

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA



TESIS

**EVALUACION Y DETERMINACION DEL METODO OPTIMO PARA
MUESTREO DE BLASTHOLES EN EL YACIMIENTO MINERO LAS
BAMBAS APURIMAC**

PRESENTADO POR:

Br. MARIA ZORAIDA TTITO RUMACCA
Br. RONNY RALDY HILARES QUINTANA

**PARA OPTAR AL TITULO
PROFESIONAL DE INGENIERO
GEOLOGO**

ASESOR:

ING. RUPERTO BENAVENTE VELASQUEZ

CUSCO – PERÚ

2025



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor ING. RUPERTO BENAVENTE VELASQUEZ
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: EVALUACION Y DETERMINACION
DEL METODO OPTIMO PARA MUESTREO DE BLASTHOLES
EN EL YACIMIENTO MINERO LAS BAMBAS APLURIMAC

Presentado por: MARIA ZORAIDA TITO RUMACCA DNI N° 45965148 ;
presentado por: RONNY RALDY HILARES QUINTANA DNI N°: 48217315
Para optar el título Profesional/Grado Académico de
INGENIERO GEOLOGO


Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de**
Similitud en la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 7 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

| Porcentaje | Evaluación y Acciones | Marque con una (X) |
|----------------|---|-------------------------------------|
| Del 1 al 10% | No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud. | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Del 11 al 30 % | Devolver al usuario para las subsanaciones. | <input type="checkbox"/> |
| Mayor a 31% | El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley. | <input type="checkbox"/> |

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto**
las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 21 de ENERO de 20..26.....


Firma

Post firma RUPERTO BENAVENTE VELASQUEZ ✓

Nro. de DNI 23.89.09.39

ORCID del Asesor 0000-0003-3686

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 27259:548165631

Hilares- Ttito

Evaluación y Determinación del Método Optimo para muestreo de Blastholes



Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:548165631

Fecha de entrega

21 ene 2026, 9:42 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

21 ene 2026, 9:46 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

Tesis Hilares, Ronny.-Ttito,María.pdf

Tamaño del archivo

6.1 MB

176 páginas

33.922 palabras

201.809 caracteres




7% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 6%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 4%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

"Dedico esta tesis a mi Madre Regina, por su amor incondicional y su apoyo constante en cada paso de mi camino. A mi papá Gregorio, a quien tengo presente en cada instante de mi vida, aunque no está conmigo físicamente. Fuiste y serás siempre un ejemplo para mí"

"A mi compañero y esposo Ronny, tu amor y esfuerzo han sido la base de nuestro hogar. Esta tesis es un tributo a la colaboración, paciencia y apoyo que me has brindado a lo largo de este viaje académico, y a nuestros hijos, Mara y Thiago, quienes son mi mayor inspiración y la razón de todo mi esfuerzo."

"A mis hermanos Yovana, Jackeline y Franklin por su apoyo en todo momento durante mis estudios"

Maria Z. Ttito Rumacca

"Dedico la finalización de esta tesis a mis padres Nicolas Hilaes y Marcelina Quintana quienes con su ejemplo y sacrificio me han enseñado los buenos valores y la constante superación"

"A mi esposa Maria Ttito quien estuvo siempre con las ganas y la fuerza necesaria para culminar este proyecto de investigación, a mis hijos Thiago y Mara gracias a ellos encontramos fuerzas para continuar"

"A mi hermana Rebeca y a mis hermanos Elber, Nico, Nestor, y Percy; a mis familiares quienes me apoyaron en mi etapa universitaria"

Ronny R. Hilaes Quintana

AGRADECIMIENTO

A Dios, por ser mi guía y fortaleza espiritual en este largo camino, gracias a él superé los momentos difíciles y me levanté para culminar con éxito

A mi alma mater, la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, por abrirme las puertas para mi formación profesional. Mi más sincera gratitud a los doctores y magísteres de la Facultad de Ingeniería Geológica gracias sus enseñanzas pude adquirir los conocimientos necesarios en el campo y en otras áreas fundamentales de mi carrera.

A mi asesor, Ing. Ruperto Benavente, por su permanente guía, por tener siempre la disponibilidad para atender nuestras consultas y guiarnos en todo este proceso.

Maria Z. Tito Rumacca

Agradecer a Dios, por la salud que me brinda para poder cumplir mis objetivos, y ser mi guía espiritual en todo momento.

A la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco por abrirme las puertas, y a los docentes de la escuela profesional de Ingeniería Geológica por su paciencia y dedicación en la enseñanza y en la motivación continua por formar buenos ingenieros.

Agradecer al área de Geología Mina de Minera Las Bambas S.A, al Superintendente, a los supervisores, y a los ingenieros geólogos de Ore Control, quienes con su paciencia y experiencia han nutrido mis conocimientos para crecer profesionalmente.

Ronny R. Hilares Quintana

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| ÍNDICE DE TABLAS..... | 9 |
| ÍNDICE DE FIGURAS | 10 |
| ÍNDICE DE FOTOS | 13 |
| RESUMEN..... | 15 |
| ABSTRACT | 16 |
| CAPÍTULO I: CONSIDERACIONES GENERALES | 17 |
| 1.1 INTRODUCCIÓN | 17 |
| 1.2 UBICACIÓN..... | 18 |
| 1.3 ACCESIBILIDAD | 20 |
| 1.4 CLIMA..... | 21 |
| 1.5 RESEÑA HISTÓRICA DE LAS BAMBAS | 22 |
| 1.5 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA..... | 24 |
| 1.5.1 Problema general | 25 |
| 1.5.2 Problemas específicos..... | 25 |
| 1.6 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN | 25 |
| 1.6.1 Objetivo general..... | 25 |
| 1.6.2 Objetivos específicos | 26 |
| 1.7 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACION | 26 |
| 1.8 HIPÓTESIS..... | 27 |
| 1.8.1 Hipótesis general | 27 |
| 1.8.2 Hipótesis específicas | 27 |
| 1.9 MÉTODO DE TRABAJO..... | 28 |
| 1.9.1 Etapa pre - campo..... | 28 |
| 1.9.2 Etapa de campo..... | 28 |
| 1.9.3 Etapa post - campo..... | 29 |
| CAPITULO II: METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION | 30 |
| 2.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN | 30 |
| 2.2 NIVEL DE INVESTIGACIÓN..... | 30 |
| 2.3 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN..... | 30 |
| 2.4 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN | 31 |
| CAPITULO III: MARCO TEORICO | 32 |
| 3.1 MARCO REFERENCIAL | 32 |
| 3.1.1 Antecedentes..... | 32 |

| | |
|--|----|
| 3.1.1.1 Antecedentes internacionales..... | 32 |
| 3.1.1.2 Antecedentes nacionales | 33 |
| 3.1.1.3 Antecedentes regionales..... | 36 |
| 3.1.1.4 Antecedentes locales..... | 38 |
| 3.2 MARCO CONCEPTUAL..... | 39 |
| 3.3 VARIABLES | 47 |
| 3.3.1 Variable independiente | 47 |
| 3.3.2 Variable dependiente..... | 47 |
| CAPITULO IV: GEOMORFOLOGIA | 48 |
| 4.1 GEOMORFOLOGÍA REGIONAL | 48 |
| 4.1.1 Montañas (Mo)..... | 50 |
| 4.1.1.1 Montañas en roca intrusiva (Mo-ri)..... | 50 |
| 4.1.1.2 Montañas en roca sedimentaria (Mo-rs)..... | 50 |
| 4.1.1.3 Montaña estructural en roca sedimentaria (Mo-es) | 51 |
| 4.1.2 Colinas y lomadas (CL) | 52 |
| 4.1.2.1 Colinas y lomadas en roca volcánica (CL-rv)..... | 53 |
| 4.1.2.2 Morrenas (CL-mo)..... | 54 |
| 4.1.3 Piedemontes (Pi)..... | 54 |
| 4.1.3.1 Vertientes coluvio – deluvial (Pi-vc)..... | 54 |
| 4.1.3.2 Abanicos de piedemonte (Pi-ap) | 55 |
| 4.1.4 Planicies y depresiones (PD) | 55 |
| 4.1.4.1 Superficies de flujo piroclástico (PD-sp) | 55 |
| 4.1.4.2 Terrazas aluviales (PD-ta)..... | 56 |
| 4.1.4.3 Terrazas indiferenciadas (PD-ti) | 56 |
| 4.1.4.4 Valles glaciares (PD-vg) | 56 |
| 4.1.4.5 Rios o planicies aluviales (PD-pa)..... | 57 |
| 4.2 GEOMORFOLOGÍA LOCAL..... | 57 |
| 4.3 PENDIENTES DEL TERRENO..... | 58 |
| CAPÍTULO V: MARCO GEOLOGICO REGIONAL Y LOCAL | 61 |
| 5.1 ESTRATIGRAFÍA REGIONAL..... | 61 |
| 5.1.1 Formación Chuquibambilla (Fm-Ch)..... | 63 |
| 5.1.2 Formación Soraya (Fm-So)..... | 64 |
| 5.1.3 Formación Mara (Fm-Ma)..... | 65 |
| 5.1.4 Formación Ferrobamba (Fm-Fe)..... | 67 |

| | | |
|------------------------------|---|-----|
| 5.1.5 | Volcánicos Vilcarani (Vol-Vi) | 69 |
| 5.1.6 | Morrenas y depósitos fluvio – glaciales (Qr-mf) | 71 |
| 5.2 | ROCAS INTRUSIVAS A NIVEL REGIONAL | 71 |
| 5.2.1 | Dioritas (Dgfmz) | 71 |
| 5.2.2 | Granodioritas (Dgfmz) | 72 |
| 5.2.3 | Pórfido cuarzo – feldespato (Dgfmz) | 72 |
| 5.2.4 | Monzonitas (Dgzmz) | 73 |
| 5.2.5 | Fases tardías (Ft) | 74 |
| 5.3 | GEOLOGIA LOCAL | 75 |
| 5.3.1 | Formación Ferrobamba (Fm-Fe) | 76 |
| 5.3.2 | Fases Monzoníticas | 80 |
| 5.3.2.1 | Monzonita biotítica (MZB) | 81 |
| 5.3.2.2 | Monzonita biotítica fina (MBF) | 83 |
| 5.3.2.4 | Monzonita máfica (MZM) | 84 |
| 5.3.2.5 | Monzonita hornbléndica (MZH) | 86 |
| 5.3.2.6 | Monzonita cuarzosa (MZQ) | 88 |
| 5.3.3 | Rocas de metamorfismo y metasomatismo de contacto | 90 |
| 5.3.3.1 | Metamorfismo de contacto | 90 |
| 5.3.3.1.1 | <i>Endoskarn (ENDO)</i> | 90 |
| 5.3.3.1.2 | <i>Mármol (MBL)</i> | 91 |
| 5.3.3.1.3 | <i>Mármol con calcosilicatos (MBC)</i> | 93 |
| 5.3.3.2 | Metasomatismo de contacto | 93 |
| 5.3.3.2.1 | <i>Skarn de granates (SK)</i> | 94 |
| 5.3.3.2.2 | <i>Skarn de piroxenos (SK)</i> | 97 |
| 5.4 | GEOLOGÍA ESTRUCTURAL | 99 |
| 5.4.1 | Geología estructural regional | 99 |
| 5.4.2 | Geología estructural local | 101 |
| 5.5 | METALOGENIA | 105 |
| CAPÍTULO VI: GEOLOGÍA MINERA | | 109 |
| 6.1 | GENERALIDADES | 109 |
| 6.2 | PERFORACIÓN DE BLASTHOLES | 110 |
| 6.3 | MUESTREO | 112 |
| 6.4 | CARACTERIZACIÓN LITOLÓGICA | 114 |
| 6.5 | VOLADURA DE MALLAS | 116 |

| | | |
|---|--|-----|
| 6.6 | CLASIFICACION DE MATERIALES..... | 117 |
| 6.7 | CARGUÍO Y ACARREO DE MATERIALES | 117 |
| 6.8 | PROCESAMIENTO DE MINERAL EN PLANTA CONCENTRADORA..... | 119 |
| CAPÍTULO VII: MÉTODOS DE MUESTREO DE BLASTHOLES..... | | 121 |
| 7.1 | GENERALIDADES..... | 121 |
| 7.2 | RECOLECCIÓN DE MUESTRAS O EJECUCIÓN DEL MUESTREO..... | 123 |
| 7.2.1 | Recursos humanos..... | 123 |
| 7.2.2 | Materiales y equipos..... | 123 |
| 7.2.3 | Definición del proceso y selección de zonas a muestrear..... | 124 |
| 7.2.4 | Preparación de área de muestreo..... | 124 |
| 7.3 | DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS DE MUESTREO | 125 |
| 7.3.1 | Muestreo con auger | 126 |
| 7.3.2 | Muestreo con tubo..... | 126 |
| 7.3.3 | Muestreo por canal | 127 |
| 7.3.4 | Muestreo del cono o blasthole completo | 128 |
| 7.4 | CUARTEO DE MUESTRAS | 131 |
| 7.5 | CODIFICACIÓN Y ENVÍO DE MUESTRAS A LABORATORIO | 133 |
| CAPÍTULO VIII: ASEGURAMIENTO Y CONTROL DE CALIDAD (QA/QC) | | 136 |
| 8.1 | GENERALIDADES..... | 136 |
| 8.2 | ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD (QA)..... | 137 |
| 8.3 | CONTROL DE CALIDAD (QC)..... | 138 |
| 8.3.1 | Blancos..... | 139 |
| 8.3.2 | Estándares..... | 140 |
| 8.3.3 | Duplicados de campo..... | 144 |
| 8.3.4 | Control de pesos..... | 145 |
| CAPÍTULO IX: ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | | 146 |
| 9.1 | GENERALIDADES..... | 146 |
| 9.2 | EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS DE MUESTREO | 147 |
| 9.2.1 | Parámetros estadísticos básicos | 147 |
| 9.2.1.1 | Promedio o media aritmética..... | 148 |
| 9.2.1.2 | Coeficiente de variación | 150 |
| 9.2.1.3 | Desviación estándar de la población | 152 |
| 9.2.1.4 | Coeficiente de correlación lineal | 154 |
| 9.2.1.5 | Covarianza | 155 |

| | |
|--|-----|
| 9.2.2 Gráficos de correlación lineal de leyes para métodos de muestreo: auger, tubo y canal vs leyes del cono total..... | 156 |
| 9.2.2.1 Correlación lineal de leyes para el método del auger..... | 157 |
| 9.2.2.1.1 Auger vs cono total para Cu..... | 157 |
| 9.2.2.1.2 Auger vs cono total para Ag..... | 158 |
| 9.2.2.1.3 Auger vs cono total para Mo | 159 |
| 9.2.2.2 Correlación lineal de leyes para el método del tubo | 160 |
| 9.2.2.2.1 Tubo vs cono total para Cu | 161 |
| 9.2.2.2.2 Tubo vs cono total para Ag | 162 |
| 9.2.2.2.3 Tubo vs cono total para Mo | 163 |
| 9.2.2.3 Correlación lineal de leyes para el método del canal | 164 |
| 9.2.2.3.1 Canal vs cono total para Ag..... | 165 |
| 9.2.2.3.2 Canal vs cono total para Ag..... | 166 |
| 9.2.2.3.3 Canal vs cono total para Mo | 167 |
| CONCLUSIONES..... | 168 |
| RECOMENDACIONES..... | 169 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 170 |
| ANEXOS | 173 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| TABLA 1 <i>UBICACIÓN POLÍTICA DEL ÁREA DE ESTUDIO</i> | 19 |
| TABLA 2 <i>LÍMITES DEL ÁREA DE ESTUDIO, YACIMIENTO FERROBAMBA</i> | 19 |
| TABLA 3 <i>ACCESIBILIDAD AL ÁREA DE ESTUDIO</i> | 20 |
| TABLA 4 <i>PENDIENTES DEL TERRENO DEL ÁREA DE ESTUDIO</i> | 58 |
| TABLA 5 <i>TIPOS DE LITOLOGÍA IDENTIFICADOS EN EL YACIMIENTO MINERO LAS BAMBAS - FERROBAMBA</i> | 115 |
| TABLA 6 <i>CLASIFICACIÓN DE MATERIALES EN EL YACIMIENTO MINERO LAS BAMBAS - FERROBAMBA</i> | 117 |
| TABLA 7 <i>VALORES DE DENSIDAD POR TIPO LITOLÓGICO, EN EL TAJO FERROBAMBA</i> | 122 |
| TABLA 8 <i>DESCRIPCIÓN DE TIPOS DE ERRORES, CAUSAS QUE GENERAN Y COMO MINIMIZARLOS</i> | 138 |
| TABLA 9 <i>EJEMPLO PARA VISUALIZAR DATOS OBTENIDOS LUEGO DEL MUESTREO Y RESPECTIVO ANÁLISIS QUÍMICO. EL EJEMPLO MUESTRA LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO, PARA UN BLASTHOLE</i> | 149 |
| TABLA 10 <i>RESULTADOS DE CÁLCULO DE COEFICIENTE DE VARIACIÓN OBTENIDOS PARA CADA TIPO DE MUESTREO COMPARADO CON LA LEY DEL CONO TOTAL, POR ELEMENTO ANALIZADO Y POR RANGO DE LEYES</i> | 151 |
| TABLA 11 <i>RESULTADOS OBTENIDOS LUEGO DEL CÁLCULO DE COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LOS DATOS TOTALES. EN ESTE CASO NO SE TOMA EN CUENTA LOS RANGOS DE LEYES</i> | 152 |
| TABLA 12 <i>RESULTADOS DE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LAS POBLACIONES DE MUESTRAS CALCULADAS PARA CADA MÉTODO DE MUESTREO Y POR ELEMENTO</i> | 153 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| FIGURA 1 UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS, ADAPTADAS DE LA DATA INGEMMET..... | 49 |
| FIGURA 2 COLUMNA ESTRATIGRÁFICA REGIONAL DEL YACIMIENTO MINERO LAS BAMBAS | 63 |
| FIGURA 3 COLUMNA ESTRATIGRÁFICA LOCAL DE LA FORMACIÓN FERROBAMBA LEVANTADA EN LA LAGUNA CCOMERCCOCHA (CARLOTTO Y OTROS, 2006) | 79 |
| FIGURA 4 DOMINIOS TECTÓNICOS – ESTRUCTURALES DEL SUR DEL PERU (CARLOTTO, 2009) . | 100 |
| FIGURA 5 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL DEL YACIMIENTO FERROBAMBA..... | 104 |
| FIGURA 6 MAPA METALOGÉNÉTICO DEL PERU, (ADAPTADO DE ACOSTA Y OTROS, 2021) | 108 |
| FIGURA 7 PLANO DE DISEÑO DE MALLA DE PERFORACIÓN, ELABORADA POR PLANEAMIENTO MINA. IMAGEN OBTENIDA DEL ÁREA PLANEAMIENTO MINA – LAS BAMBAS | 110 |
| FIGURA 8 PERFORADORA DE ROTACIÓN EJECUTANDO EL TRABAJO DE PERFORACIÓN CON INCLINACIÓN VERTICAL | 111 |
| FIGURA 9 ESQUEMA DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE MUESTRAS DE BLASTHOLES EN LABORATORIO | 114 |
| FIGURA 10 POLÍGONOS DE MINADO DISEÑADOS POR EL ÁREA DE GEOLOGÍA MINA. ESTA IMAGEN MUESTRA EL PRODUCTO FINAL QUE EL ÁREA DE GEOLOGÍA MINA ENTREGA A OPERACIONES MINA | 118 |
| FIGURA 11 ILUSTRACIÓN DEL PROCESO METALÚRGICO MOSTRANDO DESDE EL INICIO (CHANCADO) HASTA LA OBTENCIÓN DEL PRODUCTO FINAL (CONCENTRADO DE CU). | 120 |
| FIGURA 12 ILUSTRACIÓN PARA REALIZAR LA DIVISIÓN DE SECCIONES A MUESTREAR. LAS SECCIONES SE MARCAN CON PINTURA, EN FORMA RADIAL..... | 129 |
| FIGURA 13 ESQUEMA DE CUARTEO PARA LA OBTENCIÓN DE MUESTRAS FINALES | 131 |
| FIGURA 14 HOJA DE CONTROL INTERNO PARA ENVÍO DE MUESTRAS A LABORATORIO. ESTE LOTE DE MUESTRAS CORRESPONDE AL MUESTREO DE UN CONO DE UN BLASTHOLE | 135 |
| FIGURA 15 GRÁFICO DE CONTROL DE BLANCOS PARA CU. LOS VALORES DE CU PARA LOS BLANCOS NO DEBEN EXCEDER 0.005 % CU..... | 140 |
| FIGURA 16 GRÁFICO DE ESTÁNDARES DE BAJA LEY. INCLUYE EL VALOR CONOCIDO DE LA MUESTRA (LÍNEA VERDE CONTINUA), LOS LÍMITES DE VARIACIÓN DE ÉSTOS (DESVIACIÓN ESTÁNDAR), Y LOS VALORES OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS QUÍMICO (PUNTOS AZULES). | 142 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 17 GRÁFICO DE ESTÁNDARES DE MEDIA LEY. INCLUYE EL VALOR CONOCIDO DE LA MUESTRA (LÍNEA VERDE CONTINUA), LOS LÍMITES DE VARIACIÓN DE ÉSTOS (DESVIACIÓN ESTÁNDAR), Y LOS VALORES OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS QUÍMICO (PUNTOS AZULES). | 143 |
| FIGURA 18 GRÁFICO DE ESTÁNDARES DE ALTA LEY. INCLUYE EL VALOR CONOCIDO DE LA MUESTRA (LÍNEA VERDE CONTINUA), LOS LÍMITES DE VARIACIÓN DE ÉSTOS (DESVIACIÓN ESTÁNDAR), Y LOS VALORES OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS QUÍMICO (PUNTOS AZULES). | 144 |
| FIGURA 19 CUADRO RESUMEN DE MUESTRAS ENVIADAS A LABORATORIO POR MÉTODO DE MUESTREO, Y MUESTRAS DE CONTROL INSERTADOS..... | 147 |
| FIGURA 20 FÓRMULA PARA CALCULAR EL PROMEDIO ARITMÉTICO O MEDIA ARITMÉTICA | 148 |
| FIGURA 21 FÓRMULA PARA CALCULAR EL COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE UNA POBLACIÓN DE MUESTRAS..... | 150 |
| FIGURA 22 FÓRMULA PARA CALCULAR COEFICIENTE DE VARIACIÓN PARA PARES DE MUESTRAS | 150 |
| FIGURA 23 FÓRMULA PARA CALCULAR LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE UNA POBLACIÓN DE MUESTRAS | 153 |
| FIGURA 24 ILUSTRACIÓN GRÁFICA DE CORRELACIÓN LINEAL DE DATOS MOSTRANDO LA ORIENTACIÓN DE LA LÍNEA DE REGRESIÓN SEGÚN LOS VALORES DE ÍNDICE O COEFICIENTE DE CORRELACIÓN . | 154 |
| FIGURA 25 FÓRMULA PARA CALCULAR EL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL DE DATOS. TAL COMO SE MUESTRA EN LA FORMULA SE UTILIZA PARA COMPARAR PARES DE DATOS Y SU INTENSIDAD DE CORRELACIÓN. | 155 |
| FIGURA 26 FÓRMULA PARA CALCULAR LA COVARIANZA DE DATOS QUE SIRVE PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN | 155 |
| FIGURA 27 COMPARACIÓN DE LEYES DE CU MUESTREADO POR EL MÉTODO DEL AUGER VS LEYES OBTENIDOS DE LA EXTRACCIÓN DEL CONO TOTAL | 158 |
| FIGURA 28 COMPARACIÓN DE LEYES DE AG MUESTREADO POR EL MÉTODO DEL AUGER VS LEYES OBTENIDOS DE LA EXTRACCIÓN DEL CONO TOTAL | 159 |
| FIGURA 29 COMPARACIÓN DE LEYES DE MO MUESTREADO POR EL MÉTODO DEL AUGER VS LEYES OBTENIDOS DE LA EXTRACCIÓN DEL CONO TOTAL | 160 |
| FIGURA 30 COMPARACIÓN DE LEYES DE CU MUESTREADO POR EL MÉTODO DEL TUBO VS LEYES OBTENIDOS DE LA EXTRACCIÓN DEL CONO TOTAL | 161 |
| FIGURA 31 COMPARACIÓN DE LEYES DE AG MUESTREADO POR EL MÉTODO DEL TUBO VS LEYES OBTENIDOS DE LA EXTRACCIÓN DEL CONO TOTAL | 162 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 32 <i>COMPARACIÓN DE LEYES DE M_o MUESTREADO POR EL MÉTODO DEL TUBO VS LEYES OBTENIDOS DE LA EXTRACCIÓN DEL CONO TOTAL</i> | 163 |
| FIGURA 33 <i>COMPARACIÓN DE LEYES DE C_u MUESTREADO POR EL MÉTODO DEL CANAL VS LEYES DEL CONO TOTAL</i> | 165 |
| FIGURA 34 <i>COMPARACIÓN DE LEYES DE A_g MUESTREADO POR EL MÉTODO DEL CANAL VS LEYES OBTENIDOS DE LA EXTRACCIÓN DEL CONO TOTAL</i> | 166 |
| FIGURA 35 <i>COMPARACIÓN DE LEYES DE M_o MUESTREADO POR EL MÉTODO DEL CANAL VS LEYES OBTENIDOS DE LA EXTRACCIÓN DEL CONO TOTAL</i> | 167 |

ÍNDICE DE FOTOS

| | |
|--|----|
| Foto 1 VISTA DE LAS INSTALACIONES DEL CAMPAMENTO MINERO ANTA WASI EN EL MES DE FEBRERO 2024..... | 22 |
| Foto 2 RELIEVE DEL PAISAJE AL NOROESTE DEL TAJO FERROBAMBA..... | 52 |
| Foto 3 RELIEVE DEL PAISAJE AL SUR DEL TAJO FERROBAMBA Y ALREDEDORES DEL POBLADO DE CHALHUAHUACHO | 53 |
| Foto 4 AFLORAMIENTO DE ROCAS DE LA COLUMNA ESTRATIGRÁFICA REGIONAL EN LAS CERCANÍAS DE CHALHUAHUACHO. | 65 |
| Foto 5 AFLORAMIENTO DE LA FORMACIÓN MARA (FM-Ma), FORMACIÓN FERROBAMBA (FM-Fe) Y VOLCÁNICOS VILCARANI (VOL-Vi), EN LAS PERIFERIAS DE CHALLHUAHUACHO, VISTA AL SUR..... | 67 |
| Foto 6 AFLORAMIENTO DE LA FORMACIÓN MARA (FM-Ma), FORMACIÓN FERROBAMBA (FM-Fe), VOLCÁNICOS VILCARANI (VOL-Vi), Y DEPÓSITOS ALUVIALES (DEP-AL) EN LAS PERIFERIAS DE CHALLHUAHUACHO | 68 |
| Foto 7 AFLORAMIENTOS DE LOS VOLCÁNICOS VILCARANI (VOL-Vi) AL SURESTE DEL TAJO FERROBAMBA (A) Y AL NORESTE DE CHALHUAHUACHO (B) | 70 |
| Foto 8 MUESTRA DE MANO DE IGNIMBRITA, PERTENECIENTE A LA UNIDAD LITOLÓGICA VOLCÁNICOS VILCARANI | 70 |
| Foto 9 VISTAS PANORÁMICAS DEL TAJO FERROBAMBA, FLANCO OESTE (A) Y ZONA ESTE (B)..... | 80 |
| Foto 10 FOTO DE LOS TALUDES DE LA ZONA OESTE DEL TAJO FERROBAMBA | 82 |
| Foto 11 ZONA DE CONTACTO ENTRE MONZONITA BIOTÍTICA (MZB) Y SKARN (SK) DE GRANATES | 83 |
| Foto 12 MUESTRA DE MANO DE MONZONITA BIOTÍTICA FINA (MBF), CON ALGUNOS CRISTALES DE BIOTITA Y VENILLAS DE CUARZO | 84 |
| Foto 13 MUESTRA DE MANO (A) Y TESTIGO DIAMANTINO (B) DE LA MONZONITA MÁFICA (MZM)..... | 86 |
| Foto 14 MUESTRA DE MANO DE MONZONITA HORNBLÉNDICA (MZH), RECOLECTADA EN LA PARTE CENTRAL DEL TAJO FERROBAMBA | 87 |
| Foto 15 AFLORAMIENTO DE DIQUES DE MONZONITA CUARZOSA EN LADO OESTE DEL TAJO FERROBAMBA..... | 88 |
| Foto 16 MUESTRA DE MANO DE MONZONITA CUARZOSA (MZQ) | 89 |
| Foto 17 MUESTRA DE MANO DE ENDOSKARN | 91 |
| Foto 18 MUESTRA DE MANO DE MÁRMOL CON MINERALIZACIÓN DE BORNITA EN VENILLAS (A) Y CALCOPIRITA EN FRACTURAS (B)..... | 92 |

| | |
|---|-----|
| Foto 19 MUESTRA DE MANO DE MÁRMOL EN ZONA DE ALTERACIÓN RETRÓGRADA | 93 |
| Foto 20 MUESTRA DE MANO DE SKARN DE GRANATES DE GRANO FINO (A) Y GRUESO (B) CON BORNITA MAYOR QUE CALCOPIRITA | 96 |
| Foto 21 AFLORAMIENTO DE SKARN DE GRANATES EN ZONA OXIDADA | 97 |
| Foto 22 MUESTRAS DE MANO DE SKARN DE PIROXENOS CON COBRE NATIVO (A) Y MINERALIZACIÓN DE CALCOPIRITA Y BORNITA (B) | 98 |
| Foto 23 VISTA DEL ANTICLINAL DEL LADO OESTE DEL TAJO FERROBAMBA | 105 |
| Foto 24 VISTA DEL YACIMIENTO FERROBAMBA EN ETAPA DE EXPLORACIÓN (VISTA AL NORTE) | 107 |
| Foto 25 CONO DE DETRITOS O BLASTHOLE CON INSERCIONES LUEGO DEL MUESTREO CON AUGER . | 112 |
| Foto 26 CORTE EN CANAL DE UN BLASTHOLE..... | 116 |
| Foto 27 PROYECTO DE PERFORACIÓN ANTES Y DESPUÉS DE LA VOLADURA | 116 |
| Foto 28 EQUIPOS DE CARGUÍO Y ACARREO EN EL YACIMIENTO MINERO LAS BAMBAS – FERROBAMBA | 119 |
| Foto 29 TENDIDO DE PLÁSTICO ANTES DE LA PERFORACIÓN PARA EVITAR CONTAMINACIÓN | 125 |
| Foto 30 BLASTHOLE LUEGO DE LA PERFORACIÓN..... | 125 |
| Foto 31 MUESTREO POR MÉTODO DEL AUGER Y REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LAS INSERCIONES | 126 |
| Foto 32 MUESTREO POR EL MÉTODO DEL TUBO Y REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LAS INSERCIONES..... | 127 |
| Foto 33 MUESTREO POR EL MÉTODO DEL CANAL Y REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL CORTE DE LA SECCIÓN..... | 127 |
| Foto 34 DIVISIÓN DE SECCIONES EN LOS BLASTHOLES PREVIO A LA EXTRACCIÓN DE MUESTRAS DEL CONO TOTAL..... | 129 |
| Foto 35 ENUMERACIÓN DE SACOS LUEGO DE LA EXTRACCIÓN DE SECCIONES | 130 |
| Foto 36 PESADO DE SACOS CON MUESTRAS ANTES DEL CUARTEO | 130 |
| Foto 37 PROCESO DE CUARTEO DE MUESTRAS CON EL USO DEL CUARTEADOR RIFFLEX..... | 132 |
| Foto 38 DISTRIBUCIÓN PROPORCIONAL DE DETRITOS QUE NO PASAN EL CUARTEADOR | 133 |

RESUMEN

El presente trabajo “EVALUACION Y DETERMINACION DEL METODO OPTIMO PARA MUESTREO DE BLASTHOLES EN EL YACIMIENTO MINERO LAS BAMBAS APURIMAC” tiene como base principal la diferencia considerable en reconciliación de leyes de cobre entre el material enviado de Mina y el procesado en Planta Concentradora. Se ha planteado realizar estudios dentro del proceso productivo de Las Bambas, para validar la correcta aplicación de conocimientos. Uno de los estudios consiste en evaluar el actual método de muestreo de blastholes para determinar si es adecuado para ser empleado, se realizó una serie de pruebas de muestreo empleando los métodos más conocidos en explotación minera a tajo abierto: auger, tubo, y canal, así como la extracción del cono completo.

El objetivo principal del presente estudio es evaluar y determinar el método óptimo para muestreo de blastholes en el Yacimiento Minero Las Bambas - Apurímac.

En la presente investigación se ha empleado el tipo de metodología aplicada, nivel descriptivo correlacional, diseño experimental, y enfoque cuantitativo; y para desarrollar el trabajo se utilizó la metodología dividida en tres etapas: pre - campo, campo y post - campo.

Se ha realizado el ensayo en 57 blastholes (26 en pórfido y 31 en skarn). Luego de la comparación estadística entre leyes del cono completo y las obtenidas por los métodos: auger, tubo, canal; se concluye que el muestreo por el método del tubo obtiene menor variación y mejor correlación con respecto a la ley del cono completo.

PALABRAS CLAVE: Reconciliación, Planta concentradora, Tajo abierto, Blasthole.

ABSTRACT

This work "Evaluation and Determination of the Optimal Method for Blasthole Sampling at the Las Bambas Mining Deposit Apurímac," is primarily based on the considerable difference in copper grade reconciliation between the material sent from the mine and that processed at the concentrator plant. Studies were undertaken within the Las Bambas production process to validate the correct application of knowledge. One of these studies involved evaluating the current blasthole sampling method to determine its suitability, a series of sampling tests were conducted using the most common methods in open-pit mining: auger, tube, and channel sampling, as well as whole-cone extraction.

The main objective of this study is to evaluate and determine the optimal method for blasthole sampling in the Las Bambas Mining Deposit – Apurímac.

In the present investigation, the applied methodology type, descriptive correlational level, experimental design, and quantitative approach have been used; and to develop the work, the methodology was divided into three stages: pre-field, field and post-field.

The test was performed on 57 blastholes (26 in porphyry and 31 in skarn). After statistical comparison between full cone grade and those obtained by the auger, tube, and channel methods, it was concluded that sampling by the tube method yields less variation and better correlation with respect to the full cone grade.

KEYWORDS: Reconciliation, Concentrator plant, Open pit, Blasthole.

CAPÍTULO I: CONSIDERACIONES GENERALES

1.1 INTRODUCCIÓN

El presente estudio denominado **“EVALUACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL MÉTODO OPTIMO PARA MUESTREO DE BLASTHOLES EN EL YACIMIENTO MINERO LAS BAMBAS – APURÍMAC”**, se realizó en el marco de las revisiones de todo el proceso de producción del concentrado de cobre en los cuales se había evidenciado diferencias en reconciliación de leyes de Cu, entre las leyes reportadas por Planta Concentradora y las leyes enviadas del tajo.

