, después de haber limitado las zonas de minado seguro con respecto a la presencia de minerales contaminantes, se pudo obtener un buen Blending y tratamiento metalúrgico. Con el Carboxyl Methyl Cellulose (CMC)

se logró mejorar la recuperación dosificando para limpiar y deprimir los minerales contaminantes el NaSH para la limpieza y sulfidizar el mineral de cobre oxidado (alto RatoX). De este modo, se obtuvo una buena recuperación final con un grado de 21% de cobre y una recuperación entre 60% a 80% de cobre además de plata.

Se realizaron pruebas de cobre secuencial con la finalidad de poder lixiviar los minerales de óxido de cobre (brocantita, malaquita, azurita) obteniendo 100% de recuperación. El cobre secundario (Calcosina y Covelita) los resultados fueron de 52% disuelto en ácido cítrico, los cobres primarios disuelven en 86% de los cobres secundarios y como cobre residual se tiene 100% de calcopirita y enargita. Todos los minerales que contuvieron óxido de cobre en los diferentes tipos de rocas se almacenaron en stocks para poder lixiviarlos en los próximos años. También la mineralogía de la calcopirita secundaria en la flotación se tiene buena liberación que no está entrelazado con ningún otro mineral.

Se obtuvo mejor recuperación de 80.74%, mejor grado de cobre 23.98% y con las leyes de minerales penalizables muy bajos de los límites máximos permisibles que fueron de (891.7 ppm de flúor y 3.7% de magnesio).

CONCLUSIONES

- Se evaluó el zonamiento mineralógico con difracción de rayos X para optimizar el tratamiento metalúrgico en el yacimiento Toromocho. El zonamiento se realizó a través de la división en zonamiento de alteración actinolita-tremolita, skarn de serpentina -clorita-magnetita, calcopirita-flogopita-biotita. Los metasedimentos como *hornfels* de diópsido y el Skarn de serpentina alterado a talco, y el zonamiento de serpentina magnetita que juntos a otros componentes, sirvieron para la optimización del tratamiento metalúrgico alcanzando la calidad del concentrado y elevar la recuperación alrededor del 80% en cobre.
- Se caracterizó la geología local, mineralogía y mineralización del yacimiento Toromocho. Ubicado en el distrito minero de Morococha, está constituida por vetas que atraviesan de un rumbo Nor-Este y rellenadas con minerales Pb-Zn-Cu y Ag, intrusivos y el pórfido *skarn* de Toromocho, así como mantos emplazados en las calizas y en los contactos volcánicos -caliza-intrusivo y cuerpos piritosos. En cuanto a las alteraciones hidrotermales, en la zona central predomina la alteración potásica, la biotización secundaria cuarzo-pirita, la zona fílica cuarzo-sericita y en la periferie una alteración propilítica con asociaciones mineralógicas de epidota-clorita-calcita y esfena.
- Se definió el zonamiento mineralógico para el yacimiento Toromocho aplicando la difracción de rayos X, lo cual permitió reconocer alteraciones en el zonamiento de actinolita-tremolita en la parte central del tajo y en el zonamiento de serpentina -clorita-magnetita en la parte Nor-Este del yacimiento; ambas alteraciones se relacionaron a Metasedimentos. Además, el zonamiento de calcopirita y flogopita se localizó en la parte central del tajo y el zonamiento de biotita estuvieron marcadas en la zona Sur-Este.
- Se determinaron las leyes con límites para el desarrollo de una actividad de minado seguro en el yacimiento Toromocho. En primer lugar, se reconocieron que los límites máximos permisibles de flúor, magnesio, zinc y arsénico no debieron superar los 1000 ppm, 2%, 3% y 0.5%, respectivamente. Con base en las alteraciones hidrotermales,

el zonamiento de los polígonos de mineral y el blending se obtuvo un mineral apto para el tratamiento.

- Se logró optimizar el tratamiento metalúrgico en el yacimiento Toromocho con el Carboxyl Methyl Cellulose (CMC). A través del mejoramiento de la dosificación para limpiar y deprimir minerales contaminantes, así como también emplear NaSH para sulfidizar el cobre oxidado, se elevó el nivel de recuperación de cobre entre 70% a 80%. Además, el grado de livixiación de minerales revelaron una recuperación de 100% en óxido de cobre (brocantita, malaquita, azurita) y 52% en cobre secundario (calcosina y covelita). Los cobres primarios (calcopirita) se disolvieron en 86%.