El muestreo de blastholes (cono de detritos) en el yacimiento Las Bambas – Apurímac, es parte importante del proceso de definición de tipos de materiales, ya que con ello se definen los destinos de cada camión minero que sale del tajo. Durante el proceso de muestreo se debe tener el cuidado necesario para obtener la porción de material representativo del blasthole, y esto ayudara a cuantificar la ley de Cu y el tonelaje de la reserva de mineral, y adicionalmente ayudara a discriminar el mineral y desmonte.

El método actual que se utiliza en el muestreo de blastholes es el auger, por tratarse de una operación minera reciente, no se cuenta con un estudio que valide el método adecuado para su utilización. El estudio de métodos de muestreo en operaciones mineras es fundamental porque es parte importante en la generación de modelos geológicos de corto plazo y en la cuantificación de reserva mineral, una incorrecta aplicación del método podría costar millones de soles a la empresa minera.

El fin de objeto de la investigación es evaluar y determinar el método óptimo para muestreo de blastholes en el Yacimiento Minero Las Bambas ubicado en la región Apurímac. La

presente investigación se limita al estudio y evaluación de métodos de muestreo de blastholes en las operaciones mineras del yacimiento Las Bambas – Apurímac.

1.2 UBICACIÓN

El yacimiento Minero Las Bambas – Ferrobamba se encuentra en la región suroriental del Perú, elevándose hasta los 3700 metros sobre el nivel del mar, en la región Apurímac. Traspasa las tierras de Grau y Cotabambas, abarcando los distritos de Progreso (Grau), Challhuahuacho y Coyllurqui (Cotabambas). El territorio analizado abarca una extensión de 935 hectáreas, situado a 565 kilómetros al sureste de Lima y 73 kilómetros al suroeste de Cusco.

Es un yacimiento tipo pórfido – skarn de Cu, Mo, Ag, y es uno de los yacimientos mineros más importantes del sur del Perú, incluye activos mineros como Ferrobamba, Chalcobamba, Sulfobamba y Charcas. Actualmente se encuentran en etapa de producción los activos Ferrobamba y Chalcobamba, el principal producto es el concentrado de Cu, con elementos secundarios como Mo, Ag, Zn, Au. La etapa de producción inició oficialmente a mediados del año 2016, habiéndose realizado pruebas desde diciembre 2015.

Las altitudes varían entre los 3700 y 4765 m.s.n.m. Según la carta geológica nacional, el área está ubicado en la zona norte del cuadrángulo de Santo Tomas, en la hoja 29-r.

La litología del yacimiento Ferrobamba está conformada principalmente por calizas de la formación Ferrobamba que abarca gran parte del área, intrusivos monzoníticos, skarn, y algunas zonas constituidas de rocas volcánicas hacia la parte externa del tajo.

TABLA 1*UBICACIÓN POLÍTICA DEL ÁREA DE ESTUDIO*

| Región | Provincia | Distrito | Poblado |
|---------------|------------------|--------------------------------|----------------|
| Apurímac | Cotabambas | Challhuahuacho y Coyllurqui | Fuerabamba |

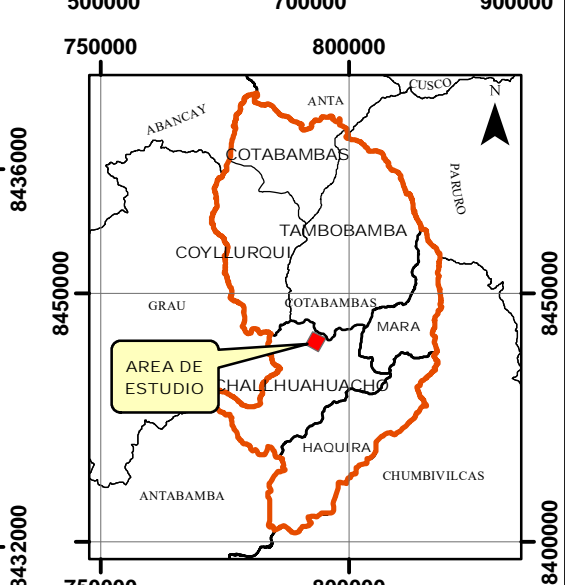
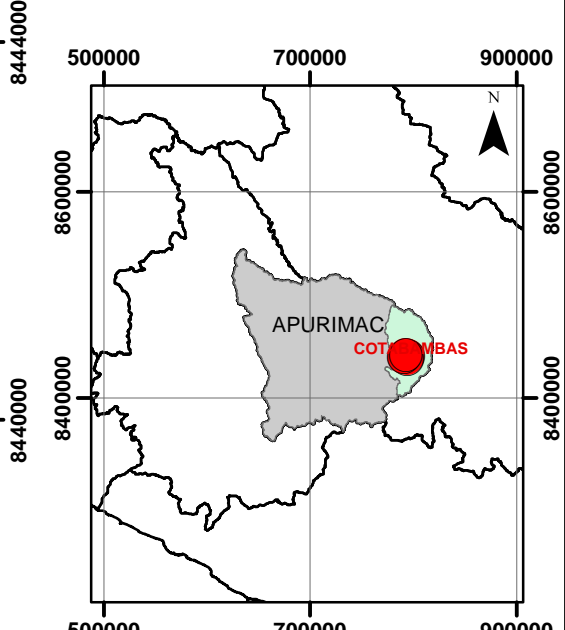
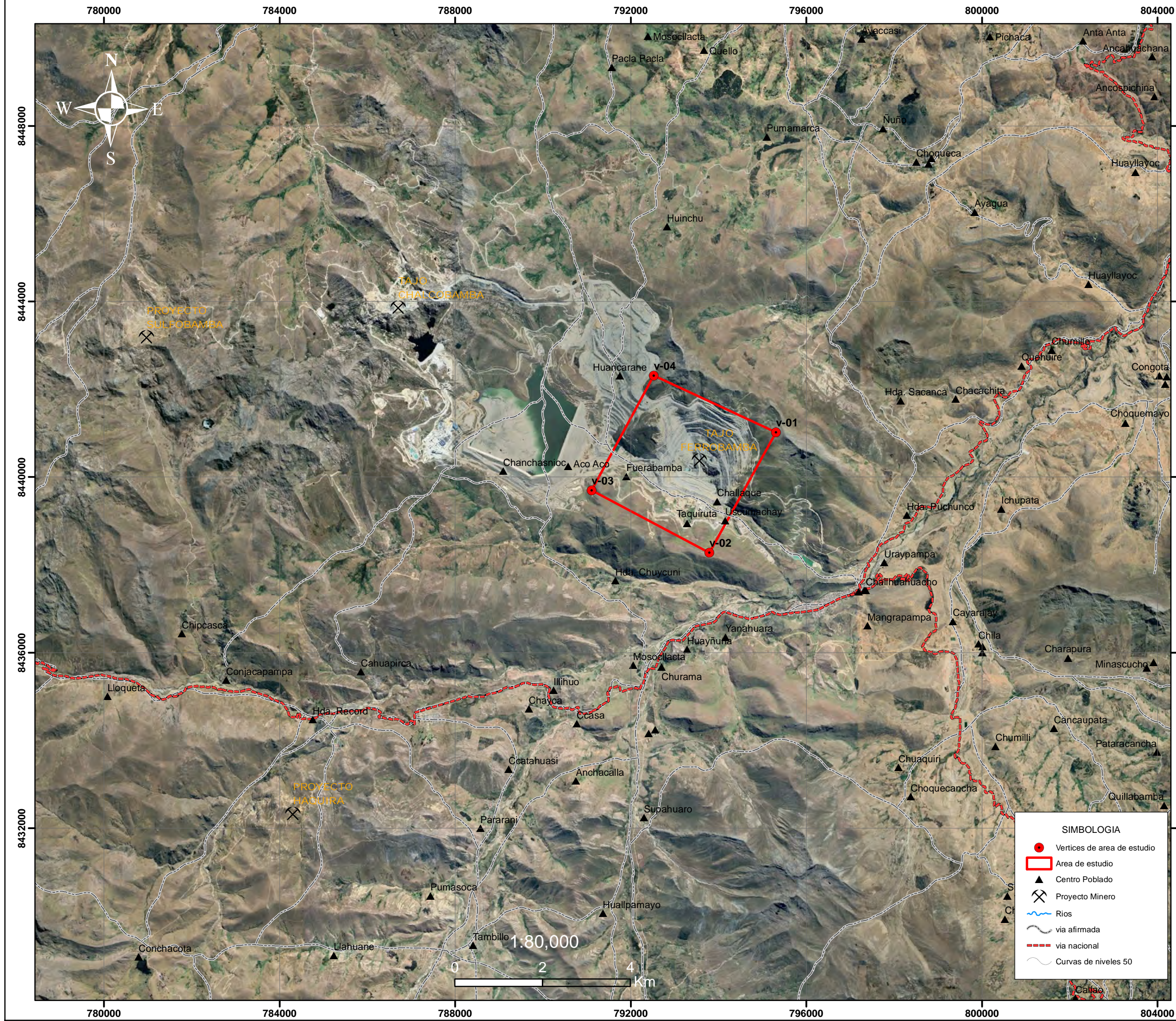
(Fuente: Elaboración propia)



El área analizada se encuentra en el distrito de Chalhuahuacho, en el corazón oriental de la región Apurímac, a una altitud que fluctúa entre los 3700 y 4650 metros sobre el nivel del mar, y está marcada por las coordenadas geográficas siguientes (ver tabla 2).

TABLA 2*LÍMITES DEL ÁREA DE ESTUDIO, YACIMIENTO FERROBAMBA*

| Área de estudio | Coordenadas UTM | Coordenadas UTM | Altitud (m.s.n.m) |
|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|
| | Este (m) | Norte (m) | |
| 935 ha | 795308 | 8441019 | 4345 |
| | 793788 | 8438280 | 4033 |
| | 791102 | 8439698 | 4082 |
| | 792523 | 8442313 | 4295 |

(Fuente: Elaboración propia. Datum WGS 84 – zona 18S)



| | | | | | |
|--|--|------------------------|---|------------------------|--|
|  | | |  | | |
| UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABADEL CUSCO | | | | | |
| FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGICA | | | | | |
| ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA | | | | | |
| EVALUACION Y DETERMINACION DEL METODO OPTIMO PARA MUESTREO DE BLASTHOLES EN EL YACIMIENTO MINERO LAS BAMBAS - APURIMAC | | | | | |
| UBICACIÓN | | ELABORADO POR: | | ASESOR: | |
| DEPARTAMENTO: APURIMAC | | BACH. RONNY R. HILARES | | ING. RUPERTO BENAVENTE | |
| PROVINCIA: COTABAMBAS | | BACH. MARIA Z. TITO | | MAPA: UBICACIÓN | |
| DISTRITO: CHALHUAHUACHO | | RUMACCA | | FECHA: Dic-25 | |
| ESCALA: INDICADA | | FECHA: Dic-25 | | MAPA: 1 | |

1.3 ACCESIBILIDAD

Para llegar al área de estudio, hay muchas alternativas disponibles, teniendo en cuenta que es una mina en producción, sin duda es muy necesario para el abastecimiento de insumos o productos para el proceso industrial o el transporte del concentrado.

Hay dos vías de acceso para ingresar a la zona: vía aérea y por tierra:

Vía aérea, se cuenta con un helipuerto dentro de la propiedad minera a donde se puede llegar en 25 minutos en promedio desde la ciudad del Cusco.

Vía terrestre, existen un total de cinco rutas más conocidas para llegar en un vehículo por carretera, desde las ciudades de Abancay, Cusco y Arequipa. Las horas de viaje a la zona varían de 7 a 10 horas, dependiendo del lugar de origen. Seguidamente, se muestra en la tabla 3 estas alternativas:

TABLA 3

ACCESIBILIDAD AL ÁREA DE ESTUDIO

| Rutas | Distancia (km) | Condición de vía | Tiempo de viaje promedio |
|---|-------------------|----------------------|-----------------------------|
| Cusco – Cotabambas – Tambobamba – Challhuahuacho – Las Bambas. | 250 | Asfaltada – afirmada | 07 h 00 min |
| Cusco – Cotabambas – Ñahuinlla – Pamputa – Las Bambas. | 240 | Asfaltada – afirmada | 07 h 30 min |
| Cusco – Yaurisque – Ccoyabamba – Ccapacmarca – Mara – Challhuahuacho – Las Bambas. | 220 | Asfaltada – afirmada | 06 h 30 min |
| Abancay – Lambrama – Chuquibambilla – Progreso – Challhuahuacho – Las Bambas. | 273 | Asfaltada – afirmada | 08 h 00 min |
| Arequipa – Imata – Espinar – Velille – Santo Tomas – Haquira – Challhuahuacho – Las Bambas. | 458 | Asfaltada – afirmada | 10 h 30 min |

(Fuente: Elaboración propia)

1.4 CLIMA

El clima del área del yacimiento Las Bambas es relativamente variado y se caracteriza por los periodos típicos de la sierra peruana tales como: lluvioso, frío y seco. Por lo general, la humedad relativa en la sierra se mantiene por debajo del 90%, lo que indica que el clima en el área de estudio es predominantemente seco (MMG Las Bambas, 2024).

El periodo de lluvias suele comenzar en octubre, alcanzando su máxima intensidad entre diciembre y marzo. De abril a septiembre, las temperaturas diurnas experimentan variaciones significativas, oscilando entre 3°C por la mañana y 25°C al mediodía. Durante la noche, las temperaturas caen por debajo de 0°C en las madrugadas. Es frecuente ver instalaciones industriales y campamentos mineros cubiertos de nieve durante los meses fríos, se puede presenciar cobertura de neblina en el campamento Anta Wasi (4000 m.s.n.m) pero no así en el tajo Ferrobamba por estar a menos altura que el campamento, el agua de los estanques es congelado. Específicamente dentro del tajo Ferrobamba, en época de lluvia se tiene complicaciones en el tránsito de equipos livianos y pesados, debido a la acumulación de lodos y formación de agua de escorrentía que hacen las vías resbaladizas e inseguras (MMG Las Bambas, 2024).

Las descargas eléctricas son consideradas de alto riesgo en el área de estudio. En zonas altas las descargas eléctricas son frecuentes, no es necesario ver el cielo nublado para esperar una descarga, es decir se puede presentar en días soleados, dificultando la detección de los equipos de monitoreo de tormentas eléctricas y el lanzamiento de alerta (MMG Las Bambas, 2024).

Entre julio y septiembre, los vientos se intensifican entre las 13 y las 17 horas, llenando el tajo Ferrobamba de polvo. En el transcurso del año, el viento oscila entre un sople suave y un sople moderado (MMG Las Bambas, 2024).

FOTO 1 VISTA DE LAS INSTALACIONES DEL CAMPAMENTO MINERO ANTA WASI EN EL MES DE FEBRERO 2024



1.5 RESEÑA HISTÓRICA DE LAS BAMBAS

Hay testimonios que señalan que las raíces de la exploración y explotación se encuentran en tiempos coloniales en el territorio de Charcas (MMG Las Bambas, 2024).

Entre 1911 y 1913, la compañía británica Ferrobamba Ltd. desarrolló labores de indagación superficial. Entre 1915 y 1920, la Andes Exploration Company emprendió actividades de exploración y puso en marcha proyectos en Chalcobamba. En 1934, Ferrobamba Ltd dejó atrás todos sus derechos. En el transcurso de 1938 a 1941, L. Vanini y su equipo tomaron el control del área y confiaron a William Jenks la tarea de llevar a cabo investigaciones para evaluar la viabilidad del recurso. En 1942, la Cerro de Pasco Copper Corporation, al descubrir el yacimiento en Chalcobamba y Ferrobamba, emprendió estudios de exploración. En 1951, W. Jenks culminó sus indagaciones geológicas locales y desentrañó las misteriosas presencias de mineralización (MMG Las Bambas, 2024).

En los años 1962 y 1969, Cerro de Pasco Copper Corporation llevó a cabo una serie de perforaciones en Chalcobamba y Ferrobamba. En abril de 1970, el Estado Peruano tomó las riendas con la fundación de Minero Perú S.A., quien se comprometió a llevar a cabo investigaciones junto a Mitsui Metal Mining. En 1972, Granges comenzó a realizar estudios de prefactibilidad, valorar la infraestructura, evaluar las operaciones y desentrañar los costos con el propósito de comenzar a operar. En 1974, José Arce llevó a cabo investigaciones de polarización inducida en las regiones de Chalcobamba, Sulfobamba y Charcas, revelando impresionantes cuerpos conductivos de escasa profundidad. En 1976, Noranda comenzó a dialogar con Minera Perú para continuar con la ejecución del proyecto, sin lograr ningún acuerdo. En el mes de diciembre de 1991, bajo el amparo de la Ley 708, Minero Perú recibe un privilegio singular denominado área Ferrobamba – Chalcobamba, extendiendo su dominio sobre 31796 hectáreas. Entre 1994 y 1997, múltiples compañías se sumergieron en análisis de terreno, comenzando con Barrick, MIM, Magma y otras, con Cyprus–Amax (15 DDH), Phelps Dodge (5 DDH) y BHP y Cyprus (7 DDH). Entre 2001 y 2003, BHP Billiton, Anglo American y Cordillera de las Minas (CRVD) llevaron a cabo labores de exploración superficial en toda la zona asignada; al mismo tiempo, ProInversión llevó a cabo perforaciones en Ferrobamba y Chalcobamba para descubrir nuevos depósitos minerales. Al fin y al cabo, el 31 de agosto de 2004, el proyecto Las Bambas se licitó en una subasta pública, ganando la empresa Xstrata AG de Suiza, de entre catorce postulantes. En el mes de marzo de 2005, Xstrata Perú S.A. emprendió la perforación de 56000 metros, esparcidos entre Chalcobamba, Ferrobamba y Sulfobamba (MMG Las Bambas, 2024).

Durante el mes de diciembre de 2008, Xstrata Perú S.A., con el fin de evaluar sus recursos, había perforado 306968 metros, realizando 1010 sondeos en los yacimientos Ferrobamba, Chalcobamba, Sulfobamba, Charcas y Azuljaja. El "modelo geológico" de

Ferrobamba, Chalcobamba y Sulfobamba fue trazado a partir de los datos de superficie y sondeos. Al 31 de enero de 2009, se contabilizaron 950 millones de toneladas de minerales, con un 0.91% de Cu, 179 ppm de Mo, 7.74 gramos de Ag y 0.08 gramos de Au. En 2007, Xstrata Perú S.A. emprendió la aventura de explorar la prefactibilidad y la factibilidad (MMG Las Bambas, 2024).

En mayo de 2013, Glencore International PLC y Xstrata PLC se fusionaron, creando así la cuarta compañía minera más grande del planeta y el mayor comerciante de recursos naturales en el globo. En abril de 2014, Glencore Xstrata reveló la venta del proyecto minero al grupo mineral MMG. En la actualidad, la administración del proyecto recae en MMG, Guoxin International Investment Corporation y Citic Metal Co., quienes comparten un 62,5 %, un 22,5 % y un 15 %, siendo MMG la entidad que lleva a cabo el proyecto (MMG Las Bambas, 2024).

1.5 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El presente trabajo tiene como base principal la diferencia considerable en reconciliación de leyes de cobre entre el material enviado de Mina y el procesado en Planta Concentradora. Se ha planteado realizar una serie de estudios dentro del proceso de producción de Las Bambas, para validar la correcta aplicación de conocimientos en diferentes etapas de producción.

Existen múltiples estudios relacionados a validación de métodos de muestreo de blastholes en operaciones mineras a tajo abierto, sin embargo, cabe mencionar que cada yacimiento minero es único, y en Las Bambas aún no se cuenta con el estudio de validación necesario para determinar el método óptimo para muestreo de blastholes.

Actualmente, en Las Bambas - Ferrobamba se realiza la extracción de muestras de blastholes por el método del auger. Sin embargo, no se cuenta con un estudio de evaluación y

determinación del método óptimo de muestreo de blastholes que represente de mejor manera la variabilidad de ley del cono total.

1.5.1 Problema general

¿Cuál es el método óptimo para muestreo de blastholes en el yacimiento minero Las Bambas - Apurímac?

1.5.2 Problemas específicos

¿Qué diferencias existen entre las leyes de Cu, Ag y Mo obtenida por el método de muestreo por auger, canal y tubo en comparación con la ley del cono total?

¿Cuáles son los rangos de ley de Cu, Ag y Mo en los que presenta mejor correlación de leyes entre muestreo por auger, canal, tubo y el cono total?

¿Qué método de muestreo de blasthole presenta menor variabilidad y mayor representatividad en comparación con la ley del cono total?

¿Cuál es el coeficiente de variación y coeficiente de correlación lineal por tipo de roca (pórfido y skarn), entre la ley obtenida por el método de muestreo por auger, tubo, canal, comparado con la ley del cono total?

1.6 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.6.1 Objetivo general

Evaluar y determinar el método óptimo para muestreo de blastholes en el yacimiento minero Las Bambas – Ferrobamba ubicado en la región Apurímac.

1.6.2 Objetivos específicos

- Comparar las leyes de Cu, Ag y Mo obtenidas por los métodos de muestreo auger, canal y tubo con las leyes del cono total.
- Determinar los rangos de ley de Cu, Ag, y Mo en los que presenta mejor correlación de leyes entre muestreo por auger, canal y tubo, comparado con el cono total.
- Evaluar el método de muestreo de blastholes que presenta menor variabilidad y mayor representatividad en comparación con la ley del cono total.
- Determinar el coeficiente de variación y coeficiente de correlación lineal por tipo de roca (pórfido y skarn), entre la ley obtenida por el método de muestreo por auger, tubo, canal, comparado con la ley del cono total.

1.7 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACION

El yacimiento minero Las Bambas (Ferrobamba) se encuentra en etapa de producción, cuyo negocio principal es la venta de concentrado de Cu con subproductos como Mo, Ag, Zn, Au, teniendo estos productos como destino final China, Australia principalmente. Para satisfacer a los clientes es necesario tener cumplimiento en la entrega del concentrado, esto implica que la producción en el tajo debe basarse en planes de minado diarios, semanales, mensuales y anuales por lo que se necesita el dinamismo necesario en todos los procesos. Los planes de minado para su elaboración necesitan del sustento de la estimación de recursos (modelo geológico de corto plazo). El modelo geológico se basa en las leyes que se obtienen al analizar químicamente las muestras de blastholes por los elementos: Cu, Mo, Ag, Zn, Fe, Pb en laboratorio, la caracterización litológica del geólogo que realiza el logueo de blastholes, y la interpretación de litología a nivel de bancos (15 m de altura). En algunas ocasiones, no se cuenta con información del modelo de corto plazo, por lo que se suele realizar la planificación diaria con el modelo

geológico de largo plazo, sin embargo, no es recomendable por el nivel de confianza limitado y la variabilidad del yacimiento.

La operación minera es muy exigente en cuanto a los trabajos que se realicen dentro del tajo, esto significa que el área de Geología Mina en Las Bambas tiene un tiempo reducido para extraer muestras de los blastholes luego que estos son perforados.

Cada blasthole genera más de 2 toneladas de material de detritus, esto dependiendo del tipo de roca. Extraer todo el cono de material generado por la perforación para ser analizado en laboratorio es muy complicado, se recurre a la ciencia y estudios de muestreo para obtener una muestra representativa (6 - 8kg) del cono de detritus.

Por todo lo expuesto, es necesario realizar el estudio respectivo para evaluar y determinar el método óptimo de muestreo de blastholes en el Yacimiento Las Bambas – Apurímac.

1.8 HIPÓTESIS

1.8.1 Hipótesis general

La comparación de la ley de Cu, Ag y Mo obtenida por los métodos de muestreo auger, canal y tubo con la ley del cono total permite identificar un método de muestreo que presenta mayor representatividad y menor variación en la unidad minera Las Bambas – Apurímac.

1.8.2 Hipótesis específicas

- Existen diferencias significativas entre las leyes de Cu, Ag y Mo obtenidas por los métodos de muestreo auger, tubo, y canal en comparación con las leyes del cono total.
- El método de muestreo por auger presenta mejor correlación en distintos rangos de ley de Cu, Ag, y Mo comparado con el cono total.

- El método de muestreo por auger es el que tiene menor variabilidad y mayor representatividad en comparación con la ley del cono total.
- Existe menor coeficiente de variación y mayor coeficiente de correlación lineal si se compara valores por tipo de roca (pórfido y skarn), entre la ley obtenida por el método de muestreo por auger comparado con la ley del cono total.

1.9 MÉTODO DE TRABAJO

El enfoque metodológico empleado en este estudio se dividió en tres fases, las cuales se desglosan a continuación:

1.9.1 Etapa pre - campo

En la primera etapa se desarrollaron los procedimientos escritos de trabajo (PETS), planificación sobre extracción de muestras de blastholes (muestreo empleando los 3 métodos), coordinación con el área de Perforación y Voladura, adquisición de equipos necesarios, solicitud de recursos humanos, solicitud de equipos de protección personal (EPP), solicitud de materiales, solicitud de unidad vehicular para traslado de muestras del tajo al laboratorio.

1.9.2 Etapa de campo

Está referida a la ejecución del trabajo en campo (Tajo Ferrobamba), la extracción de muestras, cumplimiento de los procedimientos escritos de trabajo para asegurar la calidad del muestreo (QA), coordinación respectiva con Perforación y Voladura (P&V) para obtener permisos de acceso a las áreas necesarias.

En esta etapa se contempla la extracción de muestras por los 3 métodos: auger, tubo y canal, así como también la extracción del cono completo. Seguidamente se considera, la entrega de muestras por lotes de 38 a laboratorio ALS para su análisis químico respectivo. Laboratorio

químico utiliza sus procedimientos de trabajo para realizar el análisis químico de muestras de blastholes entregado por el equipo de muestreo de Geología Mina, y su posterior reporte de leyes.

1.9.3 Etapa post - campo

Esta tercera etapa se dedica al tratamiento de información y la interpretación estadística de los datos recolectados en el proyecto. Las labores de laboratorio incluyeron la supervisión de la calidad del análisis químico, la valoración de los resultados de muestras de control, el análisis estadístico de los datos obtenidos, el cálculo de la desviación estándar y la creación de gráficos de correlación lineal, basándose en las leyes fundamentales de los componentes: Cu, Ag, Mo.

CAPITULO II: METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

Evaluated los diferentes métodos de muestreo de blastholes: auger, tubo y canal, se determinará el método óptimo para muestreo de blastholes en el yacimiento minero Las Bambas – Apurímac.

2.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de estudio se considera del tipo aplicada, porque se deben considerar los resultados de las muestras ensayadas con sus respectivas leyes de Cu, Mo; adicionalmente, se realizarán análisis que repercutirán o tendrán su efecto en la selección del método óptimo para muestreo de blastholes.

2.2 NIVEL DE INVESTIGACIÓN

El nivel de investigación se considera descriptivo, correlacional. Los métodos de muestreo empleados para el ensayo, los resultados de los análisis de laboratorio y los análisis estadísticos, tendrá impacto en la toma de decisional al final del estudio, definiendo de esta forma el nivel de investigación.

2.3 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño apropiado para esta investigación es experimental, este diseño se define como el camino a seguir para responder los objetivos del estudio. Con este diseño se plantea solucionar

o seleccionar el método adecuado para muestreo de blastholes lo cual es el motivo del presente estudio.

2.4 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

El enfoque que se le pretende dar al presente estudio es el cuantitativo, porque los datos que van a definir el método óptimo para muestreo de blastholes es el método que resulte obtener el menor valor del coeficiente de variación (CV).

CAPITULO III: MARCO TEORICO

3.1 MARCO REFERENCIAL

3.1.1 Antecedentes

Se tienen diversos trabajos referentes al tema de estudio que se realizaron en operaciones mineras a nivel internacional, nacional, y regional. Sin embargo, cabe mencionar que no se tiene uno específico acerca de la unidad minera Las Bambas - Ferrobamba. A continuación, se detallan los trabajos relacionados al tema de tesis:

3.1.1.1 Antecedentes internacionales

Lazo y Pino (2024) “Impacto de la granulometría en el muestreo de detritos de los conos de taladros para voladura en minería superficial” en este artículo se busca optimizar la reconciliación minera, partiendo de la recolección de muestras representativas de los conos de detritos. Se subraya la importancia de tener en cuenta la proporción de materiales finos y gruesos obtenidos de los taladros en minas a tajo abierto, pues esta proporción puede alterar profundamente los resultados de los análisis químicos, provocando así sobrestimaciones o subestimaciones de la normativa. Estas fallas pueden desembocar en la creación de modelos efímeros y en acuerdos desfavorables. Además, se ofrecen sugerencias sobre cómo ajustar y comprender los factores antes del muestreo para obtener muestras representativas de las

colosales cantidades de material enviadas a la planta. En este escenario, una mayor proporción de materiales finos sobrepasa la ley, mientras que una mayor proporción de materiales robustos la subestima. (Lazo & Pino, 2024).

Zavaleta (2022) en su tesis de maestría “Uso de simulación para medir el impacto económico en una reconciliación de mineral” presentada a la Universidad de Chile, la meta primordial es anticipar la normativa y la cantidad de toneladas destinadas a la chancadora primaria para diseñar planes de minado a corto plazo, además de llevar a cabo una reconciliación operacional que permita evaluar los frutos de una mina a cielo abierto. De manera adicional, se propone una metodología sólida para llevar a cabo la reconciliación operacional, incorporando la medición del impacto económico asociado al proceso de manejo de materiales en este tipo de operaciones. El problema identificado por el autor radica en las limitaciones de los modelos existentes, los cuales consideran el riesgo y la incertidumbre únicamente en los procesos geológicos y metalúrgicos, sin incluir el proceso productivo de la mina ni el movimiento de materiales. (Zavaleta, 2022).

3.1.1.2 Antecedentes nacionales

Sucapuca y Cruz (2023) “Aseguramiento y control de calidad del proceso analítico por el método fluorescencia de rayos X de muestras blastholes en una mina de tajo abierto en el sur del Perú” presentada a la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, partiendo del desafío primordial de la falta de control sobre los resultados analíticos obtenidos de muestras de blastholes, donde la precisión, exactitud y la posible contaminación no se evalúan de manera habitual. La meta fue descubrir una técnica más empleada para garantizar y controlar la calidad desde la recolección de muestras de blastholes, su preparación y análisis, y su posterior

interpretación para descubrir oportunidades de mejora. Además, destacan que la investigación se realizó con el fin de detallar y evaluar la fiabilidad de los hallazgos obtenidos a través de la Fluorescencia de rayos X, contrastando las leyes de Cu, Mo y Fe con los análisis llevados a cabo en los laboratorios de Toquepala e Ilo. Finalmente, el procedimiento analítico fue corroborado con seguridad, aunque es cierto que la fluorescencia de rayos X tiende a aumentar la dispersión, lo que resulta en una precisión más deficiente. (Sucapuca & Cruz).

Palomino y Febres (2023) su tesis “Plan de mejora del programa de aseguramiento y control de la calidad en la campaña de perforación de la unidad minera Isabelita - Trujillo, Summa Gold 2022” presentada a la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, inicia su investigación a partir del enigma primordial que impulsó su investigación: los fallos frecuentes detectados durante el muestreo, la supervisión de la calidad y la elección de leyes en la creación de la base de datos. El propósito primordial fue verificar, supervisar y elevar la excelencia del muestreo geológico y del análisis químico, buscando identificar, evitar y rectificar fallos durante la recolección de muestras, la preparación de muestras, el análisis en laboratorio, la elaboración de informes legales y su registro en la base de datos. En esta investigación se analizaron 5,019 muestras, de las cuales 976 fueron seleccionadas como muestras de control, logrando un 24.14% de inserción de controles, un porcentaje que se encuentra en un rango aceptable. Finalmente se verificó el protocolo de supervisión y garantía de calidad, y como estrategia de optimización se implementó la inclusión de muestras de control de blanco fino y el envío de muestras externas; se mejoró la selección de blastholes, comparando los resultados del método actual con los de conos y canales (Palomino & Febres, 2023).

Neyra (2022) en su tesis “Dilución y control mineral en frentes de voladura de la mina a tajo abierto Antamina – Ancash” presentado a la Universidad Nacional de San Agustín de

Arequipa el objetivo es vigilar el mineral y diluirlo en las zonas de explosión de la mina abierta Antamina. Esto cobra especial importancia debido a la intrincada geología del yacimiento tipo skarn de Antamina, donde se entrelazan zonas de alta y baja ley, además de la existencia de óxidos y minerales transicionales que comprometen la excelencia de los concentrados. En los puntos de encuentro entre mineral y desmonte, la disminución y la pérdida de mineral pueden incrementarse debido al movimiento de materiales durante la explosión. Asimismo, la ruptura de la roca en las mallas voladas y los vastos volúmenes implicados demandan ajustes rápidos en terreno respecto a los polígonos iniciales o a los frentes de minado previstos, pues el material extraído no siempre se ajusta a las normativas vigentes. En resumen, la sinergia entre las diversas áreas ha logrado perfeccionar la administración del proceso operativo en la mina, incentivando a todo el equipo a colaborar en la optimización de los planes de minado a corto y mediano plazo (Neyra, 2022).

Anchelia (2021) realizó la tesis “Reducción del error de muestreo aplicando protocolos de aseguramiento y control de calidad (QA/QC) en operaciones a tajo abierto” y fue presentada a la Universidad Nacional de Ingeniería, este trabajo se desarrolló en el yacimiento de oro Jessica de la Compañía Minera Aruntani S.A.C en la región de Puno. El propósito fue reducir el error de muestreo implementando estrictos protocolos de aseguramiento y control de calidad en actividades mineras a cielo abierto. Debido al incumplimiento del control de leyes y de la planificación de corto plazo limita el desempeño operativo y conduce a decisiones inadecuadas que generan impactos financieros negativos, tal como se evidenció en el proceso de muestreo del yacimiento Jessica. Según el autor, entre las principales causas de las inconsistencias observadas se encuentran prácticas inadecuadas de muestreo, el enfoque en las consecuencias y no en las causas fundamentales del problema, la deficiente comunicación, la falta de compromiso y

entendimiento de los procesos mineros por parte del personal involucrado, así como la escasa formación técnica en esta materia. Los hallazgos de esta investigación corroboran la veracidad de la teoría propuesta, revelando que la adecuada implementación de protocolos QA/QC en operaciones abiertas puede disminuir el error de muestreo, llevándolo a rangos aceptables y dentro de los límites esperados. (Anchelia, 2021).

Bobadilla (2020) en su tesis “Optimización del proceso de ore control mediante técnicas metodológicas de muestreo en blastholes para el plan de minado de corto plazo en mina Toquepala Southern Peru Copper Corporation” presentada la Universidad Nacional del Altiplano, se plantea como una de las metas del estudio: perfeccionar el manejo del mineral utilizando técnicas metodológicas de muestreo en blastholes, descubriendo la técnica más fiable que asegure la máxima representatividad de los ensayos. El desafío detectado fue la nebulosidad que se escondía en el modelo de bloques a largo plazo. El autor concluye que la técnica de muestreo en perforaciones con equipo auger es la opción más segura para asegurar una representación fiel de las leyes de los ensayos, empleando un ángulo de inserción al cono que oscila entre 60° y 70° respecto al suelo, logrando un rango de corte de 34 cm y un peso promedio de muestra de 11 kg (Bobadilla, 2020).

3.1.1.3 Antecedentes regionales

Chilque (2023) presentó un trabajo “Reducción de la discrepancia de valores de las leyes en una misma zona de muestreo basado en la actualización de los protocolos de aseguramientos y control de la calidad” a la Universidad Nacional de Ingeniería, del proyecto Anama de la empresa Anabi S.A.C ubicado en el distrito de Huaquirca, Provincia de Antabamba, en el departamento de Apurímac. La meta de la investigación consistió en reducir las disparidades en

los valores de las leyes en una misma área de muestreo mediante la renovación de los protocolos de seguridad y supervisión de calidad. En este proceso, el desafío habitual radica en contrastar las leyes obtenidas en el frente de minado con las registradas en la planta de procesos, y que estas diferencias no superen los límites permitidos. Los hallazgos de esta investigación corroboraron la veracidad de la teoría planteada, revelando que la revisión de los protocolos QA/QC en las mismas áreas de muestreo de una mina a tajo abierto puede disminuir notablemente las divergencias en los valores de las leyes de Au. (Chilque, 2023).

Flor (2022) en su tesis “Análisis comparativo de ley de cobre en muestras de Blasthole mediante fluorescencia de Rayos X (FRX) y análisis químico, para la mejora de procesos en Ore control” presentada a la Universidad Nacional de Ingeniería y realizado en la Compañía Minera Antapaccay, el desafío común de la mayoría de las minas a cielo abierto en yacimientos de pórfido y skarn, con capacidades de procesamiento que superan las 100 000 toneladas diarias, se traduce en una actividad frenética. En este escenario, el departamento de geología de mina a menudo carece de los recursos necesarios para garantizar un manejo impecable del mineral obtenido, obligándolos a extraer las leyes de cobre de los conos de voladura en menos de doce horas tras la explosión, para determinar los polígonos de mineral y desmonte. En este contexto, se plantea perfeccionar la gestión minera a través del estudio de la ley de cobre en muestras de blasthole, empleando un dispositivo portátil de fluorescencia de rayos X. Se llevó a cabo un estudio comparativo en 252 muestras de blasthole de diversas rocas, revelando que el analizador portátil de FRX exhibe errores inferiores al 5 % en comparación con los análisis químicos tradicionales de laboratorio (Flor, 2022).

Mamani (2020) en su tesis “Validación de muestreo por incrementos en Unidad Minera Constancia Fase 2” presentada a la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, se

menciona la variedad de métodos para recolectar blastholes en la minería a cielo abierto, cada uno con sus propios beneficios y restricciones, lo que hace crucial elegir y ajustar el más adecuado, especialmente al comenzar la exploración de un yacimiento con características únicas como la fase 2 de la mina Constanca, caracterizada por mineralización hipógena y skarn. En este escenario, analizando las condiciones reales y el comportamiento de la mineralización, este estudio examinó los diferentes métodos de muestreo disponibles, comparándolos con la metodología de Cono Completo. El análisis se llevó a cabo mediante la evaluación de los valores de sesgo y la desviación estándar relativa (RSD) para componentes como Cu, Mo, Au, Ag, Zn y Pb. La determinación del sesgo por componente permitió examinar la exactitud de los hallazgos en laboratorio y elegir el método que más se alinea con la operativa minera. En última instancia, el análisis del RSD reveló la exactitud de los datos, revelando los intervalos en los que los resultados son más fieles a cada tipo de muestreo. Finalmente, se verificó la idoneidad de cada método a través de un gráfico de desviación estándar y sesgo, además de identificar áreas de mejora. (Mamani, 2020).

3.1.1.4 Antecedentes locales

En el marco de antecedentes locales no se encontraron investigaciones con similar problema que el presente trabajo, sin embargo, se describe un trabajo relacionado geológica y espacialmente, de la misma forma, estos trabajos han sido tomados como fuente bibliográfica en la elaboración de este estudio.

Choquetico (2021) realizó un trabajo “Control de la calidad del muestreo de blastholes, litología y control de mineral del banco 3690, tajo Ferrobamba mina Las Bambas – Apurímac” presentada a la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, con el fin primordial de

supervisar la excelencia de los muestreos de blastholes, identificar la litología y supervisar el mineral en el banco 3690 del tajo Ferrobamba, situado en la mina Las Bambas, en la región de Apurímac. Además, se vigila meticulosamente el proceso de preparación de muestras para asegurar que las muestras sean exactas y confiables. Además, se realiza un análisis granulométrico, evaluando el tamaño de las partículas que componen las muestras evaluadas. A través del cuidadoso seguimiento y control de la calidad de las muestras recolectadas con la herramienta Auger, se reveló que esta herramienta es capaz de capturar tanto muestras finas como gruesas, evitando la segregación y convirtiéndose en la opción más destacada y operativamente eficiente en el banco 3690 del tajo Ferrobamba, garantizando un desempeño fiable en las tareas de muestreo y reduciendo al mínimo los errores en la extracción y manteniendo una alta conexión con la ley total del cono (Choquetico, 2021).

3.2 MARCO CONCEPTUAL

Muestreo

Es una técnica fundamental dentro de la metodología de la investigación, ya que permite seleccionar una parte representativa de la población para obtener información generalizable al total.

Hernández, Fernández y Baptista (2014), definen el muestreo como “es un método que consiste en seleccionar un subconjunto de una población para estudiarlo y, a partir de los resultados obtenidos, extrapolar conclusiones al total de la población.”.

Blastholes o conos de detritos

La palabra blasthole es la unión de dos palabras provenientes del idioma inglés “blast” que significa voladura y “hole” que significa agujero, en sentido estricto traducido al español significa agujero de voladura.

En la minería actual se ha adoptado este término para referirse también al cono de detritos que se forma en la superficie al perforar la roca con perforadoras rotatorias o aire reverso.

Estos orificios permiten que los explosivos rompan la roca de manera controlada, facilitando tanto la extracción del mineral como el desplazamiento de los escombros producidos por la voladura. Una adecuada planificación y ejecución de la perforación de blastholes resulta fundamental para maximizar la eficiencia de la voladura y reducir los impactos ambientales. (Schwartz, García, & Rodríguez, 2017).

Mineralización

Se define la mineralización como "el proceso mediante el cual los elementos químicos presentes en soluciones hidrotermales, magmáticas o de origen meteórico se concentran y precipitan en forma de minerales, a menudo en estructuras geológicas favorables, como vetas, capas o porosidades" (Klein & Hurlbut, 2005).

Klein y Hurlbut (2005) mencionan que "La mineralización consiste en la concentración natural de minerales en cantidades suficientes para su extracción y procesamiento rentable, lo que la convierte en un elemento fundamental en la minería y la exploración geológica."

Geología

La geología es la disciplina que se encarga de estudiar de la Tierra, explorando su arquitectura, estructura, narrativa y los fenómenos que han moldeado su origen a través de los siglos. Su meta es desentrañar el misterio de los diversos componentes del universo, tales como las rocas, los minerales, los sedimentos y los fósiles, se distribuyen y cómo interactúan a través de diversos procesos geológicos como la erosión, la sedimentación, la tectónica de placas y el volcanismo (Marshak, 2014).

Marshak (2014) define la geología como "La geología es la ciencia que analiza la Tierra, su composición, los procesos que se desarrollan tanto en su interior como en la superficie, y la evolución de sus características a lo largo del tiempo. Esto abarca el estudio de rocas, minerales y fósiles, así como la comprensión de los procesos tectónicos y climáticos que influyen en el planeta".

Tubo de muestreo

En el contexto de minería, un tubo de muestreo es un instrumento empleado para recolectar muestras representativas de materiales como rocas, minerales, suelos o sedimentos mediante perforación. Esta herramienta es fundamental para obtener muestras que reflejen de manera fiel el estado original del material o la capa geológica específica, evitando alteraciones durante la extracción. (Dunn & Everett, 2010).

Dunn y Everett (2010) explican que "Los tubos de muestreo se utilizan habitualmente en minería para recolectar muestras de suelos o minerales a distintas profundidades. Este instrumento permite perforar el terreno sin modificar el contenido de la muestra, preservando así las propiedades geológicas y minerales esenciales para su análisis e investigación"

Canal

En minería superficial, El muestreo por canal consiste en excavar un canal en el blasthole o cono de detritos para recolectar muestras representativas de los materiales extraídos o evaluados. Este método se aplica principalmente en minería a cielo abierto, exploración minera y estudios geológicos, con el fin de obtener información detallada sobre la composición del mineral y la distribución del recurso en el yacimiento (Ramírez, Torres, & Vargas, 2015).

Ramírez et al. (2015) explican que "En minería a cielo abierto, el canal de muestreo se emplea para recolectar una muestra representativa de los materiales presentes en la superficie del yacimiento. Al excavar el canal a través de las distintas capas, se obtiene información crucial sobre la variabilidad y distribución del recurso mineral, lo que facilita la toma de decisiones respecto a la explotación del depósito".

Auger

El auger o barreno es un instrumento de estructura helicoidal que facilita la perforación del terreno y la extracción de muestras de suelo, sedimentos, conos de detritos o materiales superficiales, preservando al máximo sus características originales. Este método se emplea ampliamente en minería a cielo abierto para estudios geotécnicos, ambientales, de exploración y explotación, siendo especialmente útil cuando se trata de recolectar muestras de materiales relativamente blandos o sueltos (Perez, González, & Hernández, 2013).

Pérez et al. (2013) explican que "el auger de muestreo se utiliza habitualmente en la exploración de depósitos superficiales, particularmente en suelos o formaciones sedimentarias. Su diseño helicoidal permite extraer muestras del terreno con un mínimo de alteración, conservando sus características originales."

Yacimiento

En minería, Un yacimiento es una concentración de minerales en la corteza terrestre que presenta características geológicas que permiten su extracción de forma económica. Existen distintos tipos de yacimientos, incluyendo los metálicos y los no metálicos (Segundo & Rojas, 2013).

Segundo y Rojas (2013) afirman que "un yacimiento es una estructura geológica que alberga concentraciones suficientes de un recurso mineral o energético, permitiendo su explotación de manera rentable. Este recurso puede encontrarse en forma de vetas, estratos, bolsas o cuerpos rocosos que contienen minerales de valor económico".

Minera Las Bambas S.A

Es un consorcio minero que fue formado en el año 2014 para explotar los yacimientos mineros metálicos de las concesiones “Bambas” que compró de la empresa Glencore, este consorcio fue formado por tres empresas internacionales: MMG Limited (operador y accionista principal), CNIC y CITIC Metal Co. Ltd.

Geomorfología

Es la disciplina geográfica y geológica que explora las formas del planeta y los mecanismos que lo moldean. Esta disciplina se enfoca en la evolución de la superficie terrestre y los factores que tienen influencia sobre la formación y transformación del paisaje, tales como la erosión, la sedimentación, los movimientos tectónicos, el volcanismo, la glaciación (Ahnert, 1991).

Ahnert (1991) define la geomorfología como "la geomorfología es la ciencia que analiza la forma y la evolución del relieve terrestre, considerando los procesos geológicos, los factores climáticos, la actividad biológica y las acciones humanas que afectan la superficie de la Tierra. Su objetivo es comprender cómo se han formado las formas del paisaje, cómo cambian con el tiempo y de qué manera pueden ser modificadas".

Skarn

El skarn es una roca metamórfica de alteración que se forma cuando el magma intruye en rocas carbonatadas y estas interactúan con fluidos hidrotermales calientes. Durante este proceso, las rocas de origen sedimentario reaccionan químicamente, frecuentemente en el contexto de actividad tectónica. Los skarns suelen contener minerales como granate, piroxeno y calcita, y representan una fuente significativa de metales como cobre, oro y plomo. (Sillitoe, 2003).

La identificación de los skarn suele evidenciarse por el color marrón de los granates cuando se desarrollan cerca al intrusivo, color amarillo hacia la parte distal del intrusivo. El skarn de piroxeno se presenta también en zonas alejadas del cuerpo ígneo y en menor proporción cerca de estos.

Granate

El granate es un mineral silicatado presente en rocas metamórficas, caracterizado por su estructura cristalina que generalmente adopta formas de dodecaedros o icosaedros. Destaca por su variada gama de colores, que van del rojo y amarillo al verde y negro, según su composición química. Se forma bajo condiciones de presión y temperatura de moderadas a elevadas, siendo frecuente tanto en ambientes metamórficos como en ciertas rocas ígneas (Deer, Howie, & Zussman, 1992). Los granates son reconocidos por los cristales marrones, amarillos, y verdes en formas de dodecaedros y trapezoedros.

Plagioclasa

Los minerales de la serie de la plagioclasa son silicatos que contienen aluminio, silicio y oxígeno, combinados con sodio (Na) y calcio (Ca) en diferentes proporciones. Estos minerales

desempeñan un papel clave en la constitución de numerosas rocas ígneas y metamórficas, siendo frecuentes en granitos, basaltos y andesitas (Washington, Pellegrini, & Cattani, 2014).

Bowen (1928) describe la plagioclasa como "la plagioclasa es un feldespato que forma una serie de soluciones sólidas entre dos composiciones extremas: albita y anortita. Este mineral es fundamental en la formación de rocas ígneas, como basaltos y granitos, y su composición influye en propiedades petrográficas importantes, como la densidad y la viscosidad de la roca"

Magnetita

La magnetita es un mineral de óxido de hierro, con la fórmula química Fe_3O_4 , y constituye uno de los principales minerales de hierro. Se encuentra en distintos tipos de rocas, destacando en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas (Washington, Pellegrini, & Cattani, 2014).

Bowen (1928) describe la magnetita como "la magnetita es un mineral fundamental en el ciclo del hierro, que se desarrolla principalmente en rocas ígneas, como el basalto, y en rocas metamórficas. Este óxido de hierro se distingue por su intenso magnetismo y tiene un papel relevante en la formación de depósitos de mineral de hierro"

Epidota

La epidota es un mineral silicatado perteneciente a los nesosilicatos, caracterizado por su estructura cristalina, generalmente monocíntrica, y su color verde típico, aunque en algunos casos puede presentarse en tonos amarillos, marrones o negros. Se encuentra comúnmente en rocas metamórficas, especialmente aquellas alteradas por fluidos hidrotermales, y suele formar cristales prismáticos o aciculares. Este mineral es relevante para determinar las condiciones de formación de las rocas (Klein & Hurlbut, 2005).

Coefficiente de variación

Es un termómetro estadístico que revela cómo un conjunto de datos fluctúa en comparación con su promedio. La desviación estándar se calcula dividiendo la media entre la desviación estándar y, habitualmente, se manifiesta en porcentajes. (Walpole & Myers, 2002).

Walpole y Myers (2002) definen como "una medida de la dispersión relativa de una distribución de datos. Es útil cuando se desea comparar la variabilidad de dos o más conjuntos de datos con diferentes unidades de medida o diferentes magnitudes. A diferencia de la desviación estándar, que es sensible a la unidad de medida, el coeficiente de variación es adimensional y permite comparaciones directas".

Muestra

En el ámbito estadístico, el muestreo es el arte de elegir una muestra a partir de una multitud. Al seleccionar una muestra casual, se pretende que sus rasgos puedan extenderse a toda la comunidad. Este método permite ahorrar recursos y, al mismo tiempo, alcanzar resultados análogos a los obtenidos al explorar a toda la población. Investigadores de diversas disciplinas emplean el muestreo de manera extensiva para recopilar información sobre distintas poblaciones (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).

Población o lote

En el ámbito de la estadística, una población se describe como un conjunto de eventos análogos que son pertinentes para una pregunta o experimento específico. Una población estadística puede ser un conjunto de objetos tangibles o un conjunto hipotético de ideas e infinitas. Uno de los propósitos primordiales del análisis estadístico es recolectar datos sobre la comunidad elegida (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).

Perforación

Es el proceso de realizar un pozo con perforadora rotatoria de un diámetro de broca de 12 pulgadas. El pozo de perforación se utiliza exclusivamente para colocar explosivos con el objetivo de reducir el tamaño del macizo rocoso a dimensiones y especificaciones predeterminadas para el minado o excavación (Bruni & Spuhler, 2018).

3.3 VARIABLES

3.3.1 Variable independiente

- Métodos de muestreo de blastholes (auger, canal y tubo)

3.3.2 Variable dependiente

- Determinación del método óptimo para muestreo de blastholes.

CAPITULO IV: GEOMORFOLOGIA

4.1 GEOMORFOLOGÍA REGIONAL

El territorio del yacimiento minero Las Bambas – Ferrobamba, en su región, se distingue por cumbres, quebradas superficiales, llanuras y laderas con inclinaciones suaves (Golder Associates Perú S.A., 2010).

Las elevaciones más prominentes son el cerro Chonta en Sulfobamba, con 4,682 m.s.n.m., y Pichacani en Chalcobamba, con 4,663 m.s.n.m.; mientras que el punto más bajo se encuentra en las riberas del río Challhuahuacho, a 3,700 m.s.n.m. (Golder Associates Perú S.A., 2010)..

Se han identificado un total de 12 unidades geomorfológicas (Figura 1), que tienen relación estricta con la litología, ubicación geográfica, pendiente, y otros factores del modelado del relieve terrestre como son el clima, la meteorización, procesos de erosión (eólica, fluvial), tectonismo, movimientos en masa, glaciación. Estos factores mencionados fueron considerados para la diferenciación de cada unidad geomorfológica y sus respectivas subunidades (Golder Associates Perú S.A., 2010).

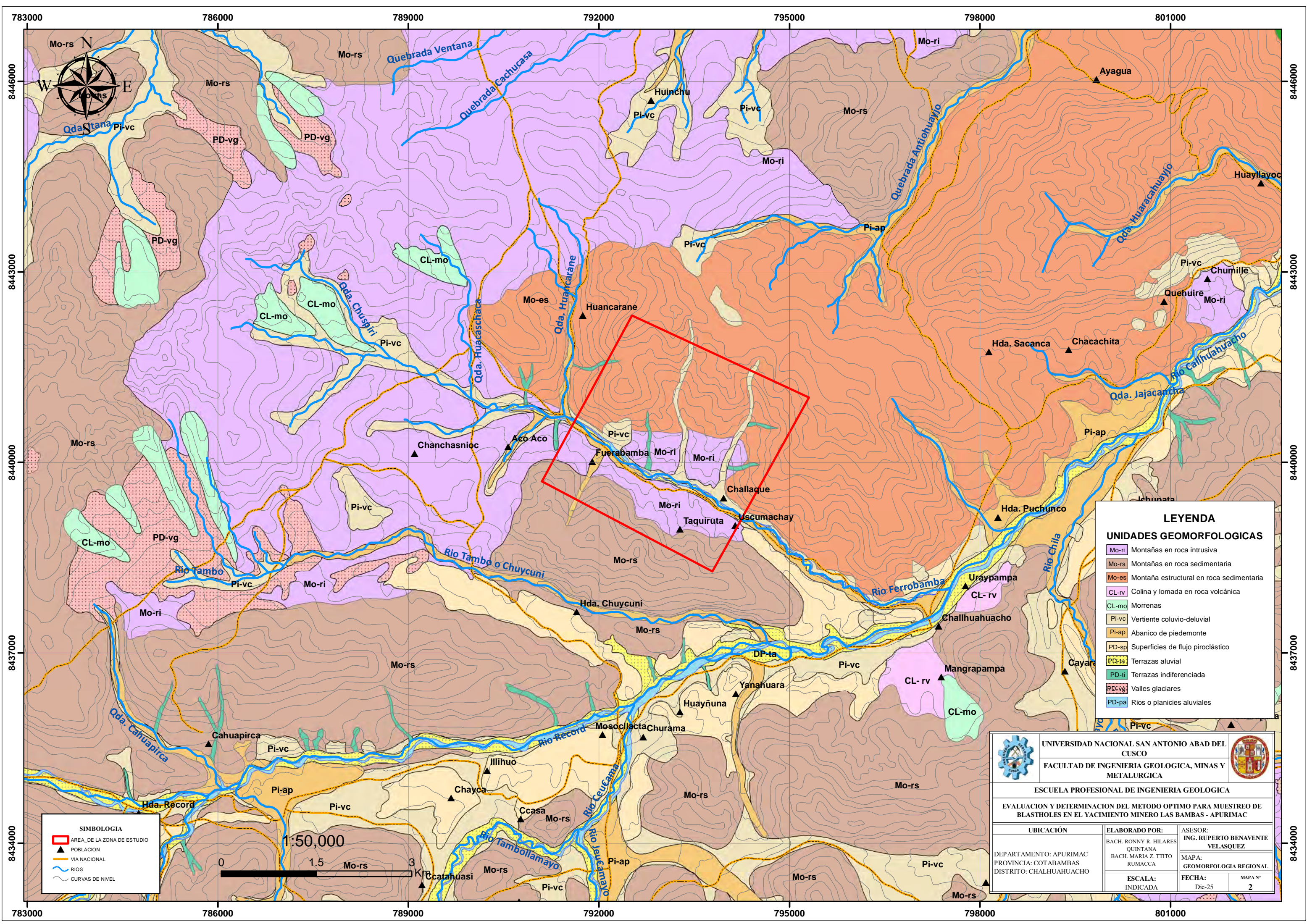
Las unidades geomorfológicas descritas en este capítulo son para tener información referencial acerca del contexto del modelado terrestre relacionado con la geología y no interviene en los objetivos de la investigación.

FIGURA 1

UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS, ADAPTADAS DE LA DATA INGEMMET

| Unidades | Subunidades |
|------------------------------|--|
| (Mo) Montañas | (Mo-ri) Montañas en roca intrusiva |
| | (Mo-rs) Montañas en roca sedimentaria |
| | (Mo-es) Montaña estructural en roca sedimentaria |
| (CL) Colinas y Lomadas | (CL-rv) Colinas y lomadas en roca volcánica |
| | (CL-mo) Morrenas |
| (Pi) Piedemontes | (Pi-vc) Vertientes coluvio - deluvial |
| | (Pi-ap) Abanicos de piedemonte |
| (PD) Planicies y Depresiones | (PD-sp) Superficies de flujo piroclástico |
| | (PD-ta) Terrazas aluviales |
| | (PD-ti) Terrazas indiferenciadas |
| | (PD-vg) Valles glaciares |
| | (PD-pa) Rios o planicies aluviales |

A continuación, se detallan las características esenciales de las unidades y subunidades geomorfológicas regionales detectadas en el área de estudio, su localización, vínculo litológico y tipos de movimientos en masa vinculados.




SIMBOLOGIA

- AREA DE LA ZONA DE ESTUDIO
- POBLACION
- VIA NACIONAL
- RIOS
- CURVAS DE NIVEL

LEYENDA

UNIDADES GEOMORFOLOGICAS


- Mo-ri Montañas en roca intrusiva
- Mo-rs Montañas en roca sedimentaria
- Mo-es Montaña estructural en roca sedimentaria
- CL-rv Colina y lomada en roca volcánica
- CL-mo Morrenas
- Pi-vc Vertiente coluvio-deluvial
- Pi-ap Abanico de piedemonte
- PD-sp Superficies de flujo piroclástico
- PD-ta Terrazas aluvial
- PD-ti Terrazas indiferenciada
- PD-vg Valles glaciares
- PD-pa Rios o planicies aluviales



UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABADEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA



EVALUACION Y DETERMINACION DEL METODO OPTIMO PARA MUESTREO DE BLASTHOLES EN EL YACIMIENTO MINERO LAS BAMBAS - APURIMAC

| | | |
|--|---------------------------------|----------------------------------|
| UBICACIÓN | ELABORADO POR: | ASESOR: |
| DEPARTAMENTO: APURIMAC PROVINCIA: COTABAMBAS DISTRITO: CHALHUAHUACHO | BACH. RONNY R. HILARES QUINTANA | ING. RUPERTO BENAVENTE VELASQUEZ |
| | BACH. MARIA Z. TITTO RUMACCA | MAPA: GEOMORFOLOGIA REGIONAL |
| | ESCALA: INDICADA | FECHA: Dic-25 |
| | | MAPA N° 2 |

4.1.1 Montañas (Mo)

La montaña se define como una elevación natural del terreno que se caracteriza por su altitud y prominencia en comparación con las áreas circundantes que es notablemente superior con respecto a su entorno, estas han sido formadas por procesos endógenos y la persistencia de su forma se debe a la resistencia de sus componentes litológicos a procesos de erosión (vientos, lluvias, movimientos en masa, sismos).

4.1.1.1 Montañas en roca intrusiva (Mo-ri)

Estas subunidades se muestran con pendiente moderada a fuerte, en algunas zonas donde los intrusivos cortan montañas altas de calizas son de pendiente muy fuerte. Las principales elevaciones que constituyen estas unidades son los cerros Tomocco ubicadas en las subcuencas Ferrobamba y Pumamarca. Esta subunidad se extiende en su mayoría en la zona NW del área de estudio, y aisladamente se observan al SE en las cercanías del poblado de Chumilli (Golder Associates Perú S.A., 2010)..

4.1.1.2 Montañas en roca sedimentaria (Mo-rs)

Estas subunidades poseen pendientes más pronunciadas con respecto a la unidad anterior, en el área de estudio predominan afloramiento de calizas mostrándose en las montañas altas y de fuerte pendiente. La ubicación espacial de estas subunidades con respecto al área de estudio se extiende del lado E a lo largo del S hasta llegar a la dirección W. Aisladamente se muestran algunas zonas en el lado N y NW (Golder Associates Perú S.A., 2010).

4.1.1.3 Montaña estructural en roca sedimentaria (Mo-es)

Estas unidades se caracterizan por laderas de pendiente pronunciada, formadas por estructuras originales que determinaron su morfología actual. Sus cimas pueden ser estrechas o amplias y redondeadas, mientras que las laderas tienden a mostrar pendientes más uniformes. Además, en estas unidades se ubican los principales valles de los ríos y sus afluentes principales. (Golder Associates Perú S.A., 2010).

Desde el punto de vista estructural, se manifiestan como lineamientos de secuencias estratificadas plegadas, donde el buzamiento de las capas determina la inclinación de las laderas, litológicamente compone de calizas formando cuevas y espinazos y de manera restringida laderas de pendiente inclinada (Golder Associates Perú S.A., 2010).

Estas unidades se pueden observar en el mirador Eveling (4273 m.s.n.m) ubicado al NW de tajo Ferrobamba (foto 2), hacia el N del mismo tajo se pueden apreciar las partes altas de montaña, la cota de la parte más alta es 4450 m.s.n.m. La chancadora primaria del tajo Ferrobamba se encuentra a 3870 m.s.n.m. (Golder Associates Perú S.A., 2010).

Las características geomorfológicas de la Formación Ferrobamba dan facilidad para reconocer su afloramiento desde lejos, las estratificaciones plegadas generalmente formando sinclinales y anticlinales, con pendientes moderadas a fuertes, y las coloraciones grises (Golder Associates Perú S.A., 2010).

FOTO 2 RELIEVE DEL PAISAJE AL NOROESTE DEL TAJO FERROBAMBA

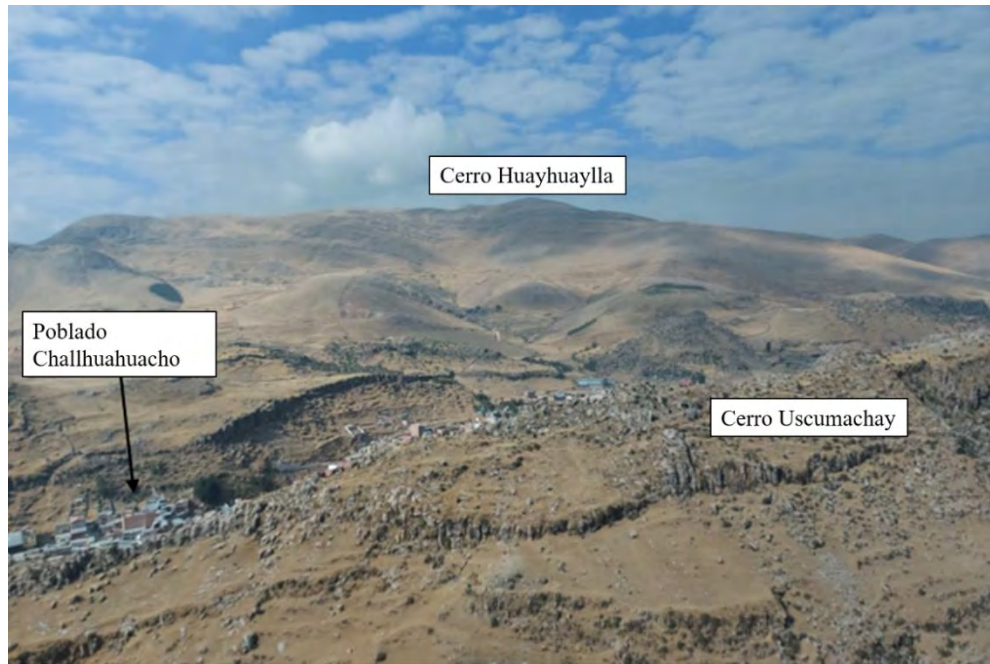


Estas unidades ocupan un gran porcentaje del área, generalmente asociadas a colinas estructurales y a montañas de pendiente moderada. Se extiende desde alrededores del lado N del tajo Ferrobamba cubriendo en gran porcentaje la parte NE del área de estudio.

4.1.2 Colinas y lomadas (CL)

Estas unidades geomorfológicas colinas y lomadas si bien pueden ser similares, sin embargo, poseen características particulares que los diferencia, pero en general, ambos deben cumplir con la condición de que tienen menor altura con respecto a las características de una montaña. Las pendientes son poco pronunciadas, en general son de inclinados a moderados (Golder Associates Perú S.A., 2010).

FOTO 3 RELIEVE DEL PAISAJE AL SUR DEL TAJO FERROBAMBA Y ALREDEDORES DEL POBLADO DE CHALHUAHUACHO



4.1.2.1 Colinas y lomadas en roca volcánica (CL-rv)

Las colinas son superficies de terreno con alturas menores a 300 m, cuyas laderas presentan una inclinación promedio superior a 8° (Villota, 1989), en el área de estudio las laderas presentan pendientes entre 5° a 25° y divergen en general en todas las direcciones a partir de una cima relativamente de menor extensión con una base semi circular (Anexo H1 Línea Base de Geología y Geomorfología, Golder Associates). Se distribuyen entre las altitudes 3800 y 4100 m.s.n.m, ocupando área agrícolas y pastizales. Están conformadas en general por rocas volcánicas, con cobertura de suelo residual escaso (Golder Associates Perú S.A., 2010).

Las lomadas, esas colinas diminutas, exhiben cimas y laderas más extensas, con formas redondeadas a suaves y una inclinación que varía entre moderada y pronunciada (entre 4° y 8°). Litológicamente están asociadas a formaciones de rocas volcánicas piroclásticas y suelos

residuales muy desarrollados. Las principales áreas que constituyen estas unidades se localizan cerca a los poblados de Uraypampa y Mangrapampa cerca al poblado de Chalhahuacho. Los procesos geodinámicos asociados son erosión de laderas y reptación de suelos (Golder Associates Perú S.A., 2010).

4.1.2.2 Morrenas (CL-mo)

Son depósitos glaciares que se acumulan en las laderas montañosas, a lo largo de los bordes de los valles y, en algunos casos, alrededor de lagunas. Son acumulaciones de detritos de roca conformadas de manera desordenada (till).

Se distribuyen a lo largo de los valles y quebradas, cubriendo toda la extensión de la zona de interés regional mostrándose como áreas aisladas. Esta unidad se relaciona con procesos de reptación de suelos, erosión de laderas, flujos de detritos y deslizamientos (Golder Associates Perú S.A., 2010).

4.1.3 Piedemontes (Pi)

Son unidades que forman parte de la transición entre montañas y llanuras, para delimitar estas subunidades Se identifican aquellas superficies que presentan características distintivas, como la acumulación de material y las rupturas de pendiente (Golder Associates Perú S.A., 2010).

4.1.3.1 Vertientes coluvio – deluvial (Pi-vc)

Se refieren a vertederos originados por corrientes, como diminutos huaicos o torrentes de desechos que rara vez se canalizan, surgidos de sucesos puntuales o de depósitos de ladera que se acumulan en la base formando conos o abanicos, en pampas, terrazas aluviales o en áreas de

lagunas glaciares. Algunos de estos almacenes se entrelazan con morrenas y sus metamorfosis erosivas, además de con materiales saprolíticos. Su presencia y extensión en el área de estudio es limitada (Golder Associates Perú S.A., 2010).

4.1.3.2 Abanicos de piedemonte (Pi-ap)

Se refiere a depósitos desprovistos de formas caprichosas, que dominan las cimas montañosas o colinas, creando espirales de desechos. Su origen se entrelaza con el torrente de desechos, la erosión de las laderas, la reptación de suelos, los derrumbes y los deslizamientos superficiales, o una mezcla de todos estos fenómenos (Golder Associates Perú S.A., 2010).

No tienen mayor desarrollo en el área de interés regional, su modo de ocurrencia es de dimensión limitada.

4.1.4 Planicies y depresiones (PD)

Los principales criterios empleados para distinguir las unidades de planicies fueron el uso del suelo (agrícola y urbano), las variaciones de pendiente respecto a los piedemontes y la dinámica de los ríos. Asimismo, se empleó información geológica, destacando la existencia de antiguos y modernos depósitos aluviales, así como depósitos fluvioglaciares y lacustres (Golder Associates Perú S.A., 2010).

4.1.4.1 Superficies de flujo piroclástico (PD-sp)

Esta subunidad se puede evidenciar cerca del poblado de Chalhuhuacho, presentándose como colinas con laderas empinadas y formando terrazas a lo largo de los valles (Golder Associates Perú S.A., 2010).

Su extensión es considerable ya que se puede observar a lo largo de las quebradas que convergen en el río Chalhuhahuacho y en las márgenes de este río. Con respecto al área de estudio local, estas unidades se ubican hacia el S (Golder Associates Perú S.A., 2010).

4.1.4.2 Terrazas aluviales (PD-ta)

Se trata de extensas superficies planas situadas por encima del cauce y de la llanura de inundación de los ríos. Según la escala del mapeo, en muchos casos se incluyeron los fondos planos de valles con cauces estrechos, delimitados por terrazas formadas por procesos fluviales y fluvio-glaciares (Golder Associates Perú S.A., 2010).

En sus taludes inferiores, es común que se produzca erosión fluvial por socavamiento, lo que provoca derrumbes y desgaste del terreno (Golder Associates Perú S.A., 2010).

4.1.4.3 Terrazas indiferenciadas (PD-ti)

Estas subunidades son superficies elevadas y planas, generalmente paralela a un río o antiguo cauce, que se ha identificado como una forma de relieve tipo terraza, pero sin distinguir su nivel, origen exacto, cronología o relación con otros niveles de terrazas. Se extienden limitadamente en la zona SW del área de interés regional (Golder Associates Perú S.A., 2010).

4.1.4.4 Valles glaciares (PD-vg)

Se trata de áreas planas y depresiones menores presentes en la zona, así como de valles glaciares que han originado pequeñas lagunas, ubicadas principalmente cerca de las nacientes de cuenca y encima de montañas de pendiente moderada (Golder Associates Perú S.A., 2010).

Las lagunas Casanacocha y Llullucha son las de mayor extensión, ubicadas al sur del yacimiento de Sulfobamba y que discurren sus aguas hacia el Río Concaca que tributa más abajo al Río Récord. En ambos casos, estas lagunas se emplazan sobre rocas calizas en contacto con cuerpos intrusivos (Golder Associates Perú S.A., 2010).