RECOMENDACIONES

- Para conocer la mineralogía de manera cualitativa y cuantitativa, se debe usar la difracción de rayos X y optimizar todo el proceso minero, geología, explotación y concentración de minerales.
- Para ampliar el conocimiento mineralógico de Toromocho, se deben hacer estudios con microscopia electrónica de barrido, microsonda electrónica y otros.
- Se podría realizar estudios de inclusiones fluidas para conocer la temperatura de formación de los diversos niveles del yacimiento.
- Ir actualizando los planos de zonamiento, alteraciones, y otros para poder tener mejor información para la explotación y recuperación de los minerales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvarez A. A. (1996). *Informe privado Centromin. Morococha - Perú*.

Arana, A., Paredes, L., Mayna, G. y Retamozo, K. (2021). *Zonamiento óptico-composicional de granates y secuencia paragenética de un sistema skarn al sur del distrito Antamina, Ancash-Perú*. Universidad Nacional de Ingeniería.

Candente Copper Corporatión. (2011). *NI 43-101 Technical report on pre-feasibility study.* Peru.

Canepa, C. (1989). *La determinación microscópica del Grado de Liberación de los Minerales: Metodología y campo de aplicación*. Boletín Sociedad Geológica del Perú 79, pp 91-110.

Ccapa, D. (2019). *Procesos de operación ore control en el yacimiento Porfido-Skarn de la mina Antapaccay Compañía Glencore - Cusco - Perú.* Arequipa, Perú: Universidad Nacional de San Agustin de Arequipa.

CENTROMIN. (1990). *Informe geológico. Morococha.*

Chariarse C. (12 de setiembre de 2012). *Control de calidad en trabajos de muestreo en mina.* Perú.

Crespo, M., Lozano, R. P. (2006). *Caracterización mineralógica y petrográfica de dos ejemplares de la colección de meteoritos del museo Geomine*ro. Universidad Rey Juan Carlos.

Espinoza, L.; Iriarte, G.; Espinoza, L.; Gutarra, R.; Herrera, M.; Zamalloa, J.; Aramburú, V.; Torres, J. (2021). *Importancia de la mineralogía en la geometalurgia: aplicación en Perú.* Revista de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica 24*(48)* pp 85-100.

García M. y Socualaya O. (2018). Recuperado de

http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/4924/Garcia%20Matos%20-20Socualaya%20Orihuela.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Haapala, P. (1953). Morococha anhydrita. *Boletin 26 de la Sociedad Geologica del Perú.*

Harrison, J. (1943). *Geología de los andes centrales en parte del departamento de Junín*. https://www.ehu.eus/es/.

Universidad del País Vasco. (2006, 28 de setiembre). *Técnicas a utilizar.* http://www.ehu.eus/imacris/PIE06/web/DRXP.htm#ejDRXP

INGEMMET. (1983). *Geología de los cuadrángulos de Matucana y Huarochir. Perú: Boletin 36. Serie A.*

Jenks, W. F. (1951). *Triasic and tertiary stratigraphy near Cerro de Pasco Perú.*

Kobe, H. (1981). *Metallogenic evolutions of the Yauli dome, central Perú*. Special Publication N°8 of the Society for Geology Aplied to MIneral Deposits. 8 (8).

Londoño, J.; Mojica, J.; Molano, J.; Cañón, Y.; Stella, G.; Ruiz, V.; Oneida, N.; Mario, H.; González, M. C.; Concha, H.; Galindo, B.; Londoño, S.; Jairo, J. (2010) *Técnicas mineralógicas, químicas y metalúrgicas para la caracterización de menas auríferas.* Instituto Colombiano de Geología y Minería, Ingeominas. Primera ed.

López, F. (2019). *Zonificación de alteraciones hidrotermales aplicando el método Scott Halley en proyecto de pórfido de cobre molibdeno al noroeste del cantón Mejía.* Quito: Universidad Central del Ecuador

Lowell, D., y Guilbert, J. (1970). *Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits*. Bulletin of the Society of Economic Geologist.

Manzaneda C. (2019). Recuperado de

https://www.horizonteminero.com/caracterizacion-mineralogica-en-procesamiento-de-minerales/

Manzaneda, C. (2010). *Aplicacion* de Microscopía en el Procesamiento de Minerales por Flotación. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

Mc Laughling, D. (1924). *Geology and physiography of the peruvian cordillera department of Junín and Lima*. Bulletin de la Geological Society of America., Bolletin.