Por otro lado, los valles glaciares que se inician en las cabeceras del Cerro Azuljaja y Cerro Chonta (Sulfobamba) son los más representativos en el área de estudio (Golder Associates Perú S.A., 2010).

Su ubicación se da al lado oeste del área del estudio local, en las partes altas de la zona de interés regional.

4.1.4.5 Rios o planicies aluviales (PD-pa)

Los estratos elevados y los terrenos sinuosos suelen ser esculpidos por calizas y rocas intrusivas, mientras que los relieves suaves son esculpidos por morrenas y rocas intrusivas de gran tamaño. En el rincón meridional del yacimiento Ferrobamba, las planicies sureñas están esculpidas por residuos fluvio - glaciares (Golder Associates Perú S.A., 2010).

La parte más baja del área de estudio local corresponden al cauce del río Fuerabamba cerca del campamento Pionero (3768 m.s.n.m).

4.2 GEOMORFOLOGÍA LOCAL

Localmente se puede diferenciar unidades geomorfológicas como montañas con ladera de pendiente fuerte y moderada, las montañas estructurales están asociadas a los anticlinales y sinclinales se puede afirmar que son la de mayor extensión, las montañas litológicamente corresponden al afloramiento de calizas y mármol de la formación Ferrobamba; se aprecia

escasamente colinas y nula presencia de lomadas, se puede observar cerca al campamento Pionero colinas volcánicas al sureste del tajo Ferrobamba; adicionalmente se puede mencionar que se observan planicies y terrazas formadas a partir de acumulación de materiales arrastrados por los riachuelos y caída de roca, son de menor extensión y se observan al sur del tajo Ferrobamba.

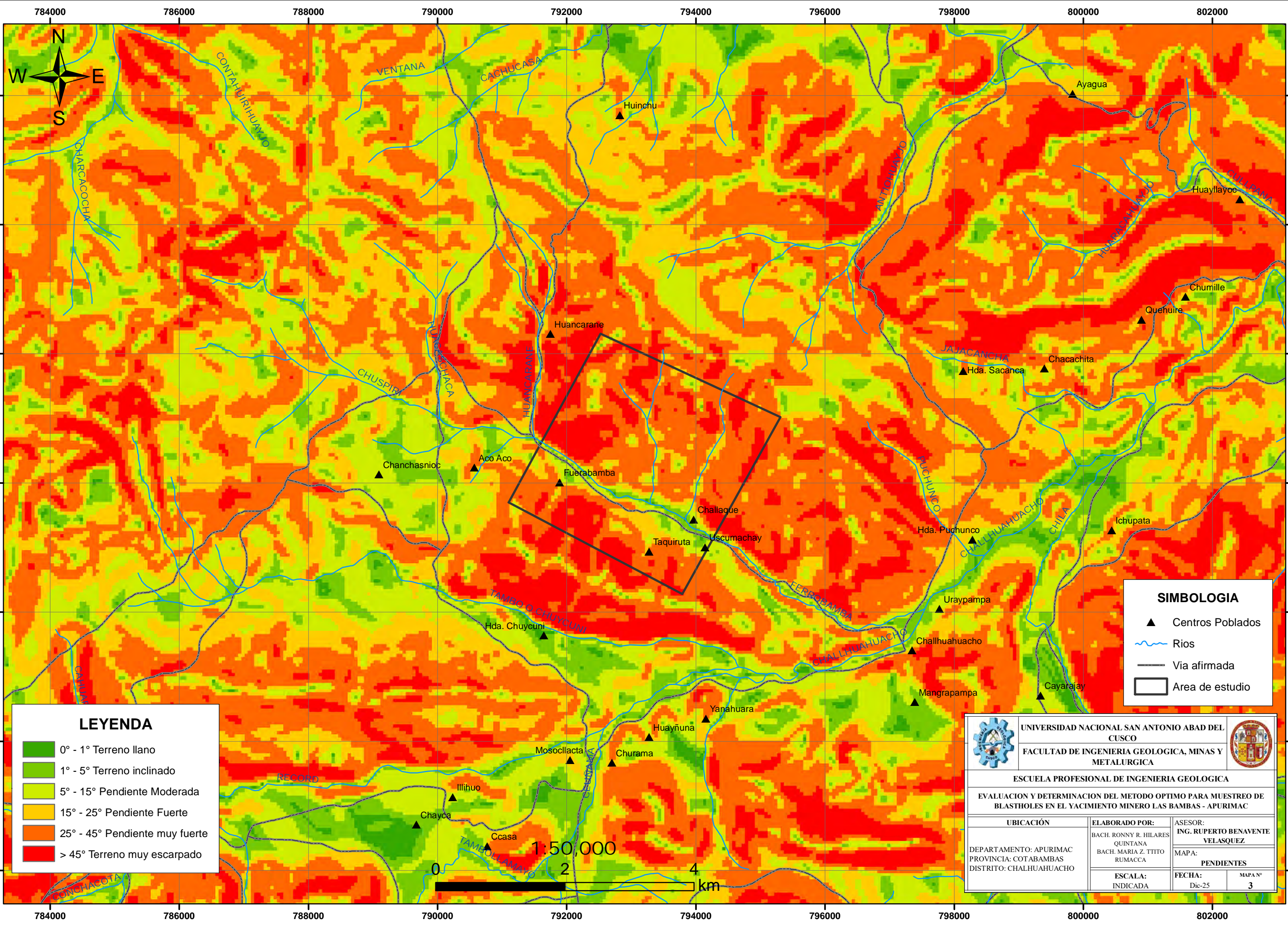
4.3 PENDIENTES DEL TERRENO

La evaluación topográfica del terreno es muy importante para tener mejor comprensión de la geomorfología del área estudiada, uno de los componentes topográficos es la pendiente del terreno. Se ha elaborado el mapa de pendientes utilizando información cartográfica del INGEMMET, resultado de ello se ha agrupado en seis unidades topográficas, estas unidades se han clasificado de acuerdo con la inclinación de la superficie del terreno y están expresados en grados ($^{\circ}$), en la tabla 4 se tiene la clasificación respectiva por rangos.

TABLA 4

PENDIENTES DEL TERRENO DEL ÁREA DE ESTUDIO

| Unidades topográficas | Pendiente ($^{\circ}$) |
|------------------------------|--|
| Terreno llano | $0^{\circ} - 1^{\circ}$ |
| Terreno inclinado | $1^{\circ} - 5^{\circ}$ |
| Pendiente moderada | $5^{\circ} - 15^{\circ}$ |
| Pendiente fuerte | $15^{\circ} - 25^{\circ}$ |
| Pendiente muy fuerte | $25^{\circ} - 45^{\circ}$ |
| Terreno muy escarpado | $>45^{\circ}$ |



LEYENDA

0° - 1° Terreno llano

1° - 5° Terreno inclinado

5° - 15° Pendiente Moderada

15° - 25° Pendiente Fuerte

25° - 45° Pendiente muy fuerte

> 45° Terreno muy escarpado

SIMBOLOGIA

Centros Poblados

Rios

Via afirmada

Area de estudio

UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA

EVALUACION Y DETERMINACION DEL METODO OPTIMO PARA MUESTREO DE BLASTHOLES EN EL YACIMIENTO MINERO LAS BAMBAS - APURIMAC

| | | |
|--|---------------------------------|----------------------------------|
| UBICACIÓN | ELABORADO POR: | ASESOR: |
| DEPARTAMENTO: APURIMAC PROVINCIA: COTABAMBAS DISTRITO: CHALHUAHUACHO | BACH. RONNY R. HILARES QUINTANA | ING. RUPERTO BENAVENTE VELASQUEZ |
| | BACH. MARIA Z. TITO RUMACCA | MAPA: |
| | ESCALA: INDICADA | PENDIENTES |
| | FECHA: Dic-25 | MAPA N° 3 |

Pendientes de terreno llano, son terrenos sub horizontales o planos con ligera inclinación; se presentan en causes de ríos, áreas de esparcimiento de centros poblados. Según el mapa de pendientes (mapa 03), es la unidad topográfica de menor extensión, la zona donde se presenta esta al sur, cerca al poblado de Chalhuhuacho.

Pendiente de terreno inclinado, son terrenos con ligera inclinación (1° a 5°); se presentan cubriendo terrenos de cultivo, causes de ríos, acumulación de morrenas, áreas de esparcimiento de centros poblados. Según el mapa de pendientes, la zona con mayor cobertura se encuentra al sur, cerca al poblado de Chalhuhuacho.

Pendiente moderada, los terrenos asociados a esta unidad topográfica se distribuyen casi en toda la zona de estudio cubriendo áreas de cultivo, causes y márgenes de ríos, asociados también a la acumulación de abanicos aluviales.

Pendiente fuerte, esta unidad topográfica se distribuye en toda la zona externa periférica de la zona de estudio y se puede asociar a unidades geomorfológicas de colinas, lomadas, vertientes y superficies de flujo piroclástico y algunas zonas componen las faldas de montañas en roca intrusiva.

Pendiente muy fuerte, estas unidades están asociadas a las unidades geomorfológicas de montañas en rocas intrusivas y en parte a montañas en roca sedimentaria, se pueden observar en las partes altas de los centros poblados, se encuentra distribuido regional y localmente de manera regular. Localmente, esta unidad se observa en la parte central del tajo Ferrobamba formando parte de las paredes de pequeñas quebradas.

Terreno muy escarpado, esta unidad es la de mayor inclinación de los terrenos, componen zonas de montañas más altas asociadas a estructuras montañosas de roca sedimentaria, generalmente el afloramiento de calizas posee esta inclinación, se observan en las partes más altas de los centros poblados. Localmente en el tajo Ferrobamba se observan en los flancos oeste y sur, y ligeramente en la zona este.

CAPÍTULO V: MARCO GEOLOGICO REGIONAL Y LOCAL

Dentro del marco de la geología regional, se tiene afloramientos de rocas sedimentarias e ígneas.

En formaciones de rocas sedimentarias se tienen las areniscas de la Formación Soraya; niveles calcáreos, areniscas y limo - lutitas de la Formación Mara; predominancia de las calizas de la Formación Ferrobamba que es muy evidente en cuanto a los afloramientos, evidenciándose por las estratificaciones típicas generalmente plegadas (anticlinales y sinclinales); adicionalmente se tiene las limo - lutitas de la Formación Anta.

En cuanto a las rocas ígneas, se tiene extensiones importantes de afloramientos relacionados al batolito Andahuaylas Yauri con edades datados del Eoceno – Oligoceno, de composición acida a intermedia, estos cuerpos intrusivos yacen cortando las rocas sedimentarias preexistentes del Cretácico, se tratan de granodioritas, dioritas, monzonitas.

5.1 ESTRATIGRAFÍA REGIONAL

La descripción estratigráfica y litológica del yacimiento minero Las Bambas - Ferrobamba a nivel regional, permitirá conocer las formaciones geológicas que afloran y los diferentes tipos de rocas existentes y su relación con la génesis del yacimiento.








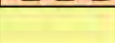

El área de estudio de acuerdo con el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) se ubica en la hoja 29-r del cuadrángulo de Santo Tomas y esta estudiado regionalmente en el boletín número 35A.

Las unidades sedimentarias que afloran tienen asociación con fases regresivas (continentales) y transgresivas (marinas), ocurridos durante el Jurásico superior – Cretácico superior a finales de la orogenia Hercínica. Las formaciones geológicas que se describirán en las siguientes paginas acorde al capítulo son: la formación Soraya del grupo Yura, formación Mara, formación Ferrobamba, y la formación Anta; esta última formación es la más reciente en comparación a las otras tres. Por otro lado, es necesario mencionar la presencia de los tufos dacíticos del grupo Barroso, y los depósitos morrénico - aluviales del Cuaternario reciente (figura 2) (MMG Las Bambas, 2024).

En la figura 2 se resume los diferentes eventos geológicos, desde el Cretácico Inferior al Cuaternario. Los principales eventos de mineralización se dieron en el Eoceno – Oligoceno. Adaptado de (adaptado del: Informe Programa de Exploración Xtrata, 2008).

FIGURA 2

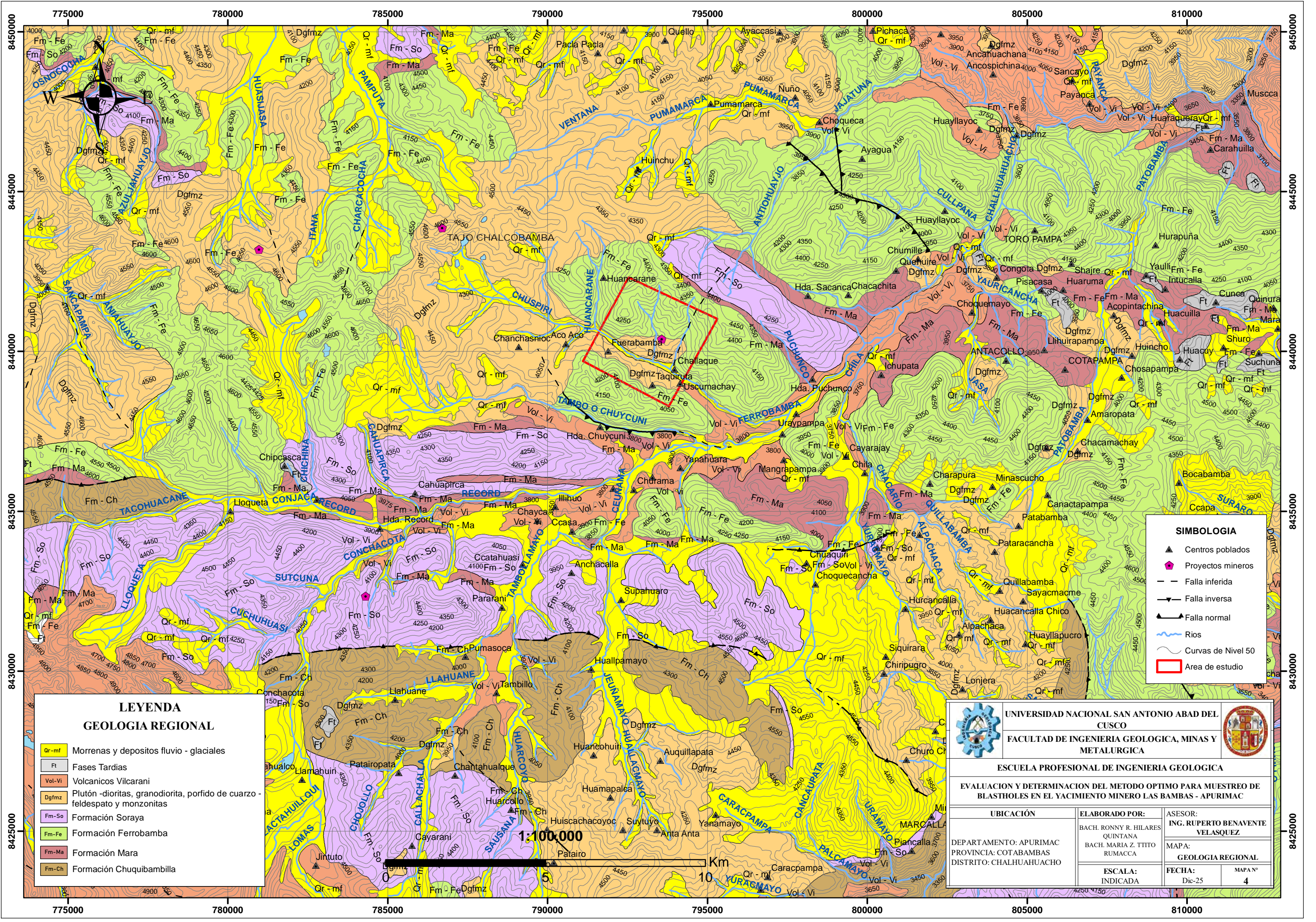
COLUMNA ESTRATIGRÁFICA REGIONAL DEL YACIMIENTO MINERO LAS BAMBAS

| ERA | SISTEMA | SERIE | UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS | | | | MAGMATISMO | MINERALIZACIÓN | OROGENIA |
|-----------|-------------|-------------|------------------------------|----------------------------|-------------|---|---|--|----------------------------|
| CENOZOICO | CUATERNARIO | Reciente | | (Qr-mf) | 30 – 50 m |  | Morrenas, aluviales | | |
| | | Pleistoceno | Gpo. Barroso | Vol. Vilcarani (Vol-Vi) | 100 m |  | Tufos dacíticos | | Quechua 4 1.5 Ma |
| | TERCIARIO | Plioceno | | | |  | | | Quechua 3 5 – 4 Ma |
| | | Mioceno | | | | | | | Quechua 1, 2 17 – 4 Ma |
| | | Oligoceno | | | | | | | Incaica 3, 4 30 – 22 Ma |
| | | Eoceno | | | | |  |  Skarn | Incaica 2 43 – 42 Ma |
| | | Paleoceno | | | | | | | Incaica 1 59 – 55 Ma |
| | CRETÁCICO | Superior | | | | | | | Pernana 84 – 79 Ma |
| | | Medio | | Fm. Ferrobamba (Fm-Fe) | 300 – 500 m |  | Calizas masivas, clásticas, bioclásticas, chert | | |
| | | Inferior | Gpo. Yura | Fm. Mara (Fm-Ma) | 50 – 200 m |  | Clásticos calcáreos, limolutitas, areniscas | | |
| | | | | Fm. Soraya (Fm-So) | 200 – 300 m |  | Areniscas y cuarcitas blancas | | |
| MESOZOICO | | | | Fm. Chuquibambilla (Fm-Ch) | 700 m |  | Areniscas gris oscuras, lutitas (carbonáceas) | | |

5.1.1 Formación Chuquibambilla (Fm-Ch)

Se denomina Chuquibambilla a esta formación debido a que sus principales afloramientos se encuentran en las cercanías del poblado de Chuquibambilla (Pecho, 1981).

La litología de esta unidad se distingue por la preponderancia de areniscas de grano fino a grueso, generalmente de tonalidad gris oscura, aunque algunas capas pueden adquirir tonalidades rojizas, especialmente en la parte superior. En el entramado de la formación, se han descubierto estratos calcáreos entrelazados con areniscas, especialmente en los estratos más elevados, las cuales corresponden a calizas negras y gris claro, en ocasiones bastante arenosas. En conjunto, este paquete litológico se encuentra intensamente plegado o formando amplias ondulaciones. El espesor de esta unidad sedimentaria se pudo medir en las cercanías del poblado de Haquira en el río Cocha alcanzando 700m (Pecho, 1981).



LEYENDA
GEOLOGIA REGIONAL

Qr - mf

Morrenas y depositos fluvio - glaciales

Ft

Fases Tardias

Vol - Vi

Volcanicos Vilcarani

Dgfmz

Plutón -dioritas, granodiorita, porfido de cuarzo - feldespatos y monzonitas

Fm - So

Formación Soraya

Fm - Fe

Formación Ferrobamba

Fm - Ma

Formación Mara

Fm - Ch

Formación Chuquibambilla

SIMBOLOGIA

▲

Centros poblados

◆

Proyectos mineros

Falla inferida

↗

Falla inversa

↘

Falla normal

~~~~~

Rios

~~~~~

Curvas de Nivel 50

▭

Area de estudio

UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABADEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA

EVALUACION Y DETERMINACION DEL METODO OPTIMO PARA MUESTREO DE BLASTHOLES EN EL YACIMIENTO MINERO LAS BAMBAS - APURIMAC

| | | |
|---|--|-----------------------------------|
| UBICACIÓN | ELABORADO POR: | ASESOR: |
| DEPARTAMENTO: APURIMAC PROVINCIA: COTABAMBAS DISTRITO: CHALHUACHO | BACH. RONNY R. HILARES QUINTANA BACH. MARIA Z. TITO RUMACCA | ING. RUPERTO BENAVENTE VELASQUEZ |
| | ESCALA: INDICADA | MAPA: GEOLOGIA REGIONAL |
| | | FECHA: Dic-25 |
| | | MAPA N° 4 |

De acuerdo con el mapa geológico regional, la Formación Chuquibambilla aflora en la parte sur del área de estudio, en las cercanías de los poblados Llahuane, Tambillo y Huallpamayo, Haquira.

Para la datación de esta Formación no se ha podido recolectar fósiles bien conservados y los pocos que se recolectaron (ammonites) no son fósiles guías por tener mayor rango de edad Jurásico Superior – Cretácico Inferior (Pecho, 1981).

Por consiguiente, no se pudo precisar la edad, se basó en la posición estratigráfica y se pudo correlacionar con la formación Labra del grupo Yura de la región de Arequipa (Benavides & Vargas, 1970).

5.1.2 Formación Soraya (Fm-So)

Esta agrupación lleva su nombre debido a que su epicentro se encuentra cerca del pueblo de Soraya, donde la secuencia se compone mayormente de areniscas cuarzosas y cuarcitas de grano medio, formando crestas destacadas que las distinguen de otras formaciones y agilizan su cartografía (Pecho, 1981). En el corazón de Aymaraes, en el corazón de Apurímac, a escasa distancia del proyecto minero Los Chancas de Southern Peru Copper Corporation. (Pecho, 1981).

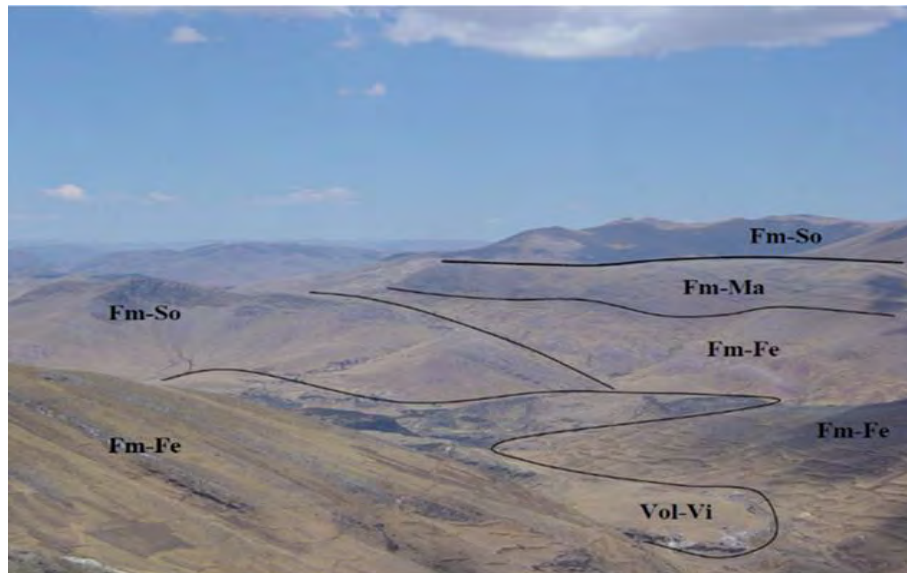
En el área analizada, se pueden apreciar afloramientos de roca extendiéndose del oeste al sureste del tajo Ferrobamba hacia el sur de Huanacopampa y Challhuahuacho (foto 4), dentro del área del Proyecto Haquira de Antares Minerals. Se compone de cuarcitas y vastos dominios de areniscas cuarzosas de tonalidad blanca a gris, con intercalaciones de areniscas que ocultan diminutas capas de lutitas negras. La existencia de esta unidad se remonta al Titoniano –

Hauteviriano, extendiéndose desde el Jurásico Superior hasta el Cretácico Inferior. (MMG Las Bambas, 2024).

En las cercanías del área de estudio, el grosor de esta secuencia no supera 300 metros, sin embargo, en la zona donde se le dio el nombre a esta formación estas secuencias pueden superar los 800 metros (Xstrata Perú S.A., 2009).

En la región de Arequipa, su equivalente estratigráfico es la Formación Hualhuani (Vargas, 1970), en muchos estudios geológicos de Las Bambas se considera a la formación Soraya como como formación Hualhuani.

FOTO 4 AFLORAMIENTO DE ROCAS DE LA COLUMNA ESTRATIGRÁFICA REGIONAL EN LAS CERCANÍAS DE CHALHUAHUACHO.



5.1.3 Formación Mara (Fm-Ma)

Lleva el nombre del poblado de Mara (26 km al este de Chalhuanhuacho) donde existen afloramientos de color rojizo, cercana al yacimiento minero Las Bambas.

En el estudio geológico de los cuadrángulos de Santo Tomás, Antabamba y Chalhuanca, se revela la Formación Mara, un conjunto de capas de areniscas lutáceas y lutitas rojas que caracterizan la composición de la Formación Mara; debido a su extensa distribución, sirve como un nivel de referencia útil para la interpretación estratigráfica y estructural (Pecho, 1981).

Pecho (1981) menciona distinguir tres miembros, inferior, intermedio y superior cuya litología respectivamente es: areniscas, lutitas con intercalaciones de areniscas y conglomerados, por último, areniscas y lutitas abigarradas con calizas amarillentas en algunas zonas.

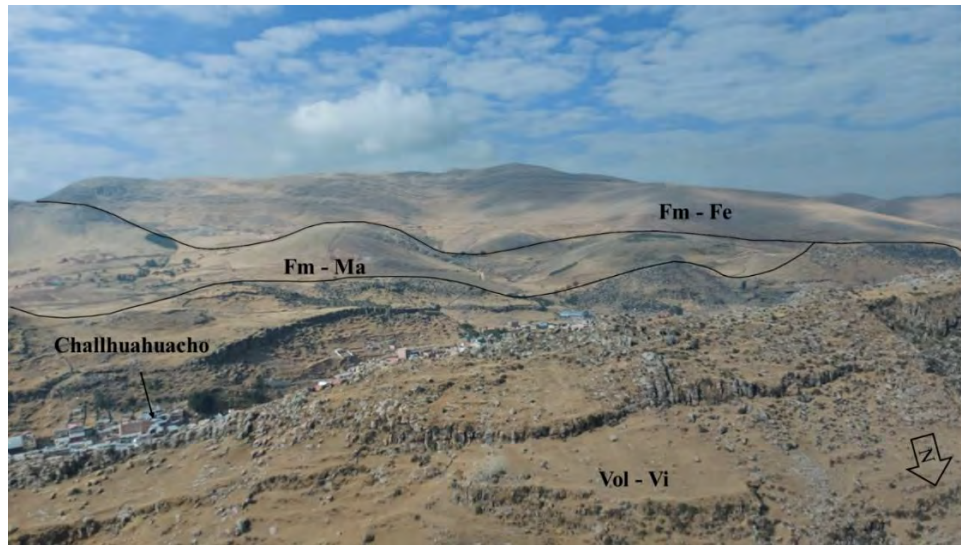
El espesor de esta unidad en la localidad de Mara supera los 300 metros, por otro lado, se han identificado secuencias de esta formación en localidades de Antabamba y Chuquibambilla donde su espesor bordea los 200 metros (Pecho, 1981).

En el área del yacimiento Las Bambas – Ferrobamba, el área de Exploraciones ha descubierto hornfels de biotita y piroxeno al noroeste del proyecto minero Chalcobamba y en Charcas, pertenecientes a la Formación Mara (MMG Las Bambas, 2024).

Alrededor del área analizada, emerge al sureste y sur del tajo Ferrobamba (foto 5), con profundidades inferiores a 200 metros. Aunque no se hallaron restos fósiles, las relaciones estratigráficas con las Formación Ferrobamba y Soraya sugieren que data del Aptiano (Cretáceo inferior). En ocasiones, se observa mineralización en contacto con fases de intrusión (Pecho, 1981).

Su vínculo estratigráfico con otras unidades del sur del Perú es con la Formación Murco en Arequipa y la parte superior de la Formación Huancané en los alrededores del Lago Titicaca - Puno.

FOTO 5 AFLORAMIENTO DE LA FORMACIÓN MARA (FM-MA), FORMACIÓN FERROBAMBA (FM-FE) Y VOLCÁNICOS VILCARANI (VOL-VI), EN LAS PERIFERIAS DE CHALLHUAHUACHO, VISTA AL SUR



5.1.4 Formación Ferrobamba (Fm-Fe)

Pecho (1981): “describió una potente secuencia de calizas que aflora en la zona del yacimiento minero Las Bambas con el nombre de Formación Ferrobamba”.

Se emplaza a lo largo de la cordillera andina en dirección preferencial noroeste - sureste y atravesando la región Apurímac, tiene sus afloramientos más importantes en las provincias Chalhuanca y Antabamba.

Es la unidad sedimentaria de mayor extensión y espesor en el yacimiento minero Las Bambas.

Está compuesta por una secuencia de calizas negras y grises, monumentales y compactas, fosilíferas, con nódulos de chert, laminadas y calizas clásticas. Las calizas se clasifican en mudstone y waskstone, y en menor medida en packstone (Carlotto y otros, 2006). En su parte

superior está formada por calizas arenosas de color gris claro, mientras que en la base predomina lutitas carbonosas (Carlotto, y otros, 2009).

En el cuadrángulo de Santo Tomas el afloramiento más importante de esta formación geológica se halla en las cercanías del pueblo de Mara, al noroeste, donde puede llegar a extenderse hasta 800 metros (Pecho, 1981). Aparece en cuatro rincones fascinantes de Las Bambas (Ferrobamba, Chalcobamba, Sulfobamba y Azuljaja).

Es un metalotecto crucial en la zona, pues se erige como la roca acogedora de yacimientos mineros, moldeada por fases mineralizantes que originaron cuerpos de skarn de Cu – Mo (Au, Ag).

FOTO 6 AFLORAMIENTO DE LA FORMACIÓN MARA (FM-MA), FORMACIÓN FERROBAMBA (FM-FE), VOLCÁNICOS VILCARANI (VOL-VI), Y DEPÓSITOS ALUVIALES (DEP-AL) EN LAS PERIFERIAS DE CHALLHUAHUACHO



La edad de la Formación Ferrobamba fue datada con precisión debido al estudio de fósiles encontrados en las calizas, los cuales arrojan Albiano - Turoniano del Cretáceo medio. Su

correlación estratigráfica regional es con la Formación Arcurquina en la región Arequipa y con las calizas Ayabaca del grupo Moho en las regiones Cusco y Puno (Pecho, 1981).

5.1.5 Volcánicos Vilcarani (Vol-Vi)

Su nombre proviene de las llanuras de Vilcarani cerca del poblado de Santo Tomas (Pecho, 1981), es una unidad piroclástica constituida por tufos, ignimbritas de composición dacítica, andesítica y riolítica se encuentran rellenando paleo - valles en la zona sur del yacimiento Ferrobamba en los flancos y formando parte de los afluentes del Río Challhuahuacho (foto 7A). Su edad es del Pleistoceno, Cuaternario inferior.

Las características de estas rocas volcánicas son particulares y son de fácil reconocimiento, viéndose a lo lejos como acumulación de bloques de hasta 4m de diámetro producto de caídas, las disposiciones verticales de los taludes son típicas de las formaciones volcánicas (foto 7B), y en esta formación no hay excepción y se pueden visualizar en las márgenes del valle del río Chalhuahuacho.

Los afloramientos observados en las cercanías del Yacimiento Minero Ferrobamba, afloran cerca del Campamento Pionero y margen derecha del ingreso a la propiedad minera Las Bambas, presentan coloración rosácea con tonalidades rojas (foto 8), con textura afanítica, presentando cristales esporádicos de biotita, y vidrio volcánico. Los afloramientos muestran paredes verticales, con características de fácil reconocimiento (foto 7). La edad determinada según la posición estratigráfica regional es del Plioceno hasta el Pleistoceno (Pecho, 1981).

FOTO 7 AFLORAMIENTOS DE LOS VOLCÁNICOS VILCARANI (VOL-VI) AL SURESTE DEL TAJO FERROBAMBA (A) Y AL NORESTE DE CHALHUAHUACHO (B)

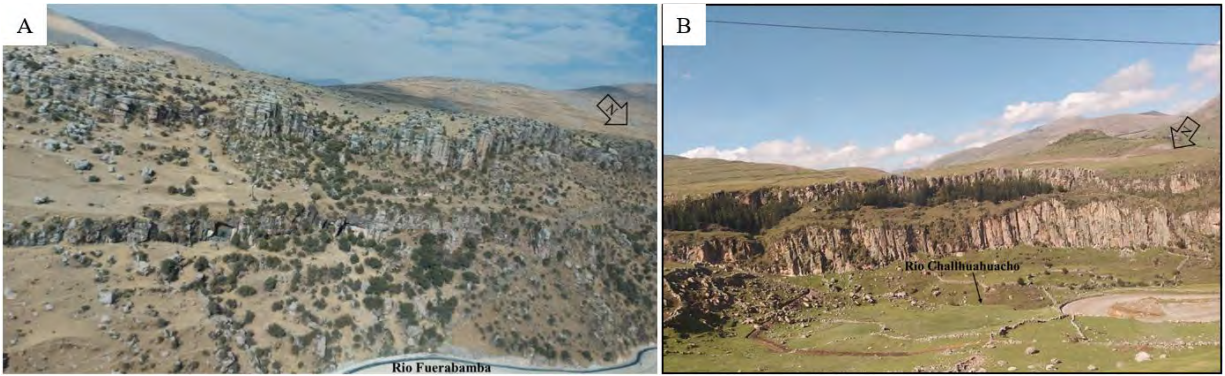


FOTO 8 MUESTRA DE MANO DE IGNIMBRITA, PERTENECIENTE A LA UNIDAD LITOLÓGICA VOLCÁNICOS VILCARANI



5.1.6 Morrenas y depósitos fluvio – glaciales (Qr-mf)

Todas las partes altas del área estudiada tienen huella de la acción glaciaria (espejos de fricción y estrías paralelas en las rocas). Depósitos recientes sedimentados en quebradas, colinas y llanuras.

Se caracterizan por presentar pendientes suaves a moderadas, que son aprovechadas por los pobladores como terrenos de cultivo, ya que contienen partículas finas poco consolidadas que son fáciles de remover.

5.2 ROCAS INTRUSIVAS A NIVEL REGIONAL

A escala regional, el batolito de Andahuaylas - Yauri muestra una evolución magmática que incluye las fases de diorita, granodiorita, cuarzo - feldespato y monzonita. La mineralización se encuentra vinculada, al menos, con las dos últimas fases (MMG Las Bambas, 2024).

En el área del metalotecto Las Bambas – Ferrobamba se tiene afloramientos de las fases mencionadas en el párrafo anterior, localmente el área del yacimiento Ferrobamba fue emplazado específicamente por la última fase (monzonita), sin embargo, es importante dar una visión macro para entender el tipo de yacimiento (MMG Las Bambas, 2024).

Para la ilustración de los afloramientos de rocas intrusivas a nivel regional en el mapa geológico regional se le ha asignado el código **Dgfmz**, al no contar con los contactos aproximados de las fases intrusivas descritas.

5.2.1 Dioritas (Dgfmz)

La diorita representa la primera fase de intrusión y presenta variaciones en su composición y textura, siendo esta última, en general, casi equigranular con tamaños variables.

Los afloramientos más extensos se encuentran en Sulfobamba, así como en las áreas norte y noreste del yacimiento de Chalcobamba. El contacto de esta fase con las calizas de Ferrobamba ha dado lugar a la formación de grandes cuerpos de skarn de magnetita y granate en los yacimientos de Sulfobamba y Chalcobamba. Sin embargo, en términos generales, estos cuerpos exhiben una baja mineralización de cobre. En el área de estudio, esta fase no presenta afloramientos.

5.2.2 Granodioritas (Dgfmz)

La granodiorita representa la segunda fase de intrusión y exhibe variaciones tanto en su composición como en su textura. Se presenta de manera significativa en el sureste del yacimiento Chalcobamba. La estructura del material presenta un grano grueso, caracterizándose por una textura equigranular ligeramente porfirítica y una matriz escasa. Está constituido por cristales de cuarzo, plagioclasas y anfíboles, los cuales se presentan en formas subhedrales a anhedrales. Asimismo, se observa la presencia de biotita que forma agregados de mica. Asimismo, se forman pequeños cuerpos de skarn que presentan granate de tonalidad marrón amarillenta, caracterizados por una baja mineralización de cobre. En determinadas regiones del área de estudio, esta fase no exhibe afloramientos (MMG Las Bambas, 2024).

5.2.3 Pórfido cuarzo – feldespato (Dgfmz)

El pórfido cuarzo-feldespático representa la tercera fase de intrusión y presenta variaciones tanto en su composición como en su textura. Se distingue por la presencia de fenocristales de feldespato potásico, así como por una textura porfirítica y un tamaño de grano grueso. Se observa la presencia de afloramientos en las proximidades de los yacimientos Sulfobamba y Azuljaja, donde se han evidenciado ocurrencias minerales asociadas a esta fase de

intrusión. La fase de intrusión se clasifica parcialmente como roca huésped y evidencia el desarrollo de sistemas de mineralización de tipo pórfido. En la zona central, se presenta una alteración potásica, caracterizada por la predominancia de biotita secundaria sobre feldespato potásico. En las áreas periféricas, se identifican asociaciones de albita - epidota, clorita y trazas de sericita. Finalmente, en los bordes, se observa un ensamble predominante de epidota, clorita y calcita. En estos sistemas, se observa la presencia diseminada de pirita y calcopirita, así como la existencia de venillas de cuarzo, las cuales desempeñan un papel en los procesos de alteración y mineralización. En la región del yacimiento Ferrobamba, no se dispone de extensiones significativas de esta fase (MMG Las Bambas, 2024).

5.2.4 Monzonitas (Dgzmz)

La monzonita representa la cuarta fase de intrusión y se manifiesta en etapas sucesivas, caracterizándose por una notable variación textural. Los afloramientos se encuentran asociados a zonas mineralizadas, tanto en el área de estudio como en la franja metalogenética Andahuaylas - Yauri. Las fases mencionadas han dado lugar, en términos generales, a la formación de centros de mineralización, entre los cuales se destacan los distritos de Tintaya, Katanga, Huinchos, Ferrobamba, Chalcobamba, Sulfobamba, Los Chancas, así como otros de menor relevancia (Informe Programa de Exploración Xtrata, 2008). Las zonas mineralizadas presentan cuerpos de skarn compuestos por granates, piroxenos y magnetita, los cuales están asociados a sistemas porfíricos. En el distrito minero Las Bambas–Ferrobamba, las fases de explotación se localizan predominantemente en las áreas de Ferrobamba y Chalcobamba. Además de estos yacimientos de relevancia económica, existen otros depósitos de menor tamaño que carecen de viabilidad económica. Los intrusivos porfídicos con mineralización de Cu-Mo (Ag) exhiben una alteración potásica en la zona central, la cual se caracteriza por la presencia de biotita secundaria,

feldespato potásico y magnetita. Esta alteración potásica evoluciona de manera gradual hacia una alteración propilítica en los bordes, donde se identifican epidota, clorita, pirita y trazas de calcopirita (MMG Las Bambas, 2024).

En el área del yacimiento Ferrobamba se ha llevado a cabo la identificación del emplazamiento correspondiente a la fase monzonítica, la cual se subdivide en cuatro subfases. La primera subfase ejerció una influencia significativa en la mineralización porfirítica y skarn. En este contexto, la mineralización en los pórfidos se manifiesta a través del relleno de fracturas, venillas y diseminaciones. Las venillas tienden a formar stockwork que se componen de cuarzo, calcopirita, bornita, calcosina y molibdenita. La densidad de estos stockwork se encuentra directamente relacionada con la cantidad de sulfuros presentes. La alteración retrógrada se define por la presencia de anfíboles, epidota, especularita y calcita, siendo comúnmente identificada en la sección distal del sistema. La alteración hidrotermal presenta un desarrollo limitado. En la fase inicial, se observa una leve alteración potásica asociada al cuarzo, la cual se manifiesta a través de la biotita secundaria y el feldespato potásico que reemplazan a los minerales máficos y ocupan la matriz. El cuarzo se localiza tanto en la matriz como en venillas. En las etapas avanzadas del proceso, la alteración se manifiesta a través de la presencia de minerales ferromagnesianos cloritizados, biotita secundaria, clorita en venillas, así como algunas venillas de cuarzo que presentan halos de biotita secundaria o clorita (MMG Las Bambas, 2024).

5.2.5 Fases tardías (Ft)

Como resultado de la diferenciación magmática, se identifican diques tardíos que emergen en diversas zonas del área, presentando composiciones latíticas, dacíticas y andesíticas. Ciertos diques se extienden a lo largo de varios kilómetros, atravesando el yacimiento de Las Bambas (MMG Las Bambas, 2024).

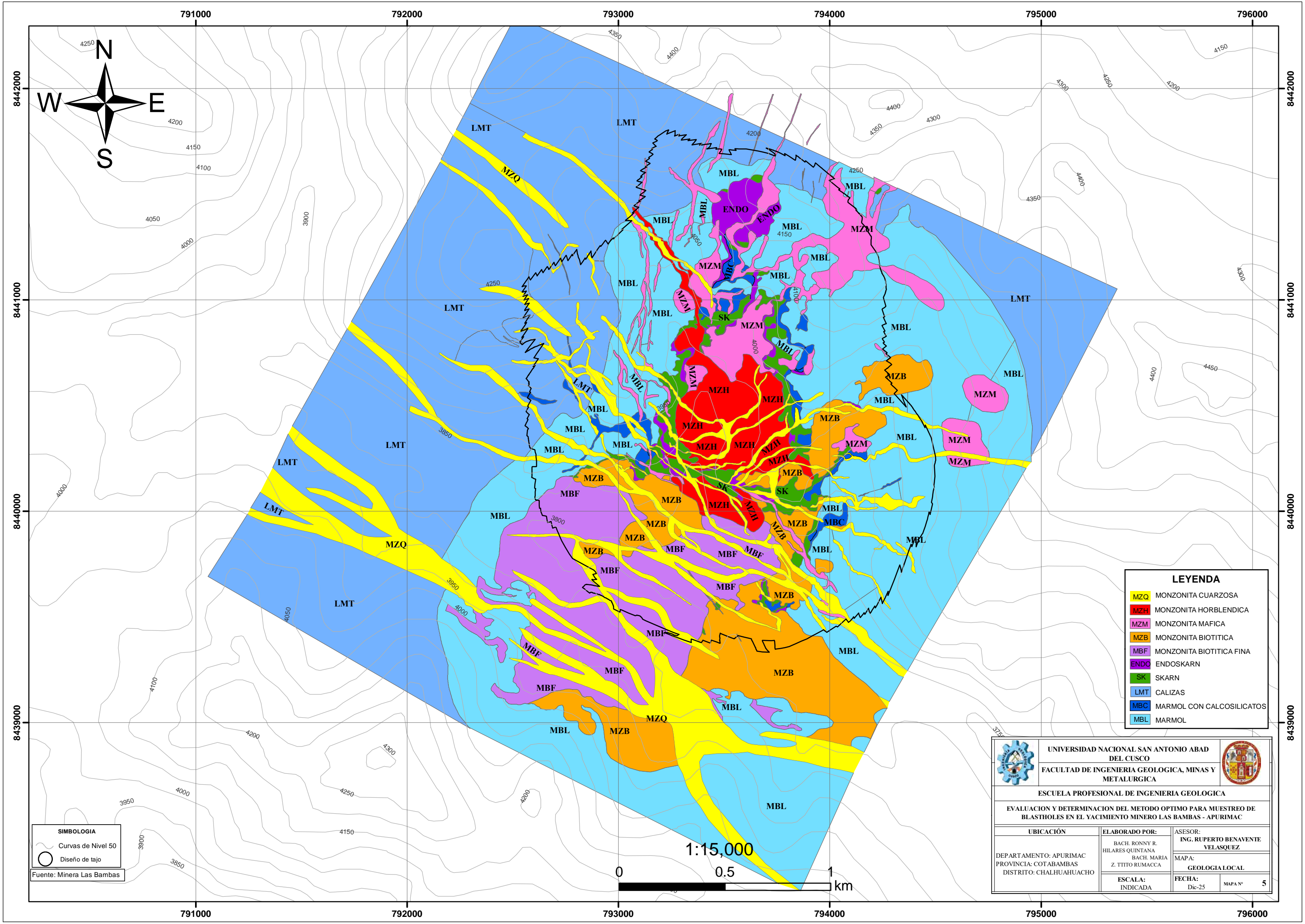
En Ferrobamba, como en Chalcobamba, los diques exhiben una composición cuarzo-monzonítica. Se caracterizan por la presencia de ojos de cuarzo y, en ciertos casos, por la inclusión de fenocristales de ortosa. La dirección predominante de estos diques se establece como noroeste - sureste en Ferrobamba, mientras que en Chalcobamba se observa una orientación de oeste noroeste a este sureste y de noreste - suroeste. A nivel local, se observa una alteración de plagioclasas, clorita, epidota y sericita, la cual se encuentra acompañada por una mineralización débil de pirita, calcopirita y trazas de bornita (MMG Las Bambas, 2024).

En cuanto a la mineralización de estos cuerpos, se puede mencionar que, en zonas que cortan rocas mineralizadas ya sea skarn de granates o skarn de piroxenos por arrastre presentan mineralización de baja ley de cobre en calcopirita y crisocola o en trazas de estos minerales, en general son estériles.

5.3 GEOLOGIA LOCAL

El presente apartado describe las características físicas de las principales unidades litológicas del yacimiento Las Bambas - Ferrobamba, para ello se ha utilizado la información del mapeo superficial, interpretación litológica de testigos diamantinos (modelo geológico de largo plazo), mapeo de taludes y la interpretación de litología por bancos a partir del logueo de blastholes (modelo geológico de corto plazo) , toda esta información se ha almacenado a largo del tiempo desde la etapa de proyecto.

Se ha tomado como base fundamental la geología de estudios anteriores, además de contar con nuevos aportes como la actual información obtenida en el proceso de minado. Los taludes expuestos y la profundización del tajo por el proceso de explotación dan mucha información geológica, estructural, de alteraciones, y mineralización, cuya información es limitada en la superficie o en los inicios del proyecto.



SIMBOLOGIA

Curvas de Nivel 50

Diseño de tajo

Fuente: Minera Las Bambas

LEYENDA

- MZQ MONZONITA CUARZOSA
- MZH MONZONITA HORBLENDICA
- MZM MONZONITA MAFICA
- MZB MONZONITA BIOTITICA
- MBF MONZONITA BIOTITICA FINA
- ENDO ENDOSKARN
- SK SKARN
- LMT CALIZAS
- MBC MARMOL CON CALCOSILICATOS
- MBL MARMOL

| | | | | | |
|--|--|--|--|---|--|
|  | | UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO | |  | |
| FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGICA | | | | | |
| ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA | | | | | |
| EVALUACION Y DETERMINACION DEL METODO OPTIMO PARA MUESTREO DE BLASTHOLES EN EL YACIMIENTO MINERO LAS BAMBAS - APURIMAC | | | | | |
| UBICACIÓN | | ELABORADO POR: | | ASESOR: | |
| DEPARTAMENTO: APURIMAC PROVINCIA: COTABAMBAS DISTRITO: CHALHUACHO | | BACH. RONNY R. HILARES QUINTANA | | ING. RUPERTO BENAVENTE VELASQUEZ | |
| | | BACH. MARIA Z. TTITO RUMACCA | | MAPA: GEOLOGIA LOCAL | |
| | | ESCALA: INDICADA | | FECHA: Dic-25 | |
| | | | | MAPA Nº 5 | |

En el entorno local del yacimiento Ferrobamba afloran rocas sedimentarias carbonatadas de la Formación Ferrobamba, las cuales fueron intruidas por rocas monzoníticas en múltiples fases, las mismas que contribuyeron con la mineralización de este importante yacimiento.

5.3.1 Formación Ferrobamba (Fm-Fe)

En el área de estudio se despliega una extensa secuencia de estratos calcáreos de la Formación Ferrobamba, compuesto por calizas con nódulos de chert, fosilíferas y bioclásticas, calizas impuras con clastos finos y niveles masivos y laminados, entre otros. Las calizas afloran principalmente hacia la parte periférica del yacimiento (norte, noroeste y oeste) donde no ha llegado el metamorfismo, la parte central del tajo Ferrobamba no cuenta con afloramientos considerables, puesto que, al ser centro del emplazamiento ígneo y por el proceso del metamorfismo y metasomatismo ha sido transformado en mármol, y skarn.

Carlotto y otros (2006) levantaron una columna estratigráfica de la Formación Ferrobamba en las inmediaciones de la Laguna Ccomerccocho (sureste del poblado de Cotabambas), en la cual describen cuatro secuencias de calizas diferenciadas según la edad asignada por la presencia de fósiles, cada una de estas secuencias consideran como mayores, las cuales a su vez cuentan con tres secuencias menores. Estas secuencias para ser diferenciadas entre si poseen características particulares que fueron descritas en la columna estratigráfica (figura 3), las cuales explican las condiciones ambientales y sedimentológicas de formación de las litofacies.

La secuencia I, (0-165m) del tipo transgresivas - regresivas. El primer tramo, de 0 a 72 metros, se despliega con texturas mudstone y concluye con texturas packstone. El segundo tramo, de entre 72 y 125 metros, se despliega con bases de mudstone y wackestone,

evolucionando hacia mudstone en el centro y culminando en wackestone con abundantes bioclastos. La tercera (125-165 metros) exhibe una superficie de wackestone que, al llegar al techo, se transforma en packstone con bioclastos (Carlotto, y otros, 2009).

La secuencia II, (165-340m). La primera secuencia (165-200 m) muestra progradación, comenzando en la base con calizas mudstone-wackestone y terminando en el techo con mudstone con abundante chert. La segunda secuencia (200-280 m) presenta un carácter aparentemente transgresivo, iniciando con mudstone que contiene chert y finalizando con oolitos y bioclastos de ambientes intertidales. La tercera secuencia (280-340 m) es regresiva, ya que las calizas mudstone de la base evolucionan hacia facies packstone en el techo (Carlotto, y otros, 2009).

La secuencia III, (340-515m), La primera unidad (340-375 m) muestra una tendencia típicamente regresiva, con facies que van de mudstone a wackestone, finalizando con brechas en un ambiente supratidal. La segunda unidad (375-445 m) es de naturaleza transgresiva, iniciando con mudstone de ambiente supratidal que gradualmente se transforma en wackestone subtidal con presencia de ammonites. Este lapso podría representar un salto colosal y la evolución fugaz de una plataforma externa. En esta secuencia también se descubren grietas sin cimientos. La tercera unidad (445-515 m) revela una metamorfosis, donde el wackestone laminado con algas se transforma en un packstone intertidal con bioclastos y chert en un ambiente supratidal. (Carlotto, y otros, 2009).

La secuencia IV, (515-697m). La primera fracción, de 515 a 570 metros, exhibe una metamorfosis radical, con vastos conjuntos de calizas micríticas con chert en el cielo supratidal, avanzando hacia calizas wackestone laminadas con algas en la intertidal y concluyendo con mudstone subtidal. La segunda fracción, de 570 a 625 metros, exhibe facetas que fluctúan entre

el wackestone con sus laminaciones algales intertidales y el mudstone con su chert supratidal. La tercera unidad (625-697 m) sigue los pasos de la anterior, aunque se intensifica la formación de facies supratidales, dominadas por mudstone y wackestone, y con un caudal de chert abundante. (Carlotto, y otros, 2009).

(Carlotto, y otros, 2006) definen: La formación sedimentaria de las calizas Ferrobamba se caracteriza por un patrón transgresivo - regresivo, el cual se desarrolla sobre una plataforma carbonatada interna que experimenta subsidencia. El nivel máximo de transgresión se observa en la secuencia III, caracterizada por la aparición de ammonites, lo cual coincide con el inicio de los deslizamientos. La subsidencia fue influenciada por fallas normales, análogas a aquellas que delimitan la Cuenca Occidental del alto Cusco – Puno. (pag. 526).

Las calizas conservan su estructura, y composición en las partes externas del tajo Ferrobamba, hacia el centro de este las rocas carbonatadas han sufrido la alteración por metamorfismo de contacto, por lo que éstas evidencian la recristalización de la calcita y son considerados mármol.

FIGURA 3

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA LOCAL DE LA FORMACIÓN FERROBAMBA LEVANTADA EN LA LAGUNA CCOMERCCOCHA (CARLOTTO Y OTROS, 2006)

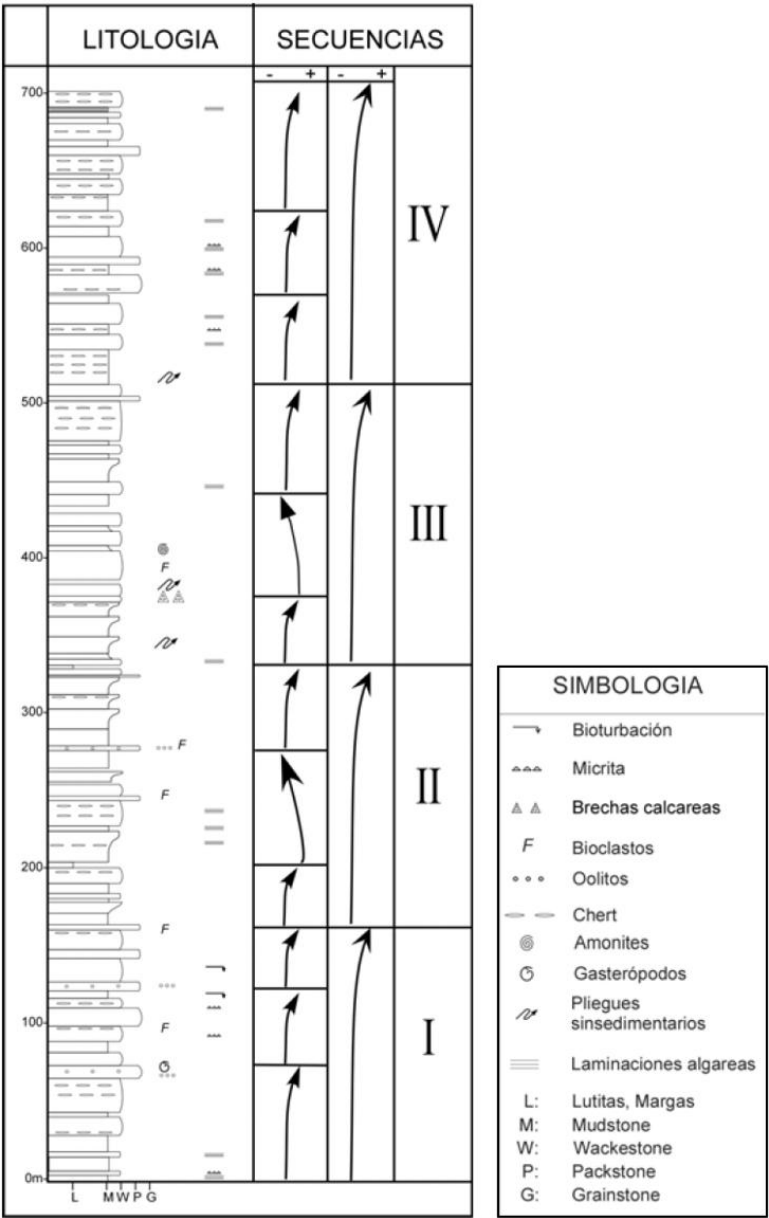
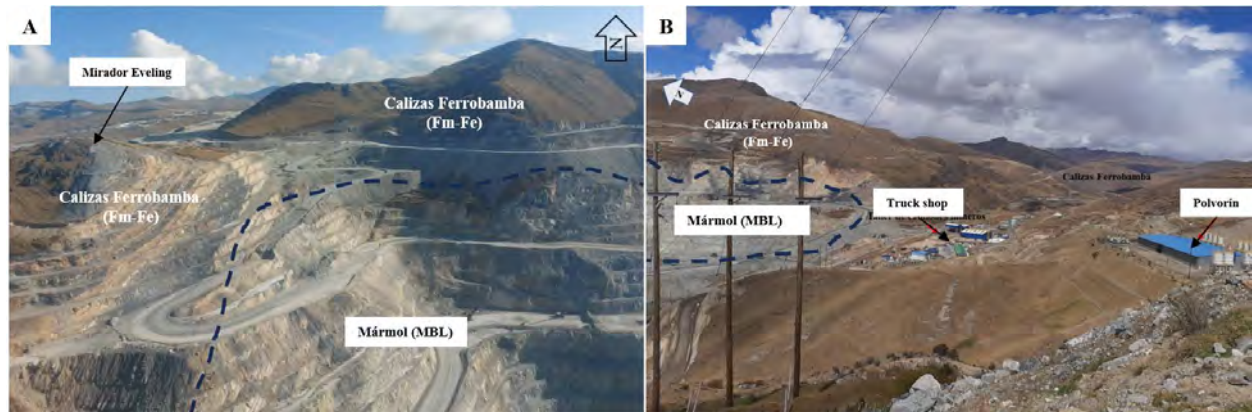


FOTO 9 VISTAS PANORÁMICAS DEL TAJO FERROBAMBA, FLANCO OESTE (A) Y ZONA ESTE (B)



En la foto 9A, se muestra las partes altas que rodean el tajo Ferrobamba donde aflora la Formación Ferrobamba, la coloración de las calizas es de blanquecinas (amarillos por alteración retrograda) a grises. La foto 9B se tiene la vista panorámica de la zona este del tajo Ferrobamba, en la que se observa las instalaciones del truck shop. Se observa afloramiento de calizas Ferrobamba, en zonas externas del tajo.

5.3.2 Fases Monzoníticas

La secuencia calcárea de la Formación Ferrobamba ha sido fragmentado por múltiples episodios de intrusión, sumando en total 5 fases, de las cuales las primeras 3 fases fueron importantes, ya que dicho evento ha aportado con la mineralización del yacimiento. Según estudios de exploración se identificaron un total de 6 fases de intrusión debido a que la monzonita biotítica (MZB) se ha subdividido en monzonita biotítica fina 1 y 2, sin embargo, para el presente estudio se consideran solamente 5 fases, la monzonita biotítica fina 1 y 2 se consideraran como monzonita biotítica fina (MBF).

Las últimas 2 fases son en general estériles, si bien es cierto que en algunas zonas puntuales se evidencian mineralización, sin embargo, no es resaltante. Se pueden apreciar

calcopirita y pirita en disseminación y en fracturas, sobre todo en zonas de contacto con pórfidos mineralizados básicamente por influencia de la roca caja.

5.3.2.1 Monzonita biotítica (MZB)

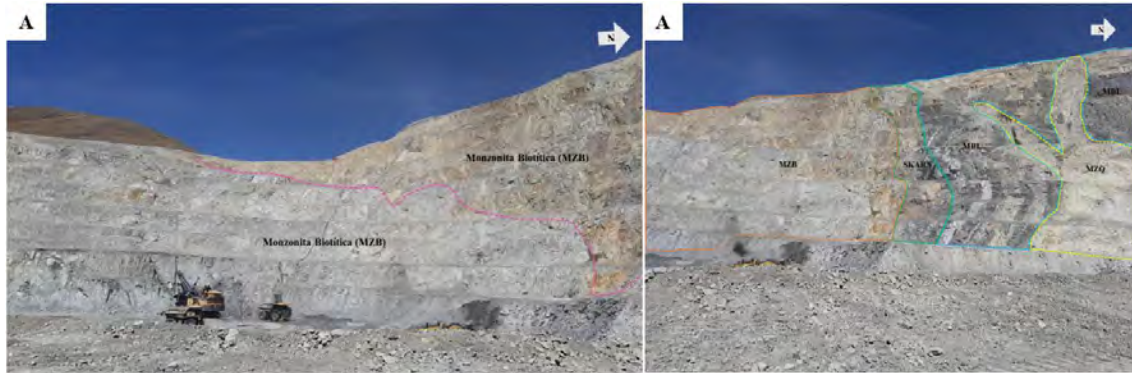
Se clasifica como la primera fase, caracterizada por un grano de tamaño medio a grueso y una textura porfirítica, con una proporción de fenocristales a matriz de 75:25. Se observan biotitas con diámetros de hasta 4 mm, así como plagioclasas en disposición seriada, algunas de las cuales presentan una morfología en forma de cuña. Además, se identifican hornblendas de estructura prismática alargada y cristales de cuarzo anhedrales que no exceden el 1% en su proporción. Entre los minerales accesorios se identifican la esfena y la magnetita (MMG Las Bambas, 2024).

Esta fase, que se manifiesta principalmente en el sector sur, ha dado lugar a la formación de cuerpos de skarn que presentan granate de tonalidades marrón rojizo y verde amarillento, así como piroxenos y, en menor proporción, magnetita. La mineralización asociada comprende calcopirita, bornita y molibdenita, las cuales están relacionadas con la alteración potásica de biotita secundaria, ortosa y magnetita (MMG Las Bambas, 2024).

En la foto 10A se tiene la vista mostrando afloramiento de monzonita biotítica (MZB) expuesto por los cortes de minado, la línea fucsia limita la zona afectada por la alteración supérgena (retrograda) y la zona primaria, nótese la diferencia de coloración.

La foto 10B se ha dibujado los contactos entre litologías para tener mejor referencia, se observa afloramiento del cuerpo de skarn que varía de 15m a 25m de potencia, formado en el contacto entre monzonita biotítica (MZB) y mármol (MBL) (B).

FOTO 10 FOTO DE LOS TALUDES DE LA ZONA OESTE DEL TAJO FERROBAMBA



Esta fase intrusiva se evidencia también en la parte norte del tajo Ferrobamba, en contacto con las calizas se ha formado delgados cuerpos de skarn, a lo mucho 5m. Existen zonas donde no presenta mineralización importante, es decir, zonas donde las leyes de Cu no superan el 0.20%, por lo que son considerados zonas estériles. En la zona sur del tajo, el contenido de molibdeno (Mo) es el más importante en cuanto a la ley, así como también en el procesamiento metalúrgico, siendo la zona de mejor recuperación.

En general esta mineralizado, siendo la fase intrusiva de mayor extensión con respecto a los pórfidos mineralizados.

La foto 11 muestra un bloque de roca en la que se observa zona de contacto entre monzonita biotítica (MZB) y skarn (SK) de granates, la zona de endoskarn no se nota o es nula. La MZB resalta el tamaño de los cristales de biotita, con venillas delgadas de cuarzo y feldespato potásico. La foto corresponde a un bloque de roca de 2m de diámetro, ubicada en la zona este del tajo Ferrobamba.

FOTO 11 ZONA DE CONTACTO ENTRE MONZONITA BIOTÍTICA (MZB) Y SKARN (SK) DE GRANATES



5.3.2.2 Monzonita biotítica fina (MBF)

Se clasifica dentro de la segunda y tercera fase, presentando un grano de tamaño medio a grueso y una textura equigranular con características ligeramente porfiríticas. El material presenta características distintivas, tales como la presencia de "ojos" de cuarzo en formas irregulares, plagioclasas bimodales y pequeños cristales subhedrales de biotita. Asimismo, se observa la distribución esporádica de biotita y hornblenda. Los minerales accesorios presentes en el estudio incluyen la magnetita y la esfena.

En esta fase se generan cuerpos de skarn que se componen principalmente de granate y piroxeno, así como de magnetita en menor proporción. Además, se observa la mineralización de calcopirita y bornita. El pórfido presenta mineralización que incluye calcopirita, bornita y molibdenita, las cuales se encuentran tanto en forma de venillas asociadas con cuarzo como diseminadas. Esta mineralización se encuentra vinculada a la alteración potásica de biotita secundaria, ortosa y magnetita (MMG Las Bambas, 2024).

Foto 12 MUESTRA DE MANO DE MONZONITA BIOTÍTICA FINA (MBF), CON ALGUNOS CRISTALES DE BIOTITA Y VENILLAS DE CUARZO



Esta fase aflora en la parte sur (mapa 5). La mineralización se relaciona con la alteración potásica que afecta a la biotita secundaria, la ortosa y la magnetita (MMG Las Bambas, 2024).

5.3.2.4 Monzonita máfica (MZM)

Se clasifica como la tercera fase de intrusión, caracterizada por un grano de tamaño medio a fino y un alto contenido de minerales máficos, destacando la hornblenda en mayor proporción que la biotita. Además, se presentan plagioclasas, con una presencia limitada de cuarzo irregular, así como minerales accesorios como la magnetita y la esfena (MMG Las Bambas, 2024).

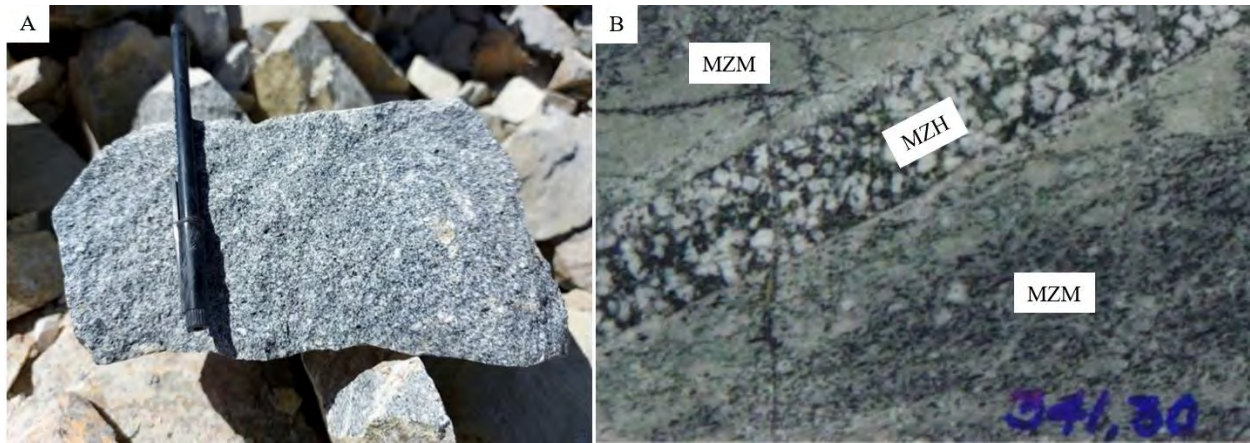
En el sector norte, en contacto con las calizas Ferrobamba, se observa la manifestación de esta fase, la cual ha dado lugar a la formación de cuerpos de skarn que contienen granate. Sin embargo, estos cuerpos son menos significativos en comparación con los presentes en la monzonita biotítica. Se caracterizan por tonalidades marrón y marrón-amarillento, así como por

la presencia de piroxenos y una cantidad limitada de magnetita. En determinadas áreas se evidencia una alteración potásica de biotita secundaria, ortosa y magnetita, además de la formación de endoskarn en la zona de contacto. La mineralización asociada comprende la presencia de calcopirita, bornita y molibdenita, las cuales se encuentran tanto en venillas como de manera diseminada (MMG Las Bambas, 2024).

Hacia el norte, en las partes altas, se ramifica en diques y sills, que al cortar las calizas han originado delgados cuerpos de skarn, con mineralización de calcopirita en menor cantidad que bornita y en algunos casos esfalerita es en mayor proporción que la galena (MMG Las Bambas, 2024).

En la foto 13A se observa de mano de monzonita máfica (MZM), en general la roca es oscura por el mayor contenido de los minerales ferromagnesianos, esta fue tomada en la parte alta del Tajo Ferrobamba, nivel 3885. La foto 13B muestra un testigo diamantino donde se observa monzonita máfica (MZM) cortada por monzonita hornbléndica (MZH) (foto adaptada del documento de Recursos Geológicos que corresponde al estudio de Factibilidad de Las Bambas).

FOTO 13 MUESTRA DE MANO (A) Y TESTIGO DIAMANTINO (B) DE LA MONZONITA MÁFICA (MZM)



En general esta fase intrusiva es medianamente mineralizada, la mineralización se presenta diseminado, en fracturas y en venillas, adicionalmente en zonas de contacto con rocas carbonatadas y skarn también forma minerales como la calcopirita, molibdenita. Se tiene zonas específicas donde es mayormente estéril, mientras más se aleja del sistema.

5.3.2.5 Monzonita hornbléndica (MZH)

Se considera como la cuarta fase de intrusión, caracterizada por un grano de tamaño medio y una textura porfirítica, con una proporción de fenos a matriz de 80:20. Se observan plagioclasas tabulares de dimensiones reducidas y casi uniformes, así como hornblendas en forma prismática. También se identifican biotitas de tamaño pequeño y una cantidad limitada de cristales de cuarzo. En cuanto a los minerales accesorios, se encuentran magnetita y esfena (MMG Las Bambas, 2024), con característica principal de textura equigranular. Los cristales de hornblenda tienen coloración clara y la textura con características principales de esta fase intrusiva.

Se manifiesta en la parte central y presenta una ramificación en forma de diques que intersecan rocas preexistentes en diversas direcciones, predominando la orientación noroeste-

sureste; corta a las fases de intrusión precedentes, al skarn y a las calizas (MMG Las Bambas, 2024).

Esta fase de intrusión provocó una interrupción y un enriquecimiento limitado de los cuerpos de skarn mediante la presencia de venillas de cuarzo que contienen calcopirita, bornita y molibdenita. Por tramos se observa venillas de cuarzo norte - sur, verticales, generalmente sin mineralización de cobre (MMG Las Bambas, 2024).

FOTO 14 MUESTRA DE MANO DE MONZONITA HORNBLÉNDICA (MZH), RECOLECTADA EN LA PARTE CENTRAL DEL TAJO FERROBAMBA



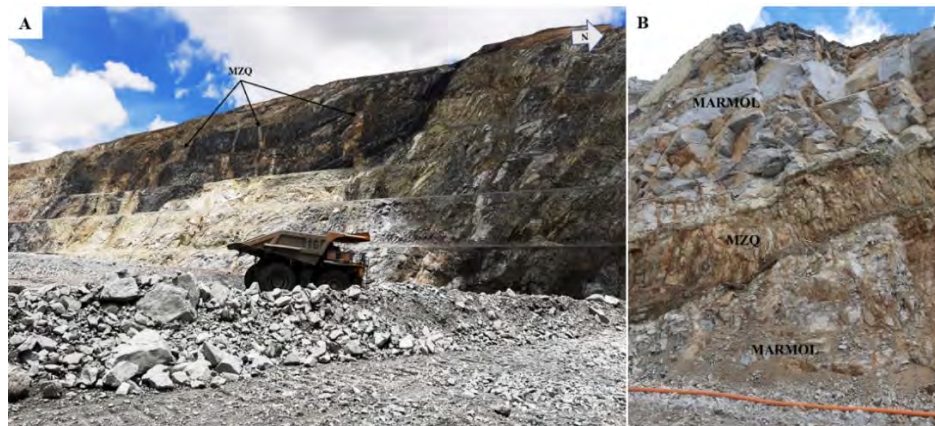
Las zonas de contacto con skarn presentan mineralización en fracturas y escasamente diseminada, hasta 10m de ancho desde el contacto. Se han encontrado zonas mineralizadas en el centro de esta fase intrusiva, sin embargo, no tienen anchos considerables como para ser aprovechado económicamente, se trata de zonas de fracturas que fueron percolados por aguas meteóricas, enriqueciendo ligeramente con Cu.