Megard, F. (1968). *Geología del cuadrángulo de Huancayo.* Servicio de Geología y Minería, Boletin.

Megard, F. (1978). *Etude geologique des andes du Pérou central.* Lima: Institut français d'études andines. Lima: nstitut français d'études andines, ORSTOM - Office de la recherche scientifique et technique outre-mer, INGEMMET - Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

Minera Chinalco Perú. (2016). *Informe geologico. Morococha*.

Minera Chinalco Perú. (2016). *Informe mensual de leyes. Morococha*.

Minera Chinalco Perú. (2016). *Minerales contaminantes.*

Minera Chinalco Perú. (2016). *Plan de minado mensual. Morococha.*

Minera Chinalco Perú. (2018). *Informe diario de DRX. Morococha.*

Minera Chinalco Perú. (2018). *Informe diario mineralógico. Morococha*.

Minera Chinalco Perú. (2018). *Informe interno mensual.*

Minera Chinalco Perú. (2018). *Informe mensual de leyes. Morococha.*

Minera Chinalco Perú. (2018). *Plan de minado mensual. Morocoha.*

Minera Chinalco Perú. (2019). *Análisis de Cu secuencial, Cu soluble en ácido cítrico y TIMA-X. Morococha:* Servicios Técnicos - Geologia.

Minera Chinalco Perú. (2019). *Informe anual de leyes 2019. Morococha.*

Minera Chinalco Perú. (2019). *Informe de distribución de los minerales mediante DRX. Morococha.*

Minera Chinalco Perú. (2019). *Informe geológico. Morococha.*

Minera Chinalco Perú. (2019). *Informe geológico mensual. Morococha*.

Minera Chinalco Perú. (2019). *Informe mensual de leyes. Morococha.*

Minera Chinalco Perú. (2019). *Informe plan de minado. Morococha.*

Minera Chinalco Perú. (2019). *Reporte diario. Morococha.*

Minera Chinalco Perú. (2020). *Reporte diario. Morococha.*

Morales, D. (2016). *Análisis PIMA, caracterización geoquímica y petro mineragráfica del prospecto Vicuña-Lucanas, Ayacucho*. Puno: Universidad Nacional del Altiplano.

Nina, V. (2019). Recuperado de www.unsa.edu.pe.

http://bibliotecas.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8696

Pangum, L., Manlapig, E.V. Mackinnon, I.D.R. Lauder, D.W. (1997). *Flotation process response of ok tedi fluorine bearing minerals*. Australasian Institute for Mining and Metallugy, PNG Geology Exploration & Mining.

Payano H., y Setién M. (2013). Recuperado de https://ocw.unican.es/. (U. d. Cantabria, Ed.)

https://ocw.unican.es/course/view.php?id=119&section=4

Petersen, U. (1965). *Regional geology and major ore deposits of central Peu.* Economic Geology.

Proffet, J. (2005). *Informe privado del cartografiado de las calizas del grupo Pucará en contacto con los volcánicos ctalina (Grupo Mitu)*. Minera Perú Copper.

Rio Tinto. (29 de mayo de 2008). *Rio tinto announces inferred mineral resource of 2.8 billion tonnes at la granja, Perú.* Press Release. United Kingdom.

Sarquís, P. (2012). *Tesis doctoral. flotación selectiva de sulfuros complejos usando reactivos de baja toxicidad.* Oviedo, España.

Steinmann, G. (1930). *Geologia del Perú.* Heilderberg.

Szekely, T.; Grose, L. (1968). *Estudio del grupo Pucará en la zona de Morococha.*

Szekely, T. y Grose, L. (1972). *Stratigraphy of the carbonate, black shale, and phosphate of the Pucará group (upper triasic - lower Jurassic), central andes, Perú.* Geological Society of America Bulletin.

Terrones, J. (1949). *Estratigrafía del distritio mInero de Morococha.* Peru: Soc. Geol. Peru (Vol. Jub).

Valera, L. (1997). *Geología de los depósitos de minerales metálicos*. Lima.

Vallette, I. (2017). Recuperado de www.enami.cl.

https://www.enami.cl/api/descarga?f=/Lists/Estudios%20Geolgicos%20Distritales/Attachments/140/Estudio_Mineralogia_Caimanes.pdf

Vasquez, C. (2019). Recuperado de https://www.unsa.edu.pe/.

http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/9477

Villanueva, G. (2017). *Informe Privado Minera Chinalco*. Morocoha - Perú.