5.3.2.6 Monzonita cuarzosa (MZQ)

Se caracteriza por ser la última fase de intrusión, con grano medio y textura porfirítica. Esta presenta "ojos" de cuarzo en proporciones variables que no exceden el 15%. Además, se identifican plagioclasas tabulares cortas, hornblenda y biotitas de tamaño reducido. Entre los minerales accesorios se encuentran la esfena y la magnetita (MMG Las Bambas, 2024).

Se presentan en forma de diques con orientación noroeste-sureste, atravesando todas las unidades anteriores. En los contactos con las calizas, generan pequeños cuerpos de skarn cuando su espesor es significativo, mostrando trazas de calcopirita tanto en venillas como de manera diseminada (MMG Las Bambas, 2024).

FOTO 15 AFLORAMIENTO DE DIQUES DE MONZONITA CUARZOSA EN LADO OESTE DEL TAJO FERROBAMBA



En la foto 15A se observan diques de intrusivos post minerales (MZQ) cortando los distintos cuerpos litológicos. La foto 15B muestra el corte del talud donde se observa la intrusión de monzonita cuarzosa (MZQ) en mármol (MBL), zona oeste del Tajo Ferrobamba. La altura del talud es 15m.

En la foto 16 se observa muestra de mano de MZQ recolectada luego de la voladura. La muestra presenta textura porfirítica con cristales de plagioclasas, feldespato potásico. La característica principal son los cristales de cuarzo redondeados (ojos). Como accesorios contiene biotita mayor que hornblenda.

FOTO 16 MUESTRA DE MANO DE MONZONITA CUARZOSA (MZQ)



La monzonita cuarzosa es de fácil reconocimiento por las características descritas, sobre todo cuando corta rocas carbonatadas o el skarn, sin embargo, se hace difícil cuando corta rocas intrusivas especialmente a monzonita hornbléndica. El logueo de rocas en chips lo hace aún más complicado, sobre todo en los contactos, porque todos los detritos están entreverados, dificultando su selección.

Las intrusiones no mineralizantes de dirección este - oeste a sureste – noroeste afloran con anchos que varían de 2 a 5 metros, debido a la potencia reducida de estos intrusivos en contacto con las rocas carbonatadas no presenta ninguna mineralización.

5.3.3 Rocas de metamorfismo y metasomatismo de contacto

5.3.3.1 Metamorfismo de contacto

Las calizas Ferrobamba del Albiano – Cenomaniano (Cretácico Inferior – Superior), fueron intruidas por los intrusivos del Eoceno Oligoceno originando la formación de cuerpos de mármol, mármol con calcosilicatos, y endoskarn en zonas ígneas, por la recrystalización de la calcita y otros minerales silicatados por altas temperaturas y presión en el contacto con el magma, el metamorfismo ocurrido en Las Bambas es de contacto. Las zonas externas o distales de la fuente de intrusión fueron modificados de manera imperceptible o casi nula, es decir las rocas conservan la textura de calizas (Carlotto, y otros, 2009).

Localmente en el tajo Ferrobamba, se puede observar mármol en la parte central, norte, este y oeste, siendo de menor proporción en la parte central, ya que por estar cerca a la fuente de intrusión se formaron en gran parte skarn de granates y piroxenos por efecto del metasomatismo (Carlotto, y otros, 2009).

5.3.3.1.1 Endoskarn (ENDO)

Los endoskarns, se desarrollaron básicamente en intrusivos por recrystalización de los minerales componentes de los intrusivos debido a la presión y alteración hidrotermal, estos cuerpos presentan una distribución limitada y están caracterizados por la formación de granates de tonalidad marrón claro, escasa presencia de piroxeno, así como epidota, clorita, plagioclasas cálcicas, calcita y un grado moderado de silicificación. La mineralización en los endoskarn está constituida principalmente por calcopirita, bornita y crisocola, con presencia subordinada de molibdenita.

En la foto 17 se observa endoskarn con venillas de cuarzo, bornita, y en menor cantidad calcopirita, las características relictas del intrusivo se evidencian a la vista con lupa, la coloración verde se debe a los piroxenos.

FOTO 17 MUESTRA DE MANO DE ENDOSKARN



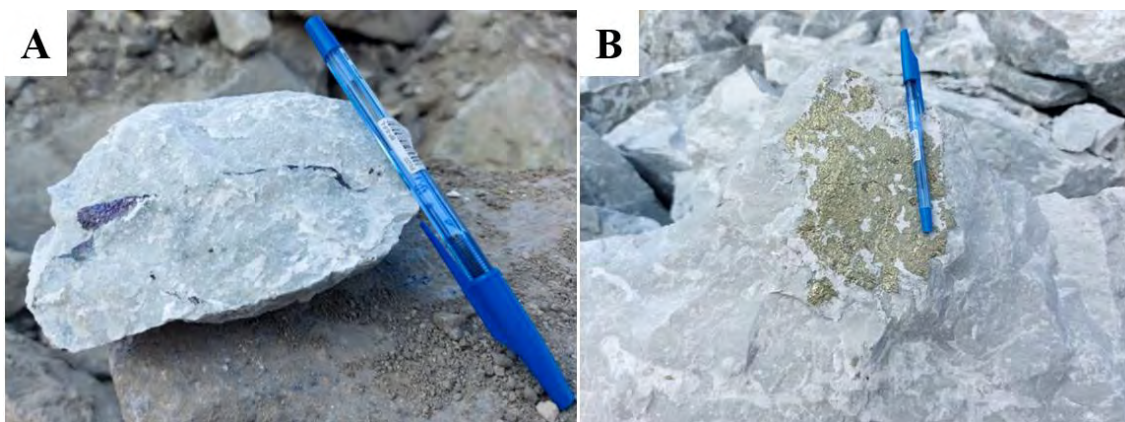
5.3.3.1.2 Mármol (MBL)

El código MBL proviene de la palabra mármol en ingles que es marble. La marmolización se produjo sobre los niveles calcáreos, ya sea en sectores distales de cuerpos de skarn o en contacto directo con algunos diques y cuerpos intrusivos, aunque los diques de aproximadamente 2 m de espesor no generan desarrollo de mármol. Hacia las zonas más alejadas, la intensidad de la marmolización disminuye, presentando una textura de grano fino, por lo general, una coloración gris.

Los fluidos hidrotermales tuvieron efectos de mineralización en el mármol, se observan mineralización de bornita y calcopirita en fracturas principalmente (foto 18), rara vez en venillas cuando está en contacto con cuerpos de skarn. No se observa mineralización de cobre por

diseminación en el mármol; se observan pirita diseminada en ciertas zonas como la zona oeste del tajo Ferrobamba.

FOTO 18 MUESTRA DE MANO DE MÁRMOL CON MINERALIZACIÓN DE BORNITA EN VENILLAS (A) Y CALCOPIRITA EN FRACTURAS (B)



Se puede observar alteración retrograda en el mármol por meteorización en los flancos este, oeste, y norte del tajo Ferrobamba, por la presencia de epidota, pirolusita, cuya coloración de la roca cambia de blanquecino a amarillento por la presencia de arcillas, esta alteración se profundiza en las zonas de falla; las fracturas y venillas con mineralización se observan alteradas con presencia de minerales oxidados de cobre como la crisocola, malaquita, menor azurita, en zonas superficiales donde quedan aún partes oxidadas se puede observar el proceso de alteración de bornita y calcopirita a dichos minerales oxidados.

En la foto 19 se tiene una muestra de mano de mármol en zona oxidada, se puede apreciar crisocola en venillas y minerales de alteración propilítica (epidota, clorita) y pirolusita. La muestra corresponde a la zona norte del tajo Ferrobamba.

FOTO 19 MUESTRA DE MANO DE MÁRMOL EN ZONA DE ALTERACIÓN RETRÓGRADA



5.3.3.1.3 Mármol con calcosilicatos (MBC)

Se les denomina así a las rocas metamórficas, las cuales tienen contenido de minerales calcosilicatados (silicatos ricos en calcio) como wollastonita, diópsido y a estas se las asocia con mineralización de cobre en venillas y fracturas un poco más que en el mármol.

Las zonas de mármol próximas a los cuerpos de skarn muestran la presencia de granates de tonalidades marrón y/o amarilla, los cuales se presentan como cristales diseminados o formando venillas; asimismo, se observa la ocurrencia de piroxenos. La wollastonita se desarrolla generalmente en los niveles que contienen chert, manifestándose como halos alrededor de los nódulos de este material.

5.3.3.2 Metasomatismo de contacto

Las calizas de la Formación Ferrobamba en contacto con las fases de intrusión han desarrollado cuerpos irregulares de skarn de granates y piroxenos (rocas metamórficas), por

efecto del metasomatismo de contacto, dando origen a la formación del yacimiento Ferrobamba con importancia económica para su explotación, con mineralización de Cu – Mo (Au, Ag) (Pons, Franchini, & Impiccini, 2009).

Los factores predominantes que facilitaron la formación de cuerpos de skarn son los siguientes: la composición de los fluidos hidrotermales vinculados a las fases de intrusión, la existencia de horizontes de calizas permeables, especialmente aquellos que contienen material clástico, la inclinación de los estratos en dirección a las fuentes intrusivas y la composición mineral de la roca huésped. En este contexto, las calizas micríticas dieron lugar a skarns ricos en granates, mientras que las calizas arcillosas favorecieron la formación de skarns con piroxenos. (Pons, Franchini, & Impiccini, 2009).

Para efectos de descripción y diferenciación correcta entre ambas litologías del tipo skarn o exoskarn (de granates y piroxenos), se ha separado, sin embargo, en el mapa geológico local se consideró como una sola unidad litológica.

5.3.3.2.1 Skarn de granates (SK)

La génesis de los cuerpos de skarn de granates está vinculada a las tres fases iniciales de intrusión que se desarrollaron en el área de Ferrobamba. Los skarns generados durante la primera fase se componen de granates de tamaño medio a grueso, presentando tonalidades que oscilan entre el marrón, el rojizo, el verde y el amarillo. Estos granates se encuentran intercalados con niveles de piroxenos y, en menor proporción, de magnetita. Estos cuerpos se encuentran situados en los límites del área de estudio, emergiendo en las zonas sur, central y este. Asimismo, se observa la mineralización de sulfuros de cobre, destacándose la bornita y calcopirita, en diversas formas tales como masas irregulares, disseminaciones y venillas de cuarzo. Por su parte, los

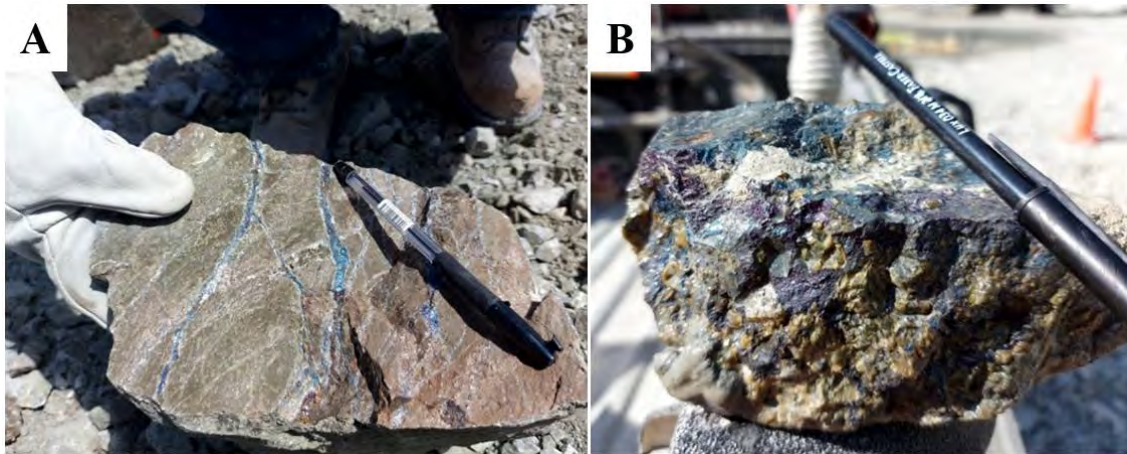
skarns formados durante la segunda fase son similares, aunque carecen de venillas de cuarzo. (Xstrata Perú S.A., 2009).

Las fases de intrusión mencionadas en el anterior párrafo fueron identificadas según informe de exploración y se refieren a la intrusión de monzonitas en tres etapas las cuales son de antiguo a reciente: monzonita biotítica, monzonita biotítica fina 2, y monzonita biotítica 1. En este estudio se considera localmente las tres fases de intrusión como un solo tipo litológico la cual es monzonita biotítica (MZB).

La mineralización hipógena representa el tipo más relevante, en el cual predominan los sulfuros, tales como la calcopirita, bornita y la molibdenita. Con respecto a los cuerpos de skarn, la mineralización se manifiesta de manera masiva (foto 20B), así como en forma de coágulos y de manera diseminada, alcanzando en ciertas áreas concentraciones elevadas de cobre. Las venillas de cuarzo presentan variaciones en la concentración de minerales como la bornita, la calcopirita y la calcosina (Xstrata Perú S.A., 2009).

En la foto 20A se tienen muestras de mano de skarn de granates de grano fino, con venillas de bornita mayor que calcopirita, la mineralización ha rellenado las venillas y fracturas. La foto 20B indica muestra de mano de skarn de granates de grano grueso, se pueden observar cristales de granates, y bornita masiva. La bornita se presenta como parches o rellenando intersticios.

FOTO 20 MUESTRA DE MANO DE SKARN DE GRANATES DE GRANO FINO (A) Y GRUESO (B) CON BORNITA MAYOR QUE CALCOPIRITA



Las leyes de cobre en los skarn son variables, pudiéndose identificar zonas con leyes por debajo de 0.15%Cu (roca estéril) en la parte norte del tajo Ferrobamba, específicamente es una zona intruida por monzonita máfica y está alejada del foco principal de mineralización.

Se puede observar zonas de enriquecimiento supérgeno, en los que se evidencian presencia de bornita, calcosina en forma masiva (foto 21), crisocola, malaquita, estos se presentan en formas irregulares y vetas. Dichas zonas mineralizadas en skarn de granates pueden contener en una muestra de blasthole valores de cobre mayores a 5% llegando a resultar concentraciones de hasta 15%.

Afloramiento de skarn de granates y magnetita con bornita, calcosina, calcopirita se puede apreciar en la foto 21. La zona representa una zona de enriquecimiento secundario por la presencia de calcosina.

FOTO 21 AFLORAMIENTO DE SKARN DE GRANATES EN ZONA OXIDADA



5.3.3.2.2 Skarn de piroxenos (SK)

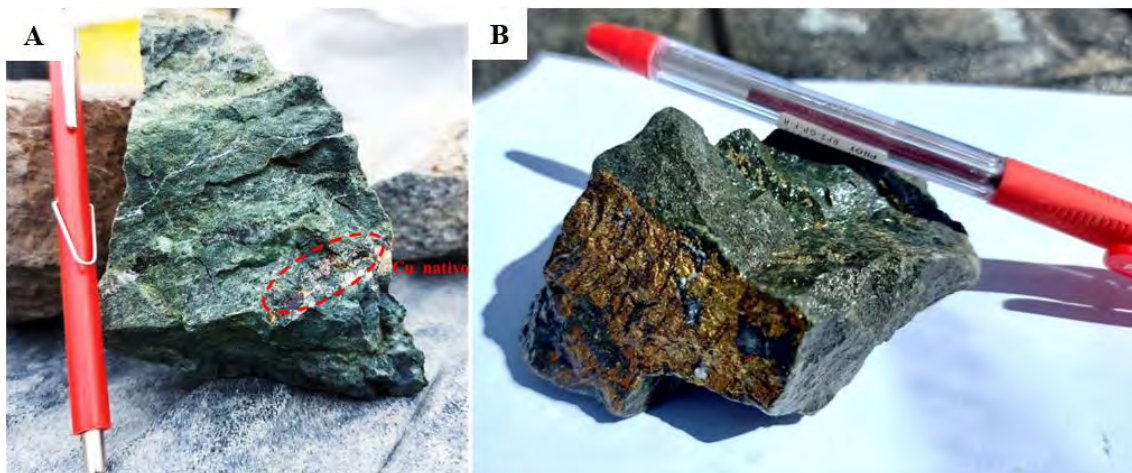
La formación del skarn de piroxenos está asociada al metasomatismo de las calizas dolomíticas en la que los fluidos mineralizantes tuvieron adición de Mg proveniente de las calizas magnésicas o dolomíticas, en ambientes neutros, condiciones reductoras, y mayor temperatura que el skarn de granates. El skarn de piroxenos se presenta en cuerpos irregulares, se ubica principalmente en la parte central del tajío Ferrobamba, su afloramiento es en menor extensión que el skarn de granates, es de coloración verdosa y frecuentemente contiene mineralización de calcopirita y bornita (foto 22B), también contiene cantidades de magnetita diseminada o en venillas, presenta venillas de cuarzo, la roca en general es más suave que el skarn de granates (Pons, Franchini, & Impiccini, 2009).

El skarn de piroxenos al ser procesados en planta concentradora suelen complicar la recuperación de cobre por tener contenidos de talco (mineral rico en Mg) en zonas de fracturas y

fallas. Estas zonas de debilidad son propicias para la formación de cobre nativo, ya que, el skarn de piroxenos y el cobre nativo (foto 22A) se forman en ambientes reductoras, el cobre nativo se forma principalmente por reducción del cobre disuelto en la zona de oxidación. El cobre nativo en Las Bambas no es de interés económico o es visto como mineral ornamental, puesto que, la planta concentradora está diseñada para procesar por flotación sulfuros de cobre y molibdeno; el cobre nativo se comporta como un mineral oxidado en el proceso de flotación y no es recuperable (Pons, Franchini, & Impiccini, 2009).

Muestra de mano de skarn de piroxenos con cobre nativo, magnetita diseminada, y venillas de cuarzo se puede apreciar en la foto 22A, el cobre nativo se puede apreciar a simple vista, o utilizando la lupa. En la foto 22B se observa muestra de mano de skarn de piroxenos, con calcopirita y bornita en fracturas y venillas, se puede observar concentración masiva de calcopirita mayor que bornita

FOTO 22 MUESTRAS DE MANO DE SKARN DE PIROXENOS CON COBRE NATIVO (A) Y MINERALIZACIÓN DE CALCOPIRITA Y BORNITA (B)



5.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

5.4.1 Geología estructural regional

Las Bambas – Ferrobamba, ubicado en el borde meridional de la Deflexión de Abancay, exhibe una metamorfosis en la trayectoria de los Andes peruanos, transformando su rumbo de noroeste a sureste a lo largo de más de 200 kilómetros. Este fenómeno se debe a la colisión diferencial entre la dorsal de Nazca y la placa sudamericana, un evento que moldeó la fisonomía contemporánea de la zona. En este escenario se despliega la orogenia andina, caracterizada por diversas direcciones de acortamiento tectónico: norte – este, norte – sur y este – oeste. En resumen, la metamorfosis tectónica y la configuración estructural, tanto regional como local, reflejan la metamorfosis tectono - estructural de la deflexión de Abancay (MMG Las Bambas, 2024).

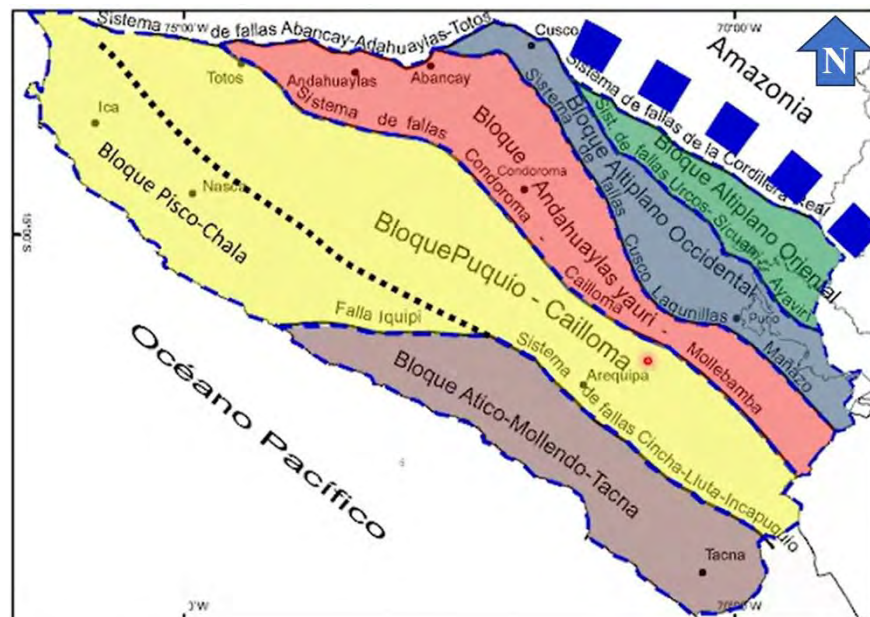
La deformación estructural regional pone en notoriedad fallas principales de tendencia general oeste norte oeste – este sur este que cortan a las unidades estratigráficas del Mesozoico, esta tendencia de estructuras es cortado por fallas noreste - suroeste y posteriormente por fallas en bloques post - mineral con dirección norte - sur. El sistema de fallas noreste-suroeste condiciona la concentración de cobre en varias zonas del yacimiento (MMG Las Bambas, 2024).

El yacimiento minero Las Bambas dentro de este marco geológico regional se encuentra dentro de franja metalogenética de pórfidos - skarn de Cu – Mo - Au denominado skarn belt Andahuaylas - Yauri situado al sureste del territorio peruano, en una zona de anomalía que se atribuye a la orogénesis Andina del Eoceno al Oligoceno (Brookes, 2005); esta franja metalogénica se extiende a lo largo del batolito Andahuaylas - Yauri, que presenta intrusiones múltiples de composición calco-alcalina. Las deformaciones en la región, que generan fallamientos y plegamientos están vinculadas a la fase Inca (MMG Las Bambas, 2024).

Carlotto y otros (2009) denominan al batolito Andahuaylas – Yauri dentro del dominio tectónico como *bloque Andahuaylas - Yauri*, que está controlado principalmente por tres fallas regionales (figura 3) las cuales son: por el norte el sistema de fallas Abancay – Andahuaylas – Totos con una dirección este – oeste; hacia el sur se tiene el sistema de fallas Condoroma – Caylloma – Mollebamba con dirección noroeste - sureste, este sistema de fallas se proyecta hacia Chile formando el sistema domeico cuya evolución magmática es similar que el batolito Andahuaylas – Yauri; y por el este se tiene al sistema de fallas Cusco – Lagunillas – Mañazo cuya dirección preferencial es noroeste – sureste. Estos sistemas de fallas habrían controlado las deformaciones de las cuencas sedimentarias, la evolución magmática y mineralización durante la evolución de los andes.

FIGURA 4

DOMINIOS TECTÓNICOS – ESTRUCTURALES DEL SUR DEL PERU (CARLOTTO, 2009)



5.4.2 Geología estructural local

Los intrusivos monzoníticos del yacimiento Las Bambas - Ferrobamba se encuentran asociados a un alineamiento estructural que presenta una dirección oeste - noroeste - este-sureste, similar a la tendencia del gran batolito Andahuaylas - Yauri, el cual también exhibe una dirección oeste - noroeste - este-sureste (MMG Las Bambas, 2024).

Según Lipa (2023), el análisis estructural a escala local indica que el yacimiento está controlado por regímenes extensionales de orientación oeste – este, asociados a la cinemática de las fallas principales oeste norte oeste – este sur este y a la acción de esfuerzos regionales. El autor distingue diversas estructuras, se identifican diversas características geológicas, tales como fallas, lineamientos y pliegues, destacando la falla Chuspiri – Fuerabamba. Esta falla forma parte del sistema de fallas que se extiende en dirección noroeste-sureste y representa la estructura predominante en la zona sur del tajo Ferrobamba. Dicha falla sería el resultado de la reactivación de una estructura preexistente con cinemática inicial compresiva (thrust), que posteriormente evolucionó hacia un régimen normal transtensivo, condicionando el emplazamiento de los plutones monzoníticos mineralizantes y reflejando un contexto de deformación regional (MMG Las Bambas, 2024).

En el año 2024 el área de Geotecnia de Las Bambas realizó una actualización en el modelamiento de fallas presentes en el tajo Ferrobamba, para ello le encargo los trabajos a la empresa SRK Consulting (Peru) S.A, como resultado del trabajo de mapeo estructural, datos de sondeo y/o lineamientos de superficie, se han interpretado un total de 271 fallas locales y todas estas fallas se han agrupado en 6 sistemas de fallas que se representan en la figura 5, estos se describen a continuación (SRK Consulting Peru S.A., 2024).

Sistema de fallas bajo, este sistema de fallas tiene una orientación aproximada de noroeste – sureste, su buzamiento es generalmente paralelo o subparalelo a la estratificación y fueron interpretadas como el sistema de fallas más antiguo reconocido en el área de estudio asociado con el evento de deformación (Hantelamn, 2021). La falla de mayor longitud de este sistema cruza la parte central del tajo Ferrobamba e influye en el control litológico, permitiendo la formación del skarn hacia el norte del tajo, adicionalmente se observa que a lo largo de esta falla se forman cuerpos de skarn con la misma orientación (SRK Consulting Peru S.A., 2024).

Sistema de fallas Joshua – Saida, están interpretadas como fallas intra – estratificadas limitada por las fallas bajo en el bloque techo, zona de alta deformación (SRK Consulting Peru S.A., 2024). Las fallas de este sistema tienen orientación noroeste – sureste (figura 5), se pueden observar en menor proporción con respecto a las fallas del sistema bajo.

Sistema de fallas norte – sur (NS), las fallas de este sistema están albergados en rocas intrusivas y están asociados con el evento de deformación (SRK Consulting Peru S.A., 2024). La orientación varia de noreste – suroeste a norte – sur (figura 5), se pueden observar mayores concentraciones hacia la parte norte central del tajo Ferrobamba cortando rocas del tipo skarn, y al sur cortando los pórfidos monzoníticos.

Sistema de fallas noroeste – sureste (NWSE), las fallas de este sistema cortan rocas intrusivas y sedimentarias y se han interpretado asociado al evento de deformación. Se puede observar concentraciones en la parte oeste del tajo Ferrobamba y al sur de este (figura5), del mismo modo, se aprecia al sur del tajo Ferrobamba una falla de mayor longitud con dirección noroeste – sureste que pasa por la zona de la chancadora primaria y el Campamento Pionero, se trataría de una falla regional denominado Chuspiri – Fuerabamba (SRK Consulting Peru S.A., 2024).

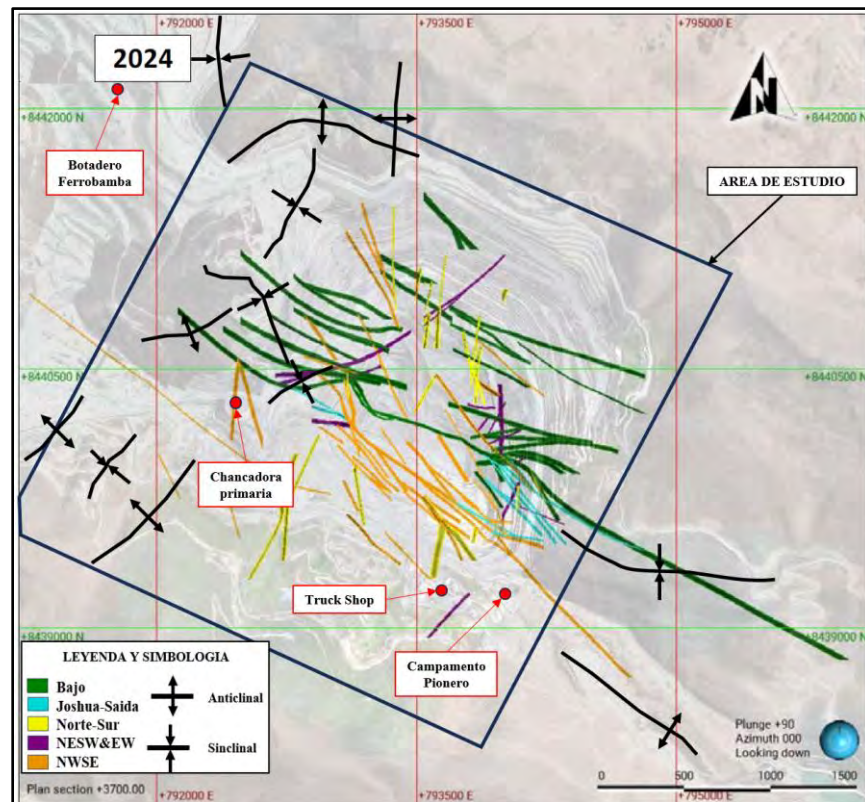
Sistema de fallas noreste – suroeste (NESW), las fallas de este sistema cortan litologías del tipo intrusivo y sedimentario ubicados principalmente en el contacto entre ambas rocas, al igual que los demás sistemas está asociado con el evento de deformación (SRK Consulting Peru S.A., 2024). Se pueden observar en concentraciones reducidas (figura 5), con respecto a los sistemas NWSE y bajo, sin embargo, se aprecia en mayor cantidad que las fallas del sistema EW.

Sistema de fallas este – oeste (EW), estas fallas se han interpretado como estructuras que cortan las rocas intrusivas y sedimentarias, se encuentran en el contacto entre ambas litologías similar a las fallas del sistema NESW, está interpretado asociado al evento de deformación; se dificulta la diferenciación de fallas del sistema EW con las del sistema bajo por la orientación similar, debido a que la estratificación se presenta cerca de la roca intrusiva donde pueden ocurrir altos niveles de deformación (Hantelman, 2024).

En la figura 5 se aprecian fallas locales de mayor longitud con orientación preferente noroeste – sureste, las fallas fueron ploteadas en el nivel 3700 m.s.n.m ya que ayuda a observar la mayor cantidad de fallas. Los plegamientos se concentran hacia el lado oeste del tajo.

FIGURA 5

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL DEL YACIMIENTO FERROBAMBA



Las fallas se identifican predominantemente en las unidades sedimentarias a través de la presencia de inconformidades, las cuales son el resultado del desplazamiento entre diversas unidades litológicas. Este fenómeno se encuentra asociado a planos de fallamiento de bajo ángulo. Como consecuencia, las unidades sedimentarias se encuentran plegadas, dando lugar a estructuras anticlinales y sinclinales (foto 17), algunas de ellas volcadas, cuyos ejes axiales presentan orientaciones noroeste – sureste y este – oeste (figura 5). Asimismo, se reconocen pliegues replegados con ejes norte - sur y norte noreste – sur suroeste, vinculados a una fase de deformación dúctil producida durante la fase Inca, bajo un régimen compresivo de dirección noreste – suroeste (Brookes, 2005). En numerosos casos, la disposición de los estratos resultó

favorable para el desarrollo de cuerpos de skarn en contacto con las fases intrusivas (MMG Las Bambas, 2024).

En la foto 23, se aprecia la vista del lado oeste del tajo Ferrobamba, mostrando mármol y calizas plegadas con buzamientos hacia el sur, cortadas por los diques monzoníticos (MZQ). Las zonas de color amarillo son rocas alteradas cuya condición es desfavorable para la estabilidad de taludes, zona frecuente de movimiento de laderas.

FOTO 23 VISTA DEL ANTICLINAL DEL LADO OESTE DEL TAJO FERROBAMBA



5.5 METALOGENIA

El yacimiento minero Las Bambas se encuentra en la franja metalogenética XV, caracterizada por la presencia de pórfidos y skarn de cobre - molibdeno (oro) de edad Eoceno-Oligoceno. Esta franja está ubicada en el sector suroriental del Perú, específicamente en la parte central de la Cordillera de los Andes (Figura 6).

La franja metalogenética en cuestión está controlada por el batolito Andahuaylas–Yauri, que data del Eoceno – Oligoceno. Este batolito presenta una composición calcoalcalina y una orientación SE – NW, y se encuentra emplazado en unidades dinámicas carbonatadas del Mesozoico, siendo la Formación Ferrobamba (Cretácico Inferior a Superior) la más significativa en este contexto (Quispe et al., 2007, 2008). Las rocas intrusivas del batolito Andahuaylas–Yauri presentan una variabilidad en su composición que abarca desde características básicas hasta ácidas. El contacto de estas rocas con las calizas de la Formación Ferrobamba ha inducido un fenómeno de metamorfismo de contacto, lo que ha resultado en la formación de cuerpos irregulares de skarn y en la generación de significativos cuerpos de mármol. Estos procesos están asociados con la mineralización de cobre (Cu), molibdeno (Mo) y oro (Au), así como con la presencia subordinada de plata (Ag), zinc (Zn) y hierro (Fe). La mineralización de Cu – (Mo – Au) se relaciona principalmente con intrusivos de composición intermedia a ácida, como es el caso de Ferrobamba. Por otro lado, los intrusivos de carácter más básico están asociados a mineralizaciones de Fe – Cu – Au, como se observa en Chalcobamba. Adicionalmente, se evidencia el desarrollo de vetas predominantemente de Au – Cu en los cuerpos intrusivos (Acosta, y otros, 2020).

En el yacimiento minero Las Bambas – Ferrobamba, las diversas fases de intrusión del Batolito Andahuaylas – Yauri han provocado distintos grados de metamorfismo y metasomatismo, tanto en las rocas huésped como en las propias rocas intrusivas. El contacto de las rocas intrusivas del batolito con las calizas de Ferrobamba ha dado lugar a un metamorfismo de contacto, generando en algunas zonas cuerpos de skarn con mineralización de Cu.

Localmente la mineralización de Las Bambas – Ferrobamba está asociado a alteraciones prógrada y retrograda en el skarn, y en las monzonitas a la alteración potásica – propilítica, la edad de los eventos magmáticos de mineralización se estima en 34 ± 01 Ma (Alvarez, 2021).