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

ZONAMIENTO MINERALÓGICO CON DIFRACCIÓN DE RAYOS X PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL TRATAMIENTO METALÚRGICO EN EL YACIMIENTO TOROMOCHO				
PROBLEMA	**OBJETIVOS**	**HIPÓTESIS**	**OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES**	**METODOLOGÍA**
PROBLEMA GENERAL ¿De qué manera se evalúa define el zonamiento mineralógico con difracción de rayos X logrará la optimización del tratamiento metalúrgico en el yacimiento Toromocho? **PROBLEMAS ESPECÍFICOS** – ¿Qué características geológicas locales, mineralógicas y de mineralización tiene el yacimiento Toromocho? – ¿Cómo es el zonamiento de la mineralización en Toromocho aplicando Rayos X?	**OBJETIVO GENERAL** Evaluar el zonamiento mineralógico con difracción de rayos X para la optimización del tratamiento metalúrgico en el yacimiento Toromocho. **OBJETIVOS ESPECÍFICOS** – Caracterizar la geología local, mineralogía y mineralización del yacimiento Toromocho. – Definir el zonamiento mineralógico para el yacimiento Toromocho aplicando la difracción de rayos X.	**HIPÓTESIS GENERAL** La evaluación del zonamiento mineralógico con difracción de rayos X permitirá optimizar el tratamiento metalúrgico en el yacimiento Toromocho. **HIPÓTESIS ESPECÍFICAS** – La caracterización de la geología local, mineralogía y mineralización permitirá optimizar el tratamiento metalúrgico en el yacimiento Toromocho. – La definición del zonamiento mineralógico en el yacimiento Toromocho será posible con la difracción rayos X.	**VARIABLE INDEPENDIENTE** X: Zonamiento mineralógico con difracción de rayos X. **DIMENSIONES** X1: Zonas mineralizadas X2: Leyes con límites X3: Características mineralógicas **VARIABLE DEPENDIENTE** Y: Tratamiento metalúrgico en el yacimiento Toromocho **DIMENSIONES**	**TIPO DE INVESTIGACIÓN** Exploratorio Descriptivo **NIVEL DE INVESTIGACIÓN** Exploratorio y descriptivo **MÉTODO** Deductivo e inductivo **DISEÑO** No experimental correlacional **TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS** • **Observación** • Controlada • Estructurada

– ¿Cuáles son las leyes con límites para realizar una actividad de minado seguro en el yacimiento Toromocho? – ¿Cómo optimizar el tratamiento de minerales del yacimiento Toromocho?	– Determinar las leyes con límites para realizar una actividad de minado seguro en el yacimiento Toromocho. – Optimizar el tratamiento metalúrgico en el yacimiento Toromocho.	– La determinación de las leyes con límites permitirá realizar una actividad de minado seguro en el yacimiento Toromocho. – El tratamiento metalúrgico en el yacimiento Toromocho será optimizado.	Y1: Recuperación de minerales. Y2: Blending. Y3: Minerales contaminantes.	• Entrevista • Revisión bibliográfica (Fuentes documentales) **INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS** • Ficha bibliográfica • Guía de entrevista. • Escala de actitudes de los entrevistados para su confiabilidad.

Anexo 2. ***Resultados de la prueba DRX para las nueve muestras***

DIFRACCIÓN DE RAYOS X – MINERA CHINALCO																				
N°	**Gnd F2**		**Serp F2-NE**		**BXI F3-S**		**BXSed F3-S**		**BXSed F2**		**Mgt F2-SE**		**BXSed F3-N**		**Serp F2-RMP**		**Mgt F2-RMP**		**Serp-Magt F4**	
1	Quartz	30.57	Antigorite/ Lizardite	19.89	Quartz	31.74	Antigorite / Lizardite	17.95	Actinolite	24.05	Antigorite/ Lizardite	19.45	Antigorite/ Lizardite	31.68	Pyrite	22.81	Magnetite	36.86	Pyrite	26.2
2	Orthoclase /Microline	24.11	Pyrite	16.37	Phlogopite/ Muscovite	22.03	Pyrite	13.99	Quartz	16.5	Forsterite	18.49	Siderite	10.55	Magnetite	21.2	Pyrite	20.45	Actinolite	23.61
3	Phlogopite/ Muscovite	15.44	Phlogopite/ Muscovite	13.21	Orthoclase / Microline	16.28	Magnetite	13.01	Phlogopite/ Muscovite	16.35	Magnetite	17.89	Orthoclase/ Microline	9.51	Antigorite / Lizardite	17.53	Antigorite/ Lizardite	16.62	Clinochlore	21.96
4	Albite/ Oliglocase	12.89	Clinochlore	11.4	Pyrite	13	Phlogopite/ Muscovite	12.45	Orthoclase / Microline	10.3	Pyrite	15.54	Clinochlore	8.46	Clinochlore	15.02	Phlogopite/ Muscovite	6.32	Talc	8.81
5	Pyrite	5.47	Talc	8.47	Antigorite / Lizardite	9.84	Siderite	12.03	Clinochlore	7.52	Clinochlore	9.75	Quartz	6.99	Talc	9.76	Talc	5.56	Phlogopite/ Muscovite	7.55
6	Talc	3.19	Quartz	7.21	Magnetite	2.45	Orthoclase/ Microline	11.03	Pyrite	6.24	Talc	5.92	Diopside	5.82	Phlogopite/ Muscovite	8.89	Quartz	3.62	Antigorite/ Lizardite	2.63
7	Grossular	2.57	Albite/ Oliglocase	6.09	Clinochlore	1.73	Quartz	10.19	Antigorite/ Lizardite	5.65	Phlogopite/ Muscovite	3.26	Phlogopite/ Muscovite	5.71	Actinolite	1.88	Actinolite	3.18	Magnetite	2.28
8	Actinolite	2.37	Orthoclase/ Microline	4.08	Actinolite	1.69	Clinochlore	5.79	Albite/ Oliglocase	4.87	Actinolite	2.83	Pyrite	5.66			Clinochlore	2.8	Quartz	2.25
9	Antigorite / Lizardite	1.06	Magnetite	3.91			Talc	1.19	Talc	3.26	Orthoclase / Microline	1.88	Albite / Oliglocase	5.05			Siderite	1.86	Orthoclase / Microline	2.00
10	Diopside	1.02	Grossular	3.63					Biotite	2.58	Vallerite	1.52	Magnetite	3.31			Orthoclase / Microline	1.32	Diopside	1.01
11			Actinolite	3.34					Magnetite	1.29			Talc	3.08						
12			Dipside	1.65									Actinolite	1.93						
13													Grossular	1.74						

Fuente: Minera Chinalco Perú (2019)

Anexo 3. ***Resultados de la prueba mineralógica con TIMA-X para las nueve muestras***

- **Composición Modal TIMA X**

Minerals	Gnd F2	Serp F2-NE	BXl F3-S	BXSed F3-S	BXSed F2	Mgt F2-SE	BXSed F3-N	Serp F2-RMP	Mgt F2-RMP	Serp-Magt F4
Chalcopyrite	0.68	1.00	0.39	1.17	0.98	2.92	0.59	2.02	1.94	0.66
Chalcocite	0.20	0.28	0.24	0.31	0.48	0.01	0.35	0.36	0.36	0.14
Bornite	0.33	0.18	0.55	0.37	0.21	0.00	0.19	0.28	0.35	0.39
Covellite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
Enargite/Tennantite	0.02	0.02	0.16	0.06	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.05
Brochantite	0.27	0.43	0.39	0.47	0.42	0.01	0.51	0.48	0.54	0.50
Malachite/Azurite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Other Cu Oxides	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
Pyrite	9.59	27.74	24.61	30.42	11.33	30.24	13.94	31.51	32.93	36.69
Fe Oxides	0.07	1.77	1.98	12.72	0.99	10.12	6.77	11.86	22.64	1.26
Sphalerite	0.08	0.05	0.12	0.67	0.01	0.07	0.48	0.04	0.04	0.92
Rutile	0.17	0.10	0.16	0.18	0.28	0.00	0.46	0.01	0.06	0.03
Quartz	32.59	9.20	36.99	14.16	15.75	0.29	4.83	1.01	4.05	2.95
K-Feldspar	15.65	1.59	8.89	6.81	3.66	0.17	4.02	0.11	0.13	0.10
Plagioclse	18.57	4.88	3.37	1.75	11.14	0.27	7.40	0.69	0.45	0.91
Piroxene	0.02	0.40	0.37	1.90	0.96	0.44	0.41	3.62	3.95	1.13
Garnet	0.05	0.14	0.03	1.33	0.33	0.03	3.91	0.01	0.13	0.05
Epidote	0.15	0.28	0.05	1.28	0.32	0.09	2.69	0.03	0.12	0.08
Amphibole	6.51	30.17	1.10	3.27	25.14	46.34	14.10	22.47	12.69	32.80
Biotite	11.38	11.61	11.88	10.07	23.25	1.06	13.32	6.47	6.48	3.76
Muscovite	2.61	0.65	5.57	1.60	0.21	0.02	0.60	0.16	0.08	0.24
Chlorite	0.65	8.82	3.05	9.85	3.79	5.28	23.14	18.43	12.54	16.79
Kaolinite	0.03	0.20	0.02	0.03	0.18	0.00	0.51	0.21	0.19	0.24
Calcite	0.02	0.06	0.01	0.61	0.03	2.33	0.65	0.03	0.03	0.04
Other Carbonates	0.00	0.02	0.01	0.80	0.02	0.12	0.69	0.10	0.21	0.03
Apatite	0.27	0.31	0.02	0.06	0.37	0.11	0.20	0.08	0.08	0.15