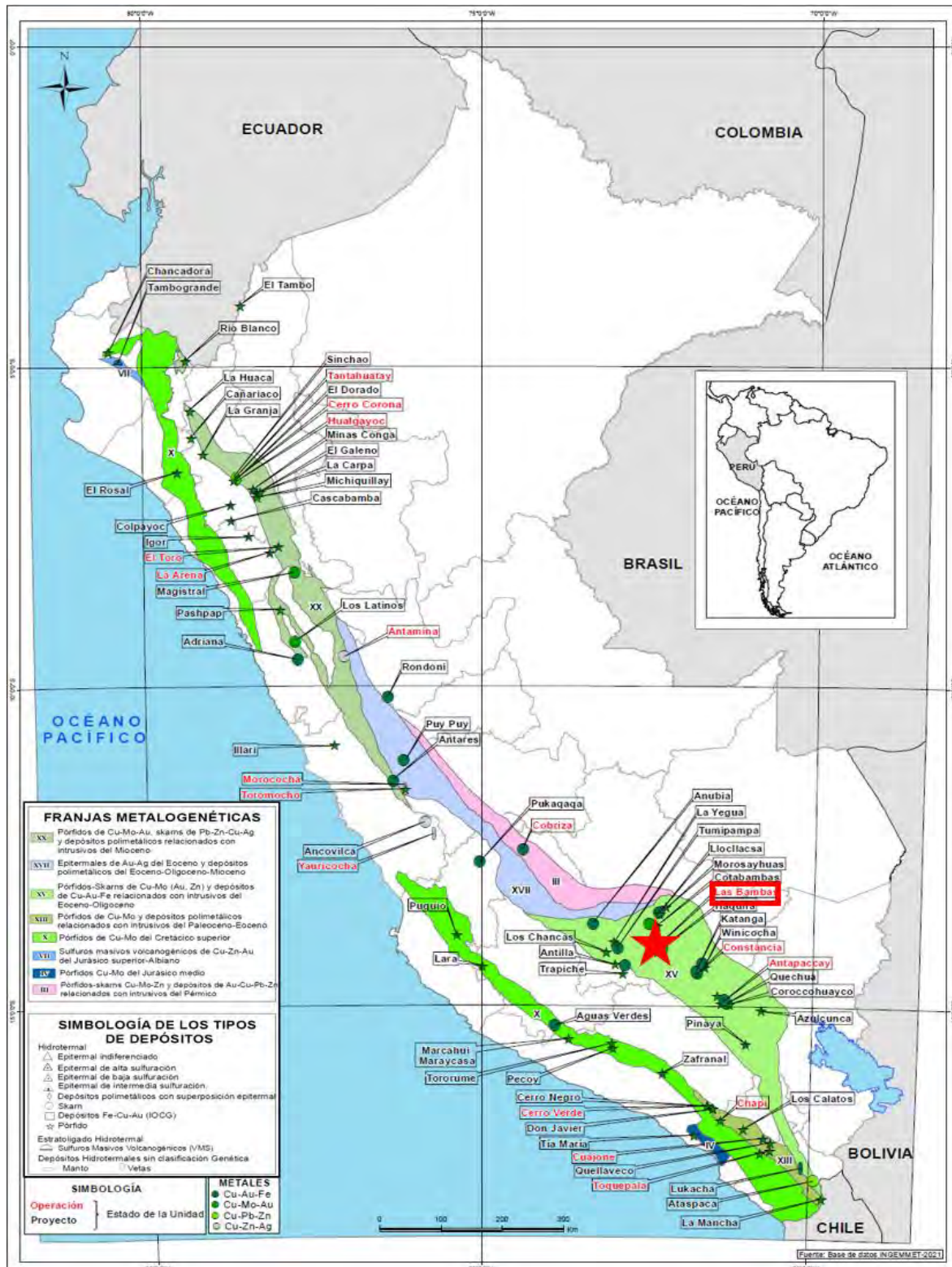
La siguiente fotografía (foto 24) muestra una vista hacia el norte del yacimiento Ferrobamba en la etapa de exploración. Se pueden apreciar plataformas de perforación diamantina, que inició los estudios de exploración, delimitación, y generación del modelo geológico de largo plazo para cuantificar los recursos y reservas de mineral existentes y la cuantificación del potencial minero.

FOTO 24 VISTA DEL YACIMIENTO FERROBAMBA EN ETAPA DE EXPLORACIÓN (VISTA AL NORTE)



FIGURA 6

MAPA METALOGENÉTICO DEL PERU, (ADAPTADO DE ACOSTA Y OTROS, 2021)



CAPÍTULO VI: GEOLOGÍA MINERA

6.1 GENERALIDADES

El presente capítulo abarca sobre el proceso productivo de Las Bambas, se trata de entender la importancia del muestreo de blastholes en la producción de cobre. Minera Las Bambas S.A como empresa cuenta con una estructura organizacional que le permite a cada área respectiva participar en las diferentes etapas del proceso de producción, de tal manera que el objetivo principal es trabajar con seguridad y cumplir con los planes de producción del concentrado de cobre.

El método de explotación que se emplea es el de tajo abierto, con altura de banco de 15 m. Luego de la perforación de blastholes se realiza el respectivo muestreo de los conos de detritos, posteriormente las muestras obtenidas se llevan al laboratorio para realizar los análisis químicos que son necesarios para clasificar y delimitar de tipos materiales para definir los destinos.

El proceso de producción inicia con la perforación de taladros, muestreo (análisis químico), caracterización litológica, voladura de mallas, clasificación de materiales, carguío y acarreo a chancadora primaria o botaderos o dique de relaves, procesamiento en planta concentradora. A continuación, se detallan los procesos mencionados paso a paso.

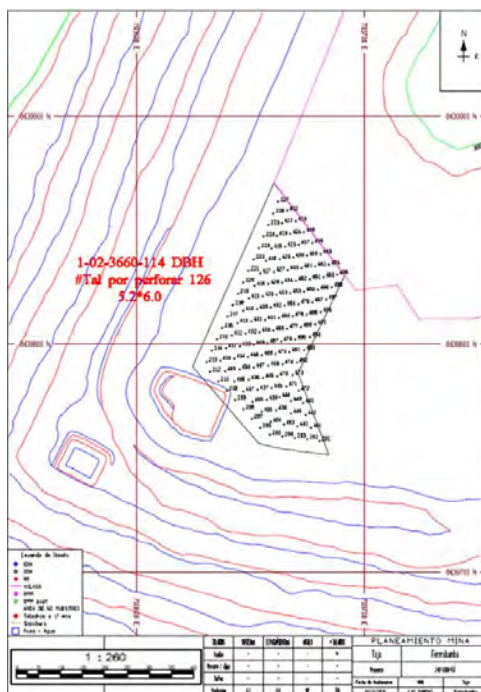
6.2 PERFORACIÓN DE BLASTHOLES

El primer paso para realizar la explotación es la perforación de los pozos de voladura (blastholes) en mallas regulares diseñados según la dureza de la roca, las dimensiones de separación entre taladros varían entre 6 y 9 metros. El tipo de perforadoras que se utilizan para esta labor son las Rotary Blasthole Drills que traducido al español sería perforadoras rotatorias para pozos de voladura.

Planeamiento Mina es el área responsable de generar o diseñar mallas de perforación (figura 7), tomando en cuenta las proyecciones de mineral, dureza y litología para determinar el espaciamiento entre taladros. Este diseño se realiza acorde a los planes semanales y mensuales que están ligados al cumplimiento de producción.

FIGURA 7

PLANO DE DISEÑO DE MALLA DE PERFORACIÓN, ELABORADA POR PLANEAMIENTO MINA. IMAGEN OBTENIDA DEL ÁREA PLANEAMIENTO MINA – LAS BAMBAS

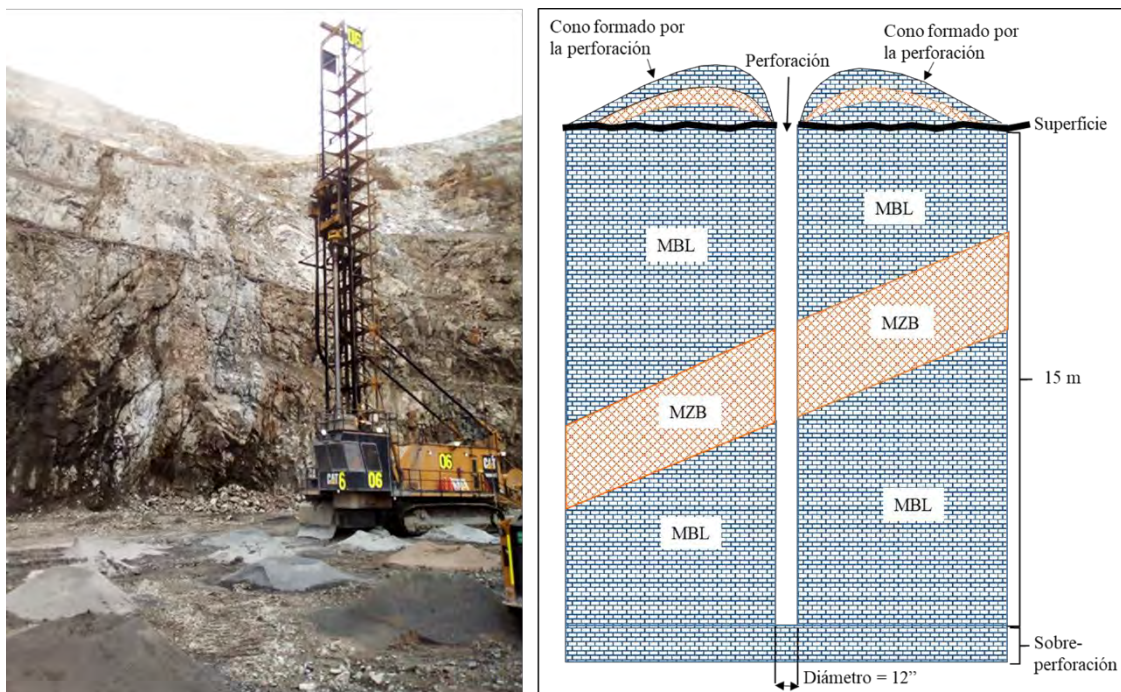


Posterior al diseño de mallas, se pasa la responsabilidad al área de Perforación y Voladura la que se encarga de dirigir los equipos de perforación (figura 8) a las mallas diseñadas, para ejecutar la perforación.

Las perforadoras de rotación tienen diámetro de broca de 12", el mecanismo de rotación hace triturar la roca y se inyecta aire a presión a través de la barra lo que hace que el detritus de roca suba a la superficie y se depositen en forma de cono. El tamaño de las partículas varía desde microscópicos hasta 3 cm de diámetro aproximadamente. La profundidad de perforación de cada taladro es de 15 m, ésta es igual a la altura del banco, con una sobre perforación de 1 m a 1.5 m. En la figura 8 (derecha) se tiene una representación esquemática del mecanismo de perforación y generación de blasthole o cono de detritus. El tiempo aproximado de perforación de 15m de profundidad es 30min.

FIGURA 8

PERFORADORA DE ROTACIÓN EJECUTANDO EL TRABAJO DE PERFORACIÓN CON INCLINACIÓN VERTICAL



El objetivo de la perforación es realizar pozos para alojar explosivos y triturar la roca a dimensiones que sean minables por equipos de carguío, es decir los equipos de perforación están diseñados solo para propósitos de producción y no así para el muestreo adecuado. Sin embargo, el material triturado no puede ser minado si aún no se han clasificado ni definido los destinos según los criterios establecidos.

6.3 MUESTREO

Éste paso es considerado el más importante, ya que a partir de éste se obtiene las leyes de elementos requeridos (Cu, Mo, Ag, Zn, Pb, etc.) para la clasificación de materiales y el posterior minado. Es necesario aclarar que la correcta toma de muestras incrementara el nivel de confianza en los resultados obtenidos del análisis químico, por lo que es justificable evaluar el método óptimo para muestreo de blastholes. Una vez que el equipo de perforación concluye su trabajo deja como resultado un cono de material (detritus) alrededor del taladro perforado. En la foto 31 se aprecia un cono de detritos con inserciones (orificios) producto del muestreo con auger, la recolección de información se realiza en una tablet.

FOTO 25 CONO DE DETRITOS O BLASTHOLE CON INSERCIONES LUEGO DEL MUESTREO CON AUGER



Este cono de detritus o blasthole es muestreado por el personal de Geología Mina, tomando en cuenta los procedimientos escritos de trabajo seguro (PETS). Al realizar el muestreo se debe tener en cuenta que el personal debe estar alejada al menos 10 m de la perforadora, por temas de seguridad.

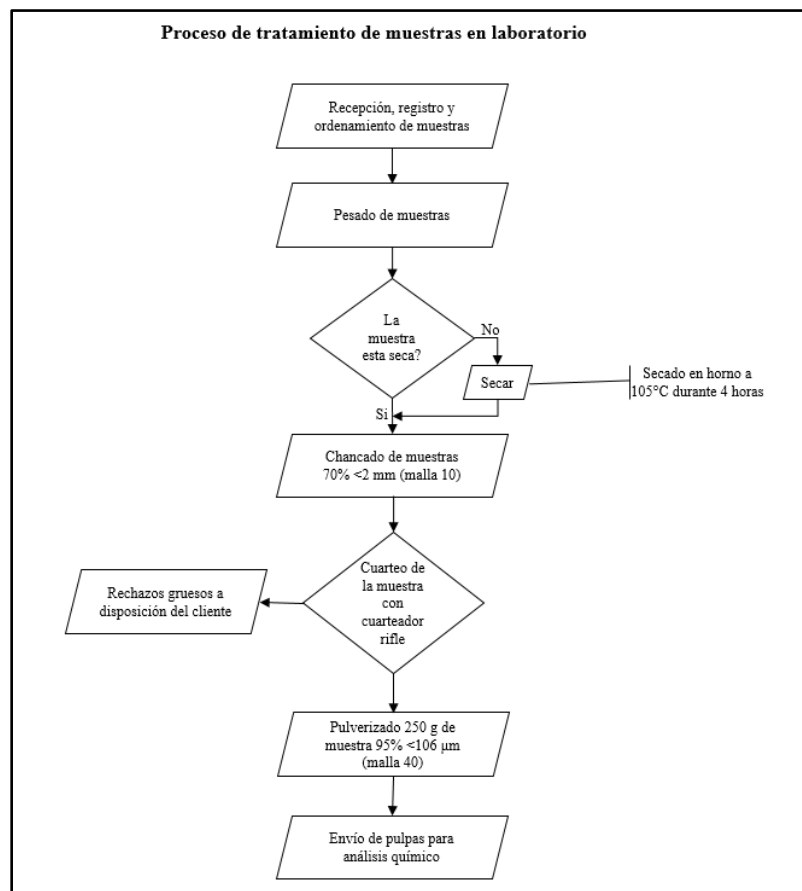
Posterior a la toma de muestras de blastholes, el personal se dirige al laboratorio para la entrega respectiva por lotes de 35 muestras, esta cantidad de muestras por lote se considera de manera rutinaria, en casos especiales la cantidad por lote puede variar. La empresa responsable de realizar los análisis químicos de estas muestras es ALS Peru S.A.

El personal del laboratorio debe cumplir con una serie de procedimientos para asegurar la correcta manipulación y evitar errores en las diferentes etapas del tratamiento de muestras. Se tiene un diagrama (figura 9) de flujo para tener una referencia a cerca de los procesos que intervienen en el análisis químico.

El tiempo necesario para realizar la preparación y análisis químico hasta obtener los resultados es 14 horas aproximadamente; posterior al análisis químico, el laboratorio reporta las respectivas leyes de los elementos solicitados con su respectivo certificado de control de calidad.

FIGURA 9

ESQUEMA DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE MUESTRAS DE BLASTHOLES EN LABORATORIO



6.4 CARACTERIZACIÓN LITOLÓGICA

Los geólogos de control de mineral se encargan de realizar este trabajo. De la misma forma que el muestreo, el logueo tiene su procedimiento respectivo, se debe realizar la caracterización litológica de cada uno de los blastholes, este registro se realiza utilizando una tablet con la intención de asegurar que la información se almacene en la base de datos. En esta labor es importante el reconocimiento de la litología de los blastholes, la alteración, su mineralización, la dureza, el contenido de agua, forma del cono, si tuviera dos o más tramos se repite el procedimiento para cada tramo. El registro litológico será utilizado en la interpretación litológica y generación del modelo de bloques de corto plazo.

TABLA 5 TIPOS DE LITOLOGÍA IDENTIFICADOS EN EL YACIMIENTO MINERO LAS BAMBAS - FERROBAMBA

| ROCK TYPE (ROCK) | CONDITION & DESCRIPTION | | | |
|------------------|-------------------------|-------|-----------------------|---|
| Código Numérico | Nomenclatura | COD_N | Litología | Descripción Litología |
| 1 | MZB | 76 | Monzonita biotítica | Intrusivo que forma sk |
| | MZM | 78 | Monzonita máfica | Intrusivo que forma sk |
| 2 | SK | 40 | Exoskarn | Exoskarn (granate+magnetita+epidota+piroxeno) |
| 3 | MBL | 47 | Marmol | sedimentario, (Caliza+marmol+Horfels) |
| | MBC | 48 | Marmol | sedimentario, (marmol con calcosilicatos) |
| 4 | MZH | 77 | Monzonita horblendica | Intrusivo que no mineraliza |
| | MZQ | 79 | Monzonita Quarcifera | Diques Estériles |
| 5 | ENDO | 50 | Endo Skarn | Endoskarn (Granate+epidota+plagioclasa) |

Fuente: Clasificación de materiales, Superintendencia de Geología Mina – Las Bambas.

Según la tabla 5 el área de Geología Mina no considera la roca intrusiva monzonita biotítica fina (MBF), esta litología está agrupada dentro de la monzonita biotítica (MZB), por presentar características similares en cuanto a zona de afloramiento, características texturales, mineralización; la diferencia radica en que la MZB presenta mayor cantidad de biotita y en libros de biotita, y la MBF presenta biotitas esporádicas.

La recolección de datos se realiza en una Tablet, la cual contiene la base de datos de las mallas con la información de muestreo y caracterización litológica de blastholes. Esta base de datos se va actualizando a diario con la información que se obtiene en campo.

La foto 26 muestra la disposición de un cono de detritus en litología MBL y SK. Se aprecia que la perforación se inició cortando zona de mármol y en profundidad zona de skarn, la roca de mayor profundidad es la que se muestra en la parte superficial del cono de detritos.

FOTO 26 CORTE EN CANAL DE UN BLASTHOLE

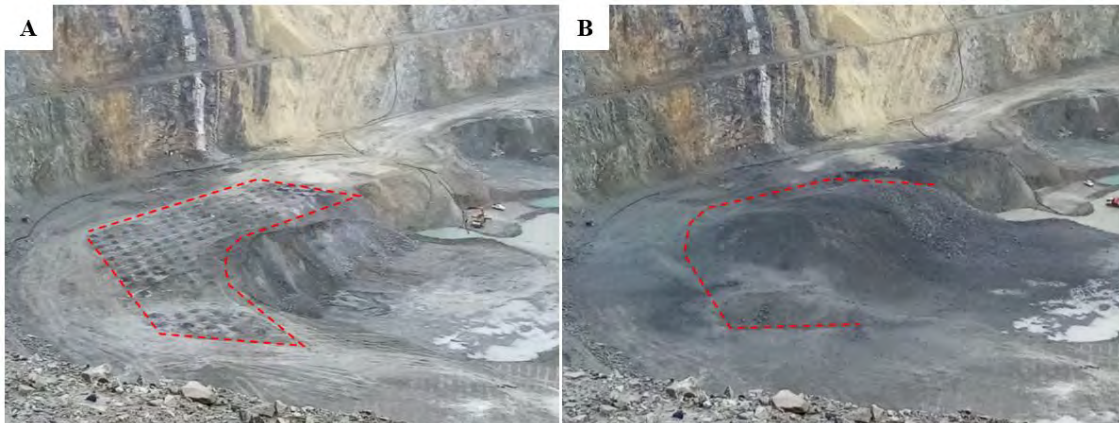


6.5 VOLADURA DE MALLAS

Luego que la perforación de blastholes de las mallas diseñadas es concluida, el área de Perforación y Voladura se encarga de realizar el carguío de taladros con explosivos, con la finalidad de triturar la roca es decir reducir el tamaño de las rocas a dimensiones que sean minables.

Cada litología tiene distinta dureza, la cantidad de explosivo a usar depende del tipo de roca, esta información es proporcionada por el área de Geología Mina. La zona de cara libre (área sin material) es la que mayor desplazamiento presenta.

FOTO 27 PROYECTO DE PERFORACIÓN ANTES Y DESPUÉS DE LA VOLADURA



6.6 CLASIFICACION DE MATERIALES

El área de Geología Mina de Las Bambas se encarga de realizar la clasificación de materiales según la ley de corte (cutt of), características geo metalúrgicas, características geotécnicas, rangos de leyes, tasa de oxidación y otros para envío al proceso metalúrgico; según la tabla 6 se tienen 10 tipos de materiales.

TABLA 6 CLASIFICACIÓN DE MATERIALES EN EL YACIMIENTO MINERO LAS BAMBAS - FERROBAMBA

| ORE TYPE (ORTY) | | CONDITION & DESCRIPTION | | | | | |
|-----------------|-----------------|---------------------------|---|-------------------|-------------------------------------|--------------------------|-----------|
| Código Numérico | Nomenclatura | Descripción | GRUPO LITOLOGICO | % Cu | Tasa de Oxidación (TOx=CuSul/CuTot) | Destino (Ore Routing) | UCS (MPa) |
| 1 | MAESI (D1A,D1B) | Material Estéril | TODOS INTRUSIVOS, ENDOSKARN | < 0.19 % POR SULF | TOx < 0.15 | Dique de Relaves | ≥50 |
| | | | | < 0.24 % POR MX | 0.15 ≤ TOx < 0.50 | Dique de Relaves | ≥50 |
| | | | | <0.5% | TOx ≥ 0.50 | Dique de Relaves | ≥50 |
| 12 | MAESC (D2) | Material Estéril | CALIZA, MÁRMOL, MÁRMOL CON CALCOSILICATOS | < 0.24 % SULF | TOx < 0.15 | Dique de Relaves | ≥25 |
| | | | | < 0.24 % MX | 0.15 ≤ TOx < 0.50 | Dique de Relaves | ≥25 |
| | | | | <0.5% | TOx ≥ 0.50 | Dique de Relaves | ≥25 |
| 11 | DESMA | Desmonte Malo | SKARN | <0.19% SK SULF | TOx < 0.15 | Botadero/Tramo 8 | ≥0 |
| | | | | <0.22% SK MX | 0.15 ≤ TOx < 0.50 | Botadero/Tramo 8 | ≥0 |
| | | | | <0.5% | TOx ≥ 0.50 | Botadero/Tramo 8 | ≥0 |
| | | | TODOS INTRUSIVOS, ENDOSKARN | < 0.19 % POR SULF | 0.15 ≤ TOx | Botadero/Tramo 8 | <50 |
| | | | | < 0.24 % POR MX | 0.15 ≤ TOx < 0.50 | Botadero/Tramo 8 | <50 |
| | | | | <0.5% | TOx ≥ 0.50 | Botadero/Tramo 8 | <50 |
| | | | CALIZA, MÁRMOL, MÁRMOL CON CALCOSILICATOS | < 0.24 % SULF | TOx ≤ 0.15 | Botadero/Tramo 8 | <25 |
| | | | | < 0.24 % MX | 0.15 ≤ TOx < 0.50 | Botadero/Tramo 8 | <25 |
| | | | | <0.5% | TOx ≥ 0.50 | Botadero/Tramo 8 | <25 |
| 2 | MA-CX | Material Oxidado | TODAS LAS LITOLOGIAS | ≥ 0.50 % <1.8% | TOx ≥ 0.50 | Stock de oxidos | |
| 22 | MINOX | Mineral Oxidado | | ≥ 1.80 % | TOx ≥ 0.50 | Stock Oxidos Huancabana | |
| 3 | MINMX | Mineral Malo | SKARN | ≥ 0.22 % | 0.15 ≤ TOx < 0.50 | Chancadora/Stock Mixtos | |
| | | | PORFIDO | ≥ 0.24 % | 0.15 ≤ TOx < 0.50 | Chancadora/Stock Mixtos | |
| 4 | MINSL | Mineral Baja Ley | SKARN | ≥ 0.19 % | TOx < 0.15 | Chancadora/Stock Sulfuro | sulfuro |
| | | | PORFIDO | ≥ 0.19 % | TOx < 0.15 | | |
| 5 | MINML | Mineral Media Ley | SKARN, PORFIDO | ≥ 0.40 % | TOx < 0.15 | | |
| 6 | MINAL | Mineral Alta Ley | SKARN, PORFIDO | ≥ 0.80 % | TOx < 0.15 | | |
| 7 | MARSU | Mineral Sulfuro en Mármol | MARMOL | ≥ 0.24 % | TOx < 0.15 | | |

Para este proceso se debe tener en cuenta los criterios establecidos en la tabla 6, este cuadro contempla todos los detalles que se deben conocer para la clasificación correcta de materiales, de esto depende que los materiales tengan el destino apropiado: proceso metalúrgico, botadero o dique de relaves.

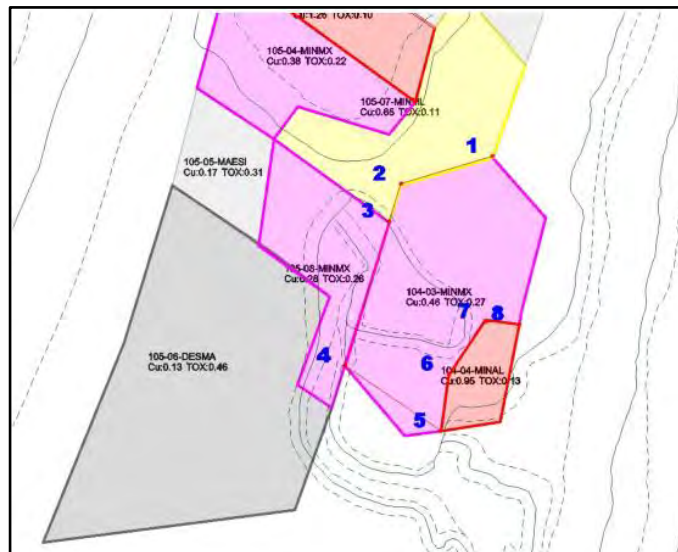
6.7 CARGUÍO Y ACARREO DE MATERIALES

Posterior a la clasificación de materiales, el área de Operaciones Mina previa coordinación con el área de Geología Mina procede a realizar el trabajo de carguío y acarreo de

materiales teniendo como guía de campo la marcación de polígonos con banderines, el trabajo del marcado de polígonos lo realiza topografía mina. Se debe tener en cuenta la asignación del código correcto del origen y destino de dicho material, para que esto se cumpla, Geología Mina hace el respectivo seguimiento.

FIGURA 10

POLÍGONOS DE MINADO DISEÑADOS POR EL ÁREA DE GEOLOGÍA MINA. ESTA IMAGEN MUESTRA EL PRODUCTO FINAL QUE EL ÁREA DE GEOLOGÍA MINA ENTREGA A OPERACIONES MINA



El área de Operaciones Mina realiza la tarea del minado de los materiales previamente clasificados, para ello cuenta con equipos pesados de 300 y 400 toneladas de capacidad (foto 28).

En esta etapa lo más importante para el área de Geología Mina es realizar la verificación y seguimiento de la correcta asignación del origen y destino de cada camión cargado y el tipo de material asignado.

La capacidad de extracción de material del tajo Ferrobamba es de aproximadamente 500 000 toneladas por día, de esto 200 000 toneladas son de mineral; el resto es material estéril que se utiliza para construir la presa de relaves, y desmonte que se desecha en los botaderos.

FOTO 28 EQUIPOS DE CARGUÍO Y ACARREO EN EL YACIMIENTO MINERO LAS BAMBAS – FERROBAMBA



6.8 PROCESAMIENTO DE MINERAL EN PLANTA CONCENTRADORA

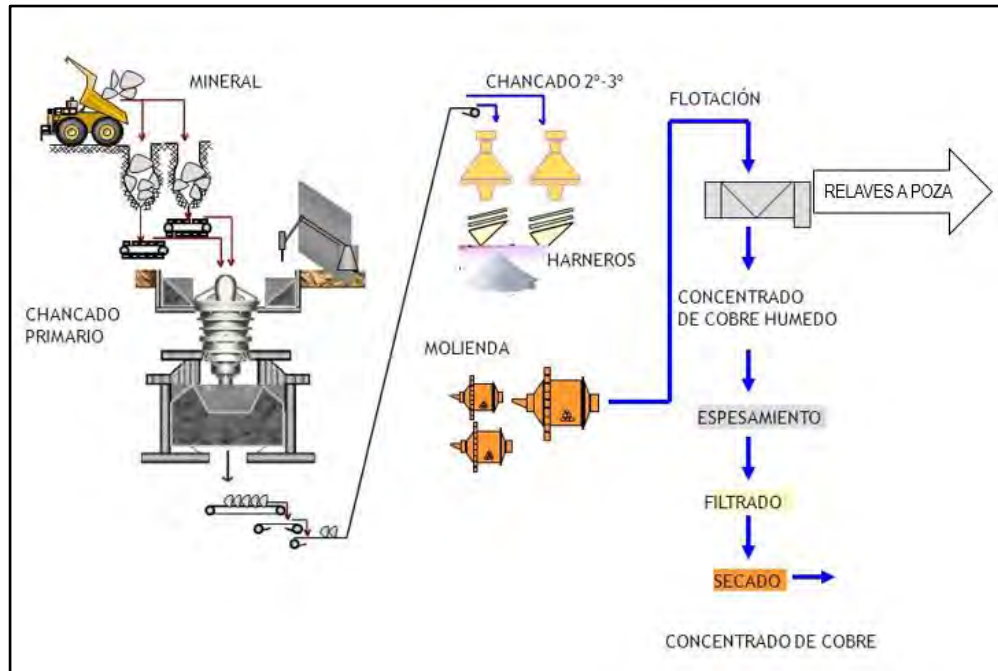
El material que va con destino a chancadora primaria pasa al proceso metalúrgico donde se encarga el área de Planta Concentradora, dicho material pasa por diferentes circuitos para finalmente obtenerse el concentrado de Cu.

En la Figura 11 se muestra de manera general el proceso metalúrgico, para esto tiene mucha importancia los trabajos que se ejecutan en diferentes etapas del proceso, hasta que se obtiene el producto final que es el concentrado.

La capacidad de procesamiento de mineral de la Planta Concentradora es de 145 000 toneladas por día aproximadamente; dependiendo de la ley de cobre enviada se logra obtener hasta 3 000 toneladas de concentrado de Cu (con Mo, Ag, Au, Zn) si se procesa una ley de 1%Cu.

FIGURA 11

ILUSTRACIÓN DEL PROCESO METALÚRGICO MOSTRANDO DESDE EL INICIO (CHANCADO) HASTA LA OBTENCIÓN DEL PRODUCTO FINAL (CONCENTRADO DE CU).



CAPÍTULO VII: MÉTODOS DE MUESTREO DE BLASTHOLES

7.1 GENERALIDADES

El muestreo de blastholes es la actividad más importante de una operación minera, es el inicio de una cadena de procesos que ayudan a definir los materiales de la mina, la planificación a corto plazo, es decir en el día a día, en la semana y en el mes. Cualquier error que se pueda detectar en esta etapa si no es corregido a tiempo puede generar grandes pérdidas económicas a la operación, el muestreo es una actividad delicada, por ende, de mucha importancia. Los métodos de muestreo más conocidos en operaciones mineras a tajo abierto son: auger, tubo, canal.

Luego que se ejecuta la perforación de pozos de voladura (blastholes), se realiza la extracción de muestras (muestreo), para el yacimiento Las Bambas - Ferrobamba inicialmente se usó el método del auger, sin embargo, es necesario realizar la evaluación por el método del tubo y el canal para determinar el performance de cada uno de estos y seleccionar el método óptimo.

A continuación, se muestra la tabla 7 correspondiente a los valores de densidad promedio por cada tipo de roca que aflora en el yacimiento Las Bambas – Ferrobamba. Es importante tener idea de la cantidad de material que se obtiene al perforar un blasthole y conocer la cantidad de muestra que se extrae para el análisis químico, y realizar la estimación de recursos asumiendo que la cantidad de muestra extraída representa al cono total.

TABLA 7

VALORES DE DENSIDAD POR TIPO LITOLÓGICO, EN EL TAJO FERROBAMBA.

| Litología | Densidad (g/cm ³) | Masa de un blasthole (kg) |
|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| MBL (marmol) | 2.72 | 2977.0 |
| MBC (marmol con calcosilicatos) | 2.72 | 2977.0 |
| SK (skarn) | 3.37 | 3688.4 |
| ENDO (endoskarn) | 2.75 | 3009.8 |
| MZB (monzonita biotítica) | 2.63 | 2878.5 |
| MZM (monzonita mafica) | 2.63 | 2878.5 |
| MZH (monzonita hornblendica) | 2.63 | 2878.5 |
| MZQ (monzonita cuarzosa) | 2.63 | 2878.5 |

De acuerdo con la observación de la tabla 7, extraer 2.8 ton de material y reducir a través del cuarteo para obtener una muestra de 6 a 8 kg es un trabajo muy complicado para una operación minera que requiere dinamismo en sus procesos. Aplicar un método óptimo de muestreo que represente los 2.8 ton de material solamente extrayendo la masa requerida para el análisis químico es el camino que ahorra tiempo e inversión. La muestra extraída por cualquiera de los 3 métodos tiene una masa de 6 a 8 kg, si se extrae una muestra de 6 kg (peso mínimo) de una zona de pórfido esta representa el 0.21% del cono total generado por la perforación; si se extrae de una zona de skarn 8 kg (peso máximo) de muestra esta representa 0.22%. Esta última parte nos da una referencia de la representatividad de la muestra obtenida por cualquier método de muestreo de blastholes, lo que se requiere es obtener una muestra extraíble manipulable y que represente al cono total en cuanto a sus leyes.

Para la determinación de la masa de un blasthole se ha tomado en cuenta lo siguiente: el diámetro del pozo (12”), altura de perforación (15 m), volumen del pozo. Finalmente se multiplica la densidad por el volumen para obtener la masa que se genera al realizar la perforación de un pozo o blasthole.

Para propósitos del estudio, un total de 60 blastholes (mapa 7) fueron extraídos para los ensayos respectivos, de estos fueron validados solamente 57.

Se debe tener en cuenta que al hablar de muestreo nos da la idea de analizar una parte de un todo que cumpla con las diversas características que representan a la población total, siendo esta parte pura y libre de impurezas que alteren los resultados del proceso deseado. En la tabla 7 se observa que 1 blasthole puede producir hasta 3.6 ton de material si se trata de una zona de skarn, y mínimamente se obtiene 2.8 ton en zonas de pórfido.

7.2 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS O EJECUCIÓN DEL MUESTREO

Para la ejecución de este trabajo importante ha sido necesario contar con muchos recursos como: humanos, materiales, equipos; así mismo solicitar las autorizaciones a las áreas de Operaciones Mina y Perforación y Voladura.

7.2.1 Recursos humanos

- 02 geólogos
- 03 técnicos de muestreo

7.2.2 Materiales y equipos

- 01 camioneta pick up 4x4.
- 02 palas.
- Liners o plástico.
- Costales para traslado de muestras.
- Bolsas de polietileno para entrega de muestras en laboratorio.
- 01 cuarteador rifle.
- Pintura espray.
- 01 balanza con capacidad mayor a 50 kg.
- 01 auger (rotomartillo con broca)

- 01 tubo de metal con empuñadura.

7.2.3 Definición del proceso y selección de zonas a muestrear

En este estudio se decidió implementar un proceso de muestreo planificado de manera cuidadosa, con el objetivo de asegurar la representatividad y la calidad de las muestras.

En primer lugar, se clasificaron dos zonas de muestreo claramente definidas dentro de distintos proyectos de perforación, seleccionando específicamente áreas correspondientes a los tipos skarn y pórfido.

Además, se seleccionaron equipos de perforación capaces de generar conos de detritos regulares a buenos, lo que permite obtener una muestra adecuada para ensayo. Dado que se tomará la muestra completa del cono de detritos, se debe procurar minimizar al máximo la pérdida o contaminación del material.