Gypsum/Anhydrite	0.01	0.06	0.01	0.01	0.02	0.06	0.04	0.01	0.01	0.02
Others	0.10	0.04	0.03	0.10	0.12	0.00	0.18	0.01	0.02	0.01
Total	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**

Orden	Gnd F2		Serp F2-NE		BXI F3-S		BXSed F3-S		BXSed F2		Mgt F2-SE		BXSed F3-N		Serp F2-RMP		Mgt F2-RMP		Serp-Magt F4	
1	Quartz	32.59	Amphibole	30.17	Quartz	36.99	Pyrite	30.42	Amphibole	25.14	Amphibole	46.34	Chlorite	23.14	Pyrite	31.51	Pyrite	32.93	Pyrite	36.69
2	Plagioclase	18.57	Pyrite	22.74	Pyrite	24.61	Quartz	14.16	Biotite	23.25	Pyrite	30.24	Amphibole	14.1	Amphibole	22.47	Fe Oxides	22.64	Amphibole	32.8
3	K-Feldspar	15.65	Biotite	11.61	Biotite	11.88	Fe Oxides	12.72	Quartz	15.75	Fe Oxides	10.12	Pyrite	13.94	Chlorite	18.43	Amphibole	12.69	Chlorite	16.79
4	Biotite	11.38	Quartz	9.20	K-Feldspar	8.89	Biotite	10.07	Pyrite	11.33	Chlorite	5.28	Quartz	13.32	Fe Oxides	11.86	Chlorite	12.54	Biotite	3.76
5	Pyrite	9.59	Chlorite	8.82	Muscovite	5.57	Chlorite	9.85	Plagioclase	11.14	Calcite	2.33	Plagioclase	7.4	Biotite	6.47	Biotite	6.48	Quartz	2.95
6	Amphibole	6.51	Plagioclase	4.88	Plagioclase	3.37	K-Feldspar	6.81	Chlorite	3.79	Biotite	1.06	Fe Oxides	6.77	Piroxene	3.62	Quartz	4.05	Fe Oxides	1.26
7	Muscovite	2.61	Fe Oxides	1.77	Chlorite	3.05	Amphibole	3.27	K-Feldspar	3.66			Quartz	4.83	Quartz	1.01	Piroxene	3.95	Piroxene	1.13
8			K-Feldspar	1.59	Fe Oxides	1.98	Piroxene	1.90					K-Feldspar	4.02						
9					Amphibole	1.10	Plagioclase	1.75					Garnet	3.91						
10							Muscovite	1.60					Epidote	2.69						
11							Garnet	1.33												
12							Epidote	1.28												

- **Composición Modal TIMA X–Elementos Minerales de Cu**

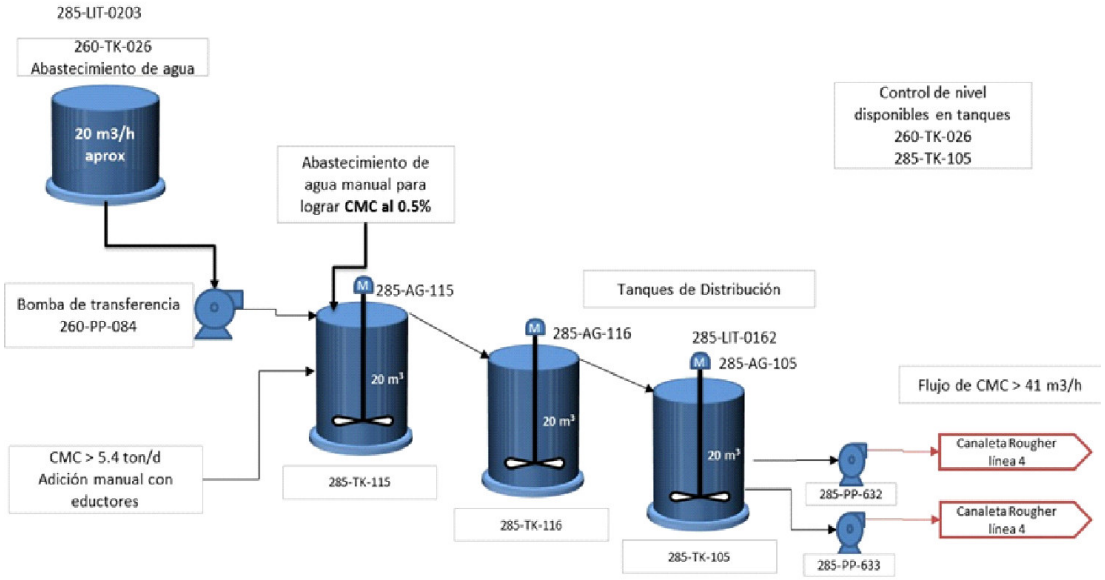
Minerals	% Cu	Gnd F2	Serp F2-NE	BXI F3-S	BXSed F3-S	BXSed F2	Mgt F2-SE	BXSed F3-N	Serp F2-RMP	Mgt F2-RMP	Serp-Magt F4
Chalcopyrite	34.50	0.68	1.00	0.39	1.17	0.98	2.92	0.59	2.02	1.94	0.66
Enargite/Tennantite	48.3 / 48.5	0.02	0.02	0.16	0.06	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.05
Bornite	55.50	0.33	0.18	0.55	0.37	0.21	0.00	0.19	0.28	0.35	0.39
Chalcocite	79.80	0.20	0.28	0.24	0.31	0.48	0.01	0.35	0.36	0.36	0.14
Covellite	66.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05

Brochantite	56.20	0.27	0.43	0.39	0.47	0.42	0.01	0.51	0.48	0.54	0.50
Malachite/Azurite	57 / 62.9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Other Cu Oxides	N/A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00

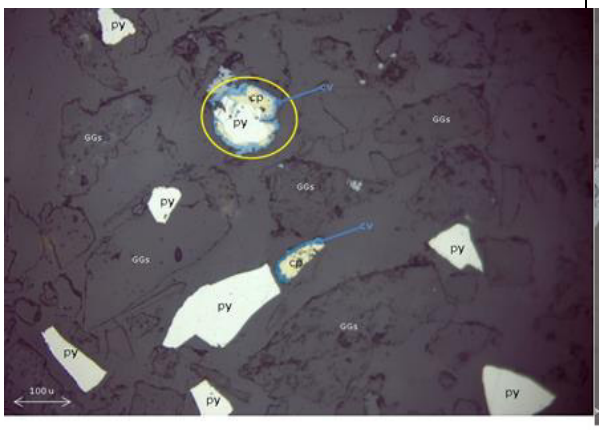
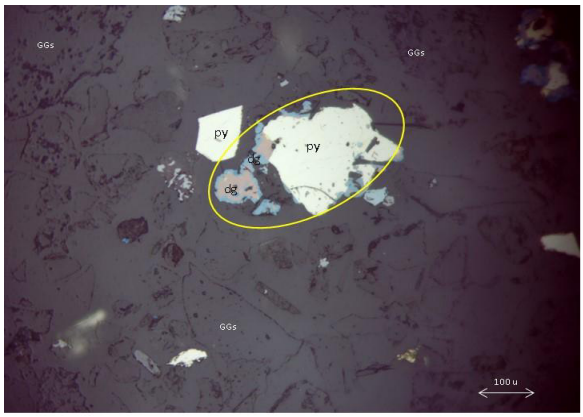
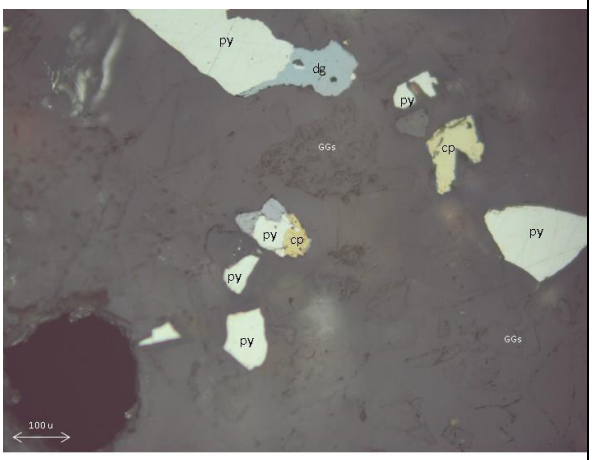
Nota: El porcentaje de los elementos mineralógicos de Cu normalizados al 100%, sin considerar los otros elementos mineralógicos

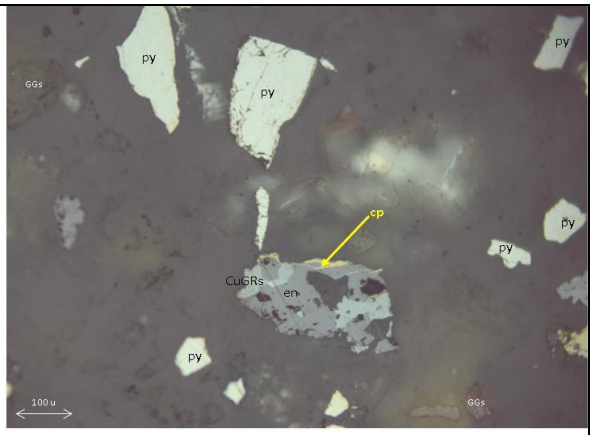
Normalized Cu Deportment	**Gnd F2**	**Serp F2-NE**	**BXI F3-S**	**BXSed F3-S**	**BXSed F2**	**Mgt F2-SE**	**BXSed F3-N**	**Serp F2-RMP**	**Mgt F2-RMP**	**Serp-Magt F4**
Chalcopyrite	30.60	36.81	13.74	34.38	31.04	98.99	22.50	48.73	45.07	24.48
Enargite/Tennantite	1.21	1.01	8.66	2.58	0.00	0.00	0.84	0.12	0.09	3.00
Bornite	27.29	12.30	35.57	19.71	12.14	0.25	13.16	12.50	14.76	26.72
Chalcocite	20.74	23.84	19.65	20.87	35.16	0.41	30.30	19.85	19.41	12.26
Covellite	0.24	0.05	0.09	0.00	0.25	0.00	0.05	0.13	0.14	3.28
Brochantite	19.92	25.88	22.24	22.33	21.28	0.35	31.08	18.66	20.47	29.96
Malachite/Azurite	0.00	0.02	0.02	0.03	0.13	0.00	0.88	0.00	0.01	0.02
Other Cu Oxides	0.00	0.10	0.03	0.10	0.00	0.00	1.21	0.00	0.05	0.27
Total	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**

Anexo 4. ***Implementación prueba industrial***



Anexo 5. ***Fotografías de la muestra 4725-01016 y 4725-01020***

Muestra 4725-01016	Muestra 4725-01020
	
Malla +400 (37µ): 4725-01016 En la vista se observa una particula de pirita cubierta por calcopirita y covelita, esta particula se comportará como cobre primario o secundario y flotará perjudicando la calidad del concentrado; completan la vista particulas libres de ganga y pirita.	**Malla +400 (37µ): 4725-01020** ita se observa el cobre como enargita y al contaminante zinc como esfalerita; tan la vista piritas y gangas libres.
	
Malla +400 (37µ): 4725-01016 En el circulo amarillo de observa una partícula de pirita enriquecida con digenita y bornita; completan la vista gangas y piritas.	**Malla +400 (37µ): 4725-01020** En esta fotografia en la parte central se observa un mixto de calcopirita con pirita y en la parte superior el cobre secundario (digenita) con pirita; completan la vista piritas y gangas libres.



Malla +400 (37µ): 4725-01020

En la vista se observa un mixto triple de cobre gris, calcopirita y enargita. Todos forman el mismo concentrado; completan la vista piritas y gangas libres.

Anexo 6. ***Operacionalización de variables***

Tipo de Variable	Variable	Dimensiones	Indicadores
Variable independiente	Zonamiento mineralógico con difracción de rayos X	Zonas mineralizadas	Área y volúmenes de zonas de mineralizadas
		Leyes límites	Leyes con límites para el minado
		Características mineralógicas	Contenido mineralógico
Variable dependiente	Tratamiento metalúrgico	Recuperación de minerales	Porcentaje de recuperación de minerales
		Blending	Porcentaje de “Blending”
		Presencia de minerales contaminantes	Porcentaje de minerales contaminantes