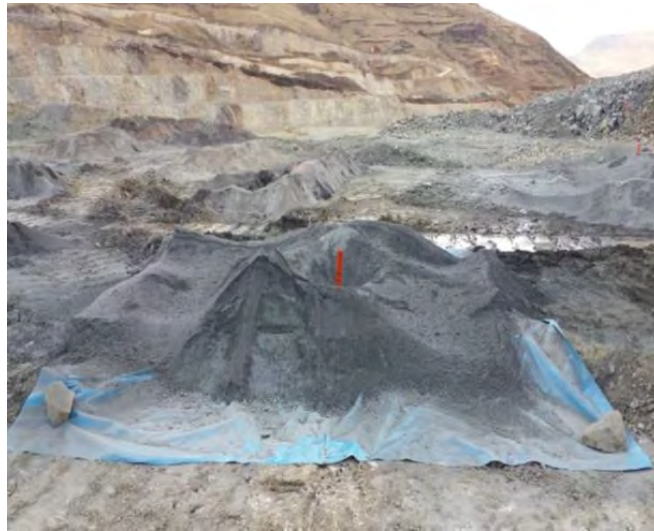
7.2.4 Preparación de área de muestreo

Con el fin de obtener una muestra sin contaminación y evitar su pérdida, se decidió colocar una manta plástica bajo el faldón de la máquina perforadora (foto 29). Previamente, se limpió el interior del faldón y se retiraron fragmentos de roca de tamaño regular del piso que pudieran dañar el plástico. La ejecución de esta tarea se coordinó previamente con la supervisión del área de Perforación y Voladura, así como con el operador del equipo.

FOTO 29 TENDIDO DE PLÁSTICO ANTES DE LA PERFORACIÓN PARA EVITAR CONTAMINACIÓN



FOTO 30 BLASTHOLE LUEGO DE LA PERFORACIÓN



7.3 DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS DE MUESTREO

A continuación, se detallan los procedimientos a seguir para realizar el muestreo de blastholes para cada método: auger, tubo, canal, incluyendo el del cono completo.

7.3.1 Muestreo con auger

Este método consiste en realizar 6 inserciones equidistantes alrededor del cono, obteniendo una masa entre 6 a 8 kg, en caso de que no se obtuviera la masa necesaria se debe incrementar inserciones en áreas opuestas no muestreadas. Las inserciones se deben realizar en sentido horario, de manera perpendicular a la superficie del cono con la finalidad de recuperar todos los tramos del cono.

Para realizar estos trabajos, previamente se le capacita al personal para minimizar errores en la toma de muestra o evitar faltas en el procedimiento de muestreo de blastholes que al final podrían repercutir en la afectación a la calidad del muestreo.

FOTO 31 MUESTREO POR MÉTODO DEL AUGER Y REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LAS INSERCIONES



7.3.2 Muestreo con tubo

Este método es muy similar al auger, se aplica el mismo mecanismo. Para el caso del estudio, se debe tener en cuenta la recomendación que las inserciones del tubo deben ejecutarse junto a las inserciones del auger. Las muestras con auger y tubo deben ser tomadas al mismo tiempo, es decir, realizar las inserciones de auger y tubo en forma intercalada y llenando a su respectiva bolsa.

FOTO 32 MUESTREO POR EL MÉTODO DEL TUBO Y REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LAS INSERCIONES



7.3.3 Muestreo por canal

Para el muestreo por este método, se debe realizar un canal y dejar expuesta toda la secuencia perforada y posteriormente muestrear ambas paredes del canal, de abajo hacia arriba, una pasada con la pala en ambas paredes hace una muestra. El peso recomendable para la extracción es la misma que las anteriores.

FOTO 33 MUESTREO POR EL MÉTODO DEL CANAL Y REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL CORTE DE LA SECCIÓN



En el muestreo por canal se tiene la desventaja de que una vez que se realiza el corte, las paredes al quedar verticales suelen derrumbarse, por ello es importante extraer las muestras inmediatamente y evitar el incumplimiento al procedimiento y técnicas de muestreo.

7.3.4 Muestreo del cono o blasthole completo

Para realizar este muestreo debemos seguir una serie de pasos:

- Como paso inicial se debe identificar las perforadoras que formen los conos con calidad regular a bueno y asegurarse que el cono tenga una geometría aceptable.
- Se debe colocar un liner (manta de plástico) donde pueda acumularse todo el material perforado, para evitar posible contaminación de muestras con el material lastrado del piso.
- Dividir en 16 secciones el cono de perforación, usar pintura spray.
- Enumerar en forma intercalada del 1 al 8 sentido horario, estas secciones serán extraídas (foto 34). Al realizar esta división ya se asume que se está cuarteando. Las secciones no numeradas marcarlas con una “X”, estas secciones no serán extraídas. Las secciones marcadas con X que no se muestrean, deben ser retiradas del cono de perforación a medida que progrese la colección de muestras, para evitar la contaminación con las secciones contiguas.
- Proceder a extraer los detritus del cono de perforación usando una *“única pala”*, iniciar con la sección 1 sucesivamente hasta la 8, tratando de conservar las paredes verticales (cada sección pesa 130 kg aproximadamente).
- Cada sección numerada, se extraerá en su totalidad y será llenada en saquillos (3 a 4 saquillos aprox.); cada saquillo debe tener su número de sección, todo ello antes de peel cuarteo.

- Cada saquillo debe tener su número de sección y peso para obtener la masa total de toda la sección extraída.

FIGURA 12

ILUSTRACIÓN PARA REALIZAR LA DIVISIÓN DE SECCIONES A MUESTREAR. LAS SECCIONES SE MARCAN CON PINTURA, EN FORMA RADIAL

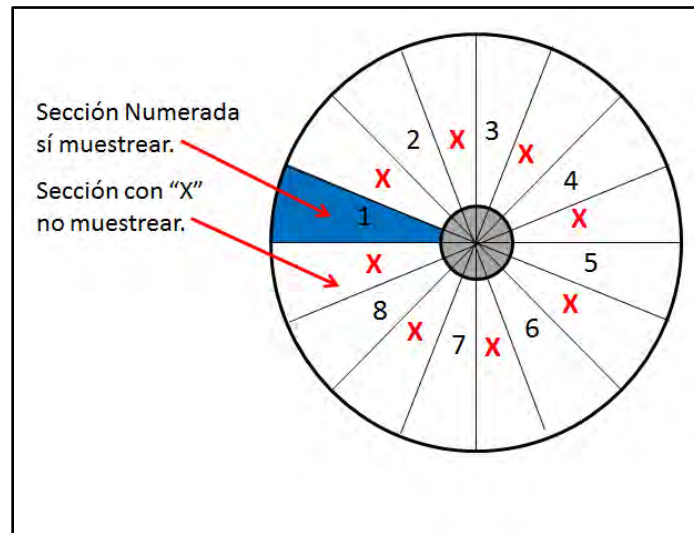


FOTO 34 *DIVISIÓN DE SECCIONES EN LOS BLASTHOLES PREVIO A LA EXTRACCIÓN DE MUESTRAS DEL CONO TOTAL*



FOTO 35 ENUMERACIÓN DE SACOS LUEGO DE LA EXTRACCIÓN DE SECCIONES



FOTO 36 PESADO DE SACOS CON MUESTRAS ANTES DEL CUARTEO



Para el pesado de muestras es importante contar con una balanza bien calibrada y que tenga capacidad de hasta 50 kg, caso contrario se tendría dificultades al momento de calcular el peso correcto de la muestra y se tendría desvíos en el correcto tratamiento de muestras.

7.4 CUARTEO DE MUESTRAS

Al finalizar la extracción de los conos de perforación o blastholes, de las 8 secciones numeradas; se procedió al cuarteo de cada una de las secciones. Antes de iniciar el cuarteo de una muestra se realizó la limpieza del cuarteador y sus bandejas.

El procedimiento de cuarteo consiste en obtener, haciendo uso del cuarteador rifflex, 04 muestras de cada sección extraída, cada muestra representaría 1/32 partes (de las 8 secciones) y puede ser trazada hasta solo uno de los 4 cuartos generados en el segundo nivel de división.

En otras palabras, se divide la sección completa en 4 cuartos, y cada uno de estos cuartos será dividido 3 veces más hasta obtener una muestra de 1/32 de la muestra inicial.

Se debe realizar el proceso de cuarteo primero de una mitad de la sección a muestrear, realizar todo el proceso hasta obtener 2 muestras y luego continuar con la otra mitad, hasta obtener las otras dos muestras. Los rechazos de estos cuarteos pueden ser desechados.

FIGURA 13 ESQUEMA DE CUARTEO PARA LA OBTENCIÓN DE MUESTRAS FINALES

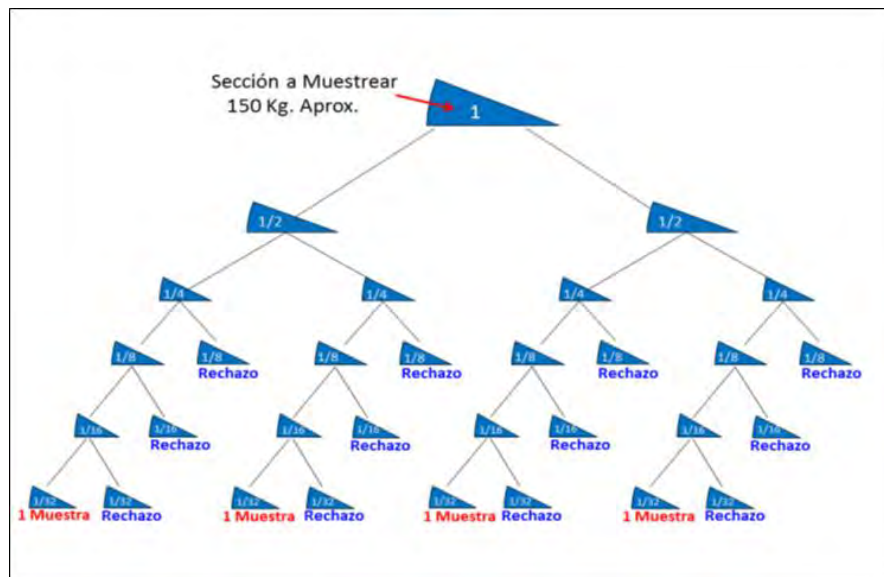


FOTO 37 PROCESO DE CUARTEO DE MUESTRAS CON EL USO DEL CUARTEADOR RIFFLEX



Es importante que al momento de la extracción de las muestras por secciones se mantengan las muestras secas, ya que al humedecerse puede ser complicado realizar el cuarteo, repercutiendo en pérdida de tiempo.

Desde el inicio del cuarteo hasta el final, las proporciones resultantes en las bandejas del cuarteador deben ser alternadas cada vez que sea posible.

Durante todo el proceso de cuarteo, se debe retirar los fragmentos gruesos que no pasen por las rejillas del cuarteador y ubicarlos en una bandeja para al final cuartearlos y agregarlos en igual proporción ($1/32$) a las 04 muestras obtenidas. Esto es importante ya que tanto finos como gruesos (siempre y cuando pertenezcan al blasthole y no sean externos), deben ser analizados. El peso del grueso no debe exceder el 5% del peso total de la sección muestreada.

Foto 38 DISTRIBUCIÓN PROPORCIONAL DE DETRITOS QUE NO PASAN EL CUARTEADOR



7.5 CODIFICACIÓN Y ENVÍO DE MUESTRAS A LABORATORIO

Por cada pozo muestreado resultaran 35 muestras: 1 muestra de auger, 1 muestra de tubo, 1 muestra de canal, y 32 de muestras de cono completo. Las muestras se enviarán como muestras especiales en lotes de 38 muestras: 35 muestras (del cono completo) + 3 muestras de control (2 blancos gruesos + 1 muestra estándar o 2 estándares + 1 blanco grueso).

Los lotes de muestras fueron enviados a laboratorio ALS ubicada en la propiedad minera Las Bambas. Las solicitud de analisis indica realizar los ensayos quimicos para Cu, Mo, Ag. La insercion de muestras de control en el lote es variable, por temas estrategicos se van alternando las posiciones. Habitualmente para analisis de control de calidad (QC) se insertan 3 muestras de control: STD (1 estandar), BG (blanco grueso), y DC (duplicado de campo); sin embargo para este caso, no se utilizo el DC porque las muestras extraídas para este analisis son duplicados, y en su lugar se adicionó 1 STD ó 1 BG.

Al momento de realizar la entrega de muestras en laboratorio se evitan mostrar detalles de las posiciones de muestras de control, para maximizar el control de calidad solo van registros de codificación de muestras y la solicitud de análisis por los elementos necesarios.


Para el control interno del área Geología Mina, la codificación de las respectivas muestras se empleó el siguiente código de muestra según su tipo y ubicación: Tajo – fase – Banco - N° proyecto - N° pozo. Un ejemplo de codificación sería: 1-02-3795-050-500, en este orden, esto con la finalidad de tener un registro en la base de datos que tenga ubicación espacial, ya que cada pozo de la malla de perforación tiene coordenadas este y norte, elevación, inclinación del taladro, y espaciamiento. Esta codificación se registra en la columna N° POZO de la figura 14.

El trabajo de extracción de muestras de blatholes para realizar el análisis comparativo y estadístico, se planifico en diversos bancos o niveles del tajo Ferrobamba, resultando finalmente la realización de ensayos en un total de 12 bancos: 3675, 3690, 3705, 3720, 3735, 3750, 3765, 3810, 3825, 3840, 3855, 3870.

FIGURA 14 HOJADE CONTROL INTERNO PARA ENVÍO DE MUESTRAS A LABORATORIO. ESTE LOTE DE MUESTRAS CORRESPONDE AL MUESTREO DE UN CONO DE UN BLASTHOLE

| Lote : ESP-FE-18-00037 Cantidad de Muestras 38 Fecha de Envío : 9/09/18 | | | | |
|---|-------------------|----------|---------------|---------------|
| Proyecto 1-02-3840-036 | | | | |
| Nº | NUMERO DE MUESTRA | NRO POZO | TIPO | OBSERVACIONES |
| 1 | ESP-FE-01511 | 406 | Original | |
| 2 | ESP-FE-01512 | | Original | |
| 3 | ESP-FE-01513 | | Original | |
| 4 | ESP-FE-01514 | | Original | |
| 5 | ESP-FE-01515 | | Original | |
| 6 | ESP-FE-01516 | | Original | |
| 7 | ESP-FE-01517 | | Original | |
| 8 | ESP-FE-01518 | | Original | |
| 9 | ESP-FE-01519 | | Blanco Grueso | |
| 10 | ESP-FE-01520 | | Original | |
| 11 | ESP-FE-01521 | | Original | |
| 12 | ESP-FE-01522 | | Original | |
| 13 | ESP-FE-01523 | | Original | |
| 14 | ESP-FE-01524 | | Original | |
| 15 | ESP-FE-01525 | | Original | |
| 16 | ESP-FE-01526 | | Blanco Grueso | |
| 17 | ESP-FE-01527 | | Original | |
| 18 | ESP-FE-01528 | | Original | |
| 19 | ESP-FE-01529 | | Original | |
| 20 | ESP-FE-01530 | | Original | |
| 21 | ESP-FE-01531 | | Original | |
| 22 | ESP-FE-01532 | | Original | |
| 23 | ESP-FE-01533 | | Original | |
| 24 | ESP-FE-01534 | | Original | |
| 25 | ESP-FE-01535 | | Original | |
| 26 | ESP-FE-01536 | | Original | |
| 27 | ESP-FE-01537 | | Original | |
| 28 | ESP-FE-01538 | | Original | |
| 29 | ESP-FE-01539 | | Original | |
| 30 | ESP-FE-01540 | | Original | |
| 31 | ESP-FE-01541 | | Original | |
| 32 | ESP-FE-01542 | | Original | |
| 33 | ESP-FE-01543 | | Estándar STD | |
| 34 | ESP-FE-01544 | | Original | |
| 35 | ESP-FE-01545 | | Original | |
| 36 | ESP-FE-01546 | | Original | |
| 37 | ESP-FE-01547 | | Original | |
| 38 | ESP-FE-01548 | | Original | |

ESTANDAR
ST 1806



Prepared por TARGET ROCKS
info@target-rocks.com

CAPÍTULO VIII: ASEGURAMIENTO Y CONTROL DE CALIDAD (QA/QC)

8.1 GENERALIDADES

El QA/QC proviene de las siglas en inglés (Quality Assurance and Quality Control), en español significa: Aseguramiento y Control de Calidad.

Es importante definir la palabra calidad: la calidad del muestreo en minería a tajo abierto implica implementar procedimientos que garanticen la representatividad y fiabilidad de las muestras, reduciendo al mínimo los errores en todas las fases del muestreo y permitiendo obtener estimaciones precisas de la ley, el volumen y la composición del yacimiento (Gy, 1982; Pitard, 1993).

El objetivo de llevar a cabo el aseguramiento y control de calidad en el proceso de muestreo de blastholes en la mina consiste en garantizar la realización del trabajo con el nivel de calidad requerido. Este proceso permite evaluar los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, lo que a su vez proporciona la confiabilidad necesaria en los trabajos realizados. Esta confiabilidad es fundamental para sustentar las leyes, así como para la estimación de recursos, la planificación diaria o semanal y las reconciliaciones.

En relación con la estimación de recursos minerales, es fundamental considerar diversos factores que influyen en la calidad de dicha estimación. Estos factores incluyen aspectos geológicos, la calidad del muestreo, la atención en la preparación y análisis de las muestras, el registro de los datos y los métodos de procesamiento de datos.

La presente evaluación abarca de manera integral el proceso de muestreo de blastholes, así como la preparación y el análisis de las muestras, con el objetivo de obtener información confiable. Para el presente estudio se han ensayado un total de 62 blastholes, de los cuales 32 corresponden a zona de skarn, y 30 a pórfido; la cantidad de muestras enviadas a laboratorio son en total 2398, se insertaron 67 estándares y 119 blancos.

8.2 ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD (QA)

La clave del aseguramiento de calidad radica en el conjunto de actividades planificadas y sistemáticas para asegurar que una tarea u operación particular sea eficaz (como el muestreo de blastholes) y alcance un nivel de calidad aceptable (Universidad Americana de Europa, 2019).

Intervienen desde el inicio del proyecto sobre las principales fuentes de error, considerando su impacto, con el objetivo de reducir o eliminar sus efectos posteriores. La finalidad de esta etapa es la prevención de problemas que podría ocurrir al no realizar el muestreo correctamente (Universidad Americana de Europa, 2019).

Todas las actividades realizadas en el área de Geología Mina cuentan con procedimientos documentados, los cuales son revisados y actualizados anualmente por el supervisor y el superintendente, asegurando que el muestreo de blastholes cumpla con los estándares de calidad establecidos.

TABLA 8

DESCRIPCIÓN DE TIPOS DE ERRORES, CAUSAS QUE GENERAN Y COMO MINIMIZARLOS

| Tipo de error | Causa | Forma de minimización |
|---------------------------------|---|--|
| Fundamental | Perdida de precisión de la muestra, debido a su composición física y química (p.e. distribución de tamaño de partícula) | Disminución del diámetro de las partículas mas grandes o aumento de la masa de la muestra. |
| Segregación y agrupación | Se debe a la distribución no al azar de partículas, usualmente por efecto de la gravedad. | Preparación al azar de muestras compuestas u homogenización y fraccionamiento de la muestra. |
| Heterogeneidad de largo alcance | Error espacial fluctuante y no al azar. | Toma de muchos incrementos para formar una muestra. |
| Heterogeneidad periódica | Error de fluctuación temporal o espacial. | Generación correcta de muestras compuestas. |
| Delimitación de incrementos | Diseño de muestreo inapropiado y/o mala selección de equipo. | Diseño de muestreo y selección apropiada del equipo. |
| Extracción de incrementos | El procedimiento de muestreo falla en cuanto a la extracción precisa del incremento propuesto. | Indispensable contar con protocolos adecuados y equipo de muestreo bien diseñado. |
| Preparación | Se debe a pérdidas, contaminación y/o alteración de una muestra. | Existen técnicas de campo y laboratorio para evitar el problema. |

Fuente: Taller AMEC Internacional Ingeniería y Construcción Ltda.

El área de Geología Mina de Las Bambas realiza de manera frecuente un monitoreo continuo y sistemático de cualquier variación en las leyes de producción, tomando todas las precauciones necesarias para identificar posibles factores imprevistos que puedan generar errores, con el objetivo de corregirlos oportunamente.

8.3 CONTROL DE CALIDAD (QC)

Se entiende como el grupo de mecanismos, herramientas y actividades destinadas a identificar errores, cuantificar su impacto y aplicar medidas correctivas oportunas. Consiste en los procedimientos empleados para garantizar que la información obtenida de los blastholes cumpla con el nivel de calidad requerido (SYDLE, 2024).

La finalidad de esta etapa es la detección de problemas que podrían ocurrir a pesar de seguir los procedimientos de muestreo implementados. Para la detección de errores se insertan muestras de control en el lote de envío (38 muestras), o se realizan operaciones de control de calidad (SYDLE, 2024).

Usualmente en Las Bambas se realiza la inserción de 3 muestras de control, estos son: blancos gruesos, estándares (baja ley, media ley, alta ley), duplicados de campo. Para el propósito de este trabajo no se extrajeron duplicados, pero se mantuvo la cantidad de estos, es decir, se insertaron 1 estándar y 2 blancos, o 2 estándares y 1 blanco, en cada lote. Estos 3 controles representan el 7.8% del total del lote (MMG Las Bambas, 2024).

Para el presente trabajo de investigación se va a considerar netamente la evaluación de las muestras de control para el cobre (Cu), por motivos de que el principal elemento de interés en Las Bambas es el cobre.

8.3.1 Blancos

Se trata de muestras de material estéril con granulometría fina y gruesa, utilizadas para evaluar posibles contaminaciones durante la preparación. Los blancos de granulometría gruesa deben procesarse inmediatamente después de las muestras con alta concentración de mineral. Se recomienda una frecuencia de inserción de 2%. Estas muestras deben ser similares en litología para asegurar que sean analizadas en igualdad de condiciones que las demás.

Los materiales utilizados para la inserción de blancos fueron certificados al inicio de la operación y se extraen de canteras previamente evaluadas y de litologías idénticas a los del tajo Ferrobamba. Los límites máximos aceptables para cada elemento son: Cu = 0.005%, Ag = 2.5 ppm, Mo = 10 ppm; estos límites fueron utilizados para evaluar la contaminación.

Para la preparación de estas muestras se seleccionan zonas de mineralización previamente evaluadas baja, media y alta ley en Cu, se envían muestras a diferentes laboratorios (5 como mínimo) para su análisis químico respectivo, y finalmente se solicita a un experto para la evaluación estadística y posterior certificación de los resultados emitidos por cada laboratorio. Cabe resaltar que, este tipo de muestras de control son certificadas y se tienen almacenadas en el campamento minero para utilizar de manera rutinaria y en casos especiales de muestreo como el referido a esta investigación.

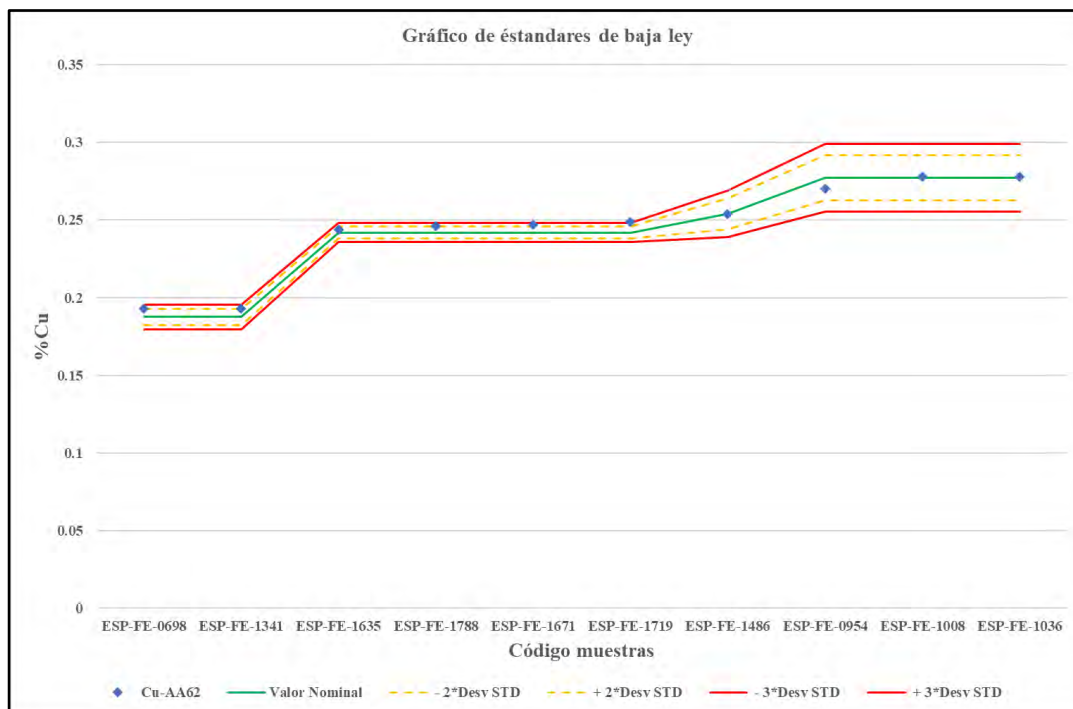
Para este estudio, de las 2280 muestras enviadas a laboratorio químico, se han insertado un total de 67 estándares, 10 de baja ley, 42 de media ley, y 15 de alta ley. Se utilizaron un total de 17 tipos de estándares: 4 de baja ley, 6 de media ley, y 7 de alta ley. Cada tipo de estándar cuenta con leyes distintas, pero dentro de los rangos establecidos (baja ley media ley, alta ley).

Usualmente los estándares son analizados por cobre, plata, y molibdeno; sin embargo, los análisis por plata y molibdeno no se toman en cuenta y solo es referencial, el análisis que si se considera en todas las evaluaciones de control de calidad es el del cobre, justamente porque es el elemento que marca la pauta y el yacimiento es principalmente de cobre.

Los gráficos mostrados a continuación se han elaborado a partir de varios tipos de estándares baja ley, media ley, y alta ley, los gráficos son compilaciones de todos los lotes de muestras enviadas, y se han dividido por rangos de ley. Dentro de los tipos de estándares de los tres rangos (baja, media, alta ley), se consideran subdivisiones, por ende, en los gráficos se observan múltiples rangos de desviación estándar.

FIGURA 16

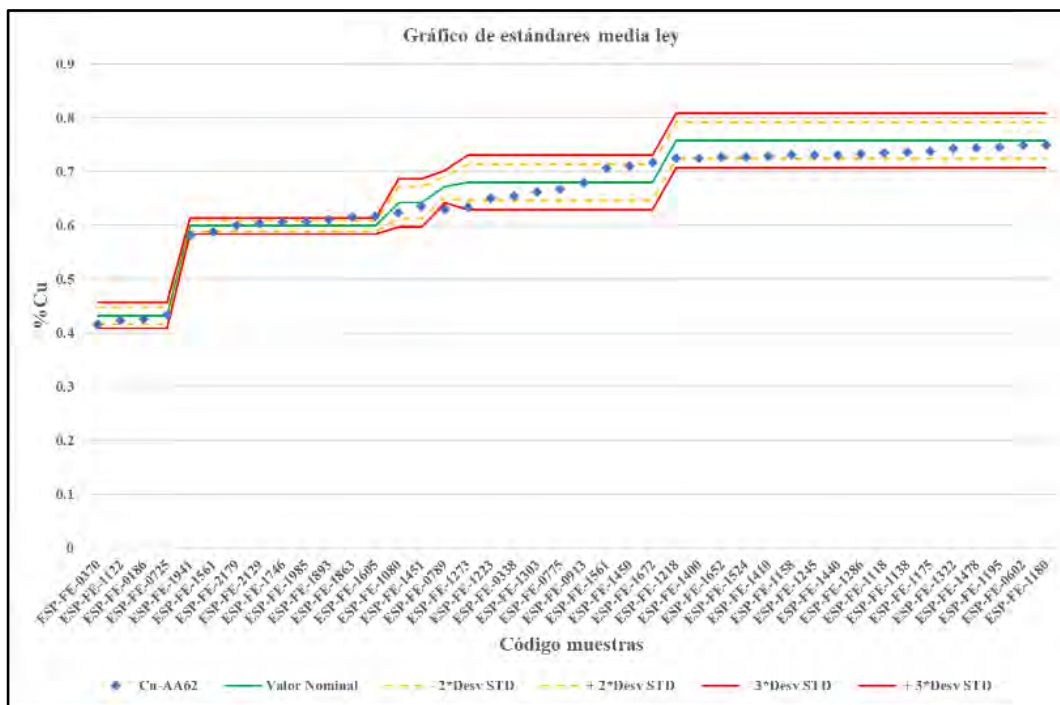
GRÁFICO DE ESTÁNDARES DE BAJA LEY. INCLUYE EL VALOR CONOCIDO DE LA MUESTRA (LÍNEA VERDE CONTINUA), LOS LÍMITES DE VARIACIÓN DE ÉSTOS (DESVIACIÓN ESTÁNDAR), Y LOS VALORES OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS QUÍMICO (PUNTOS AZULES).



De la figura 16, se puede observar que los estándares de baja ley analizados por laboratorio dieron valores dentro de los rangos esperados, es decir, estos valores analizados (puntos azules) deben estar dentro de la segunda desviación estándar y máximo dentro de la ternera, fuera de estos rangos los valores indican que hay pérdida de exactitud en el análisis y se deberían solicitar reanálisis para asegurar la calidad de este.

FIGURA 17

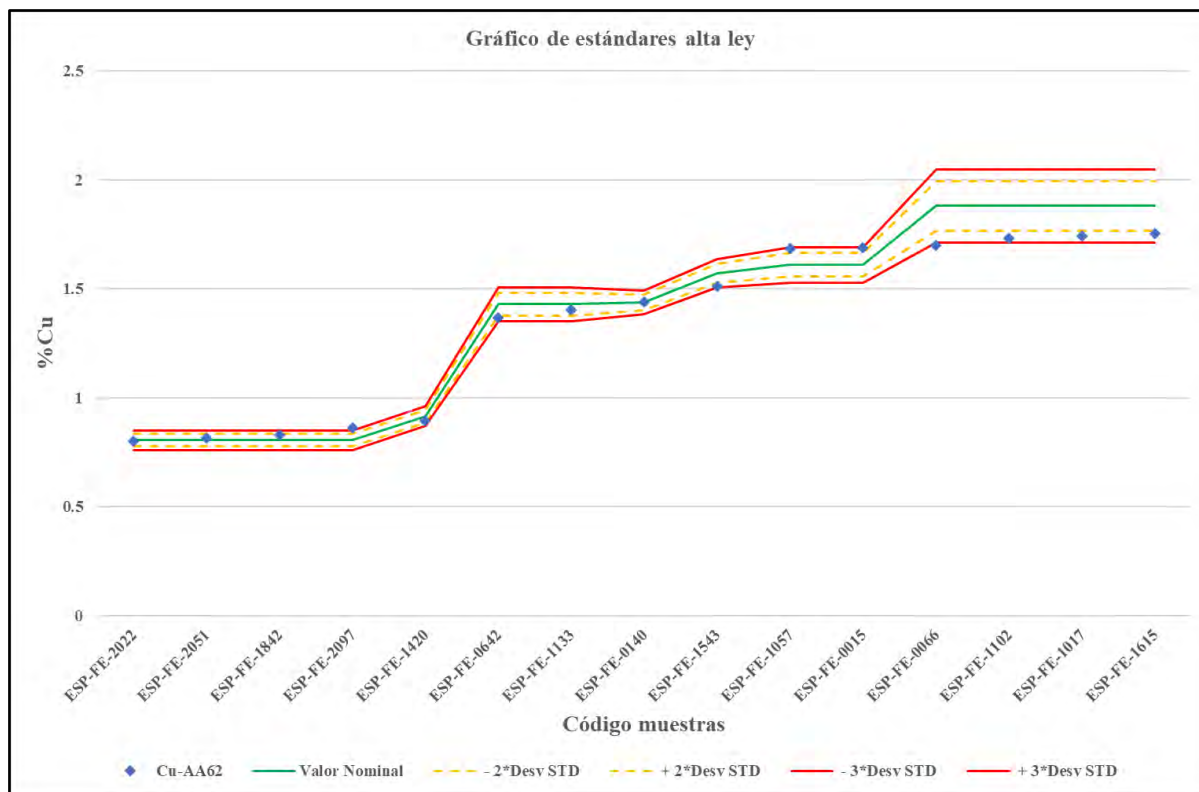
GRÁFICO DE ESTÁNDARES DE MEDIA LEY. INCLUYE EL VALOR CONOCIDO DE LA MUESTRA (LÍNEA VERDE CONTINUA), LOS LÍMITES DE VARIACIÓN DE ÉSTOS (DESVIACIÓN ESTÁNDAR), Y LOS VALORES OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS QUÍMICO (PUNTOS AZULES).



De la figura 17, se puede concluir que, la mayoría de los estándares de alta ley analizados se encuentran dentro de los rangos de desviación estándar aceptados, salvo una muestra que quedo fuera de la tercera desviación estándar, sin embargo, si se considera el global se tiene un performance aceptable del laboratorio, lo cual confirma que la exactitud den el análisis esta asegurado.

FIGURA 18

GRÁFICO DE ESTÁNDARES DE ALTA LEY. INCLUYE EL VALOR CONOCIDO DE LA MUESTRA (LÍNEA VERDE CONTINUA), LOS LÍMITES DE VARIACIÓN DE ÉSTOS (DESVIACIÓN ESTÁNDAR), Y LOS VALORES OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS QUÍMICO (PUNTOS AZULES).



Todos los valores obtenidos en el análisis químico están dentro de los límites de desviación estándar, tal como se observa en el gráfico de la figura 18.

8.3.3 Duplicados de campo

En el presente estudio no se consideran los gráficos comparativos de duplicados de campo, sin embargo, es necesario tener en cuenta algunos conceptos.

Los duplicados de campo son muestras tomadas en similares o mismas condiciones que las muestras originales. La finalidad de extraer una muestra duplicada es repetir consistentemente los resultados de la muestra original.

La precisión del muestreo de blastholes se evalúa con los duplicados de campo, los pares fallidos no deben exceder el 10% del total de pares.

8.3.4 Control de pesos

Es importante evaluar estadísticamente los pesos de las muestras analizadas para tener referencia si se cumplieron con los protocolos y procedimientos de muestreo y evaluar la calidad del trabajo. La recomendación del consultor sobre los pesos de las muestras es que deben estar entre 6 y 8 kg, esta cantidad de muestra es representativo para los análisis respectivos.

Usualmente se realizan controles de pesos con gráficos, en la cual se grafican unas curvas que representan límites máximos y mínimos, cuando se tienen resultados de muestras duplicadas fuera de estas curvas se puede concluir que el personal muestrero no está tomando las muestras en similares condiciones.

En el presente estudio no se han elaborado gráficos de control de pesos por tratarse de muestras que se obtuvieron en condiciones distintas a las rutinarias, es decir, al momento de realizar el cuarteo de muestras no se contaban efectivamente con muestras que cumplieran con condiciones para obtener los pesos adecuados.

CAPÍTULO IX: ANÁLISIS DE RESULTADOS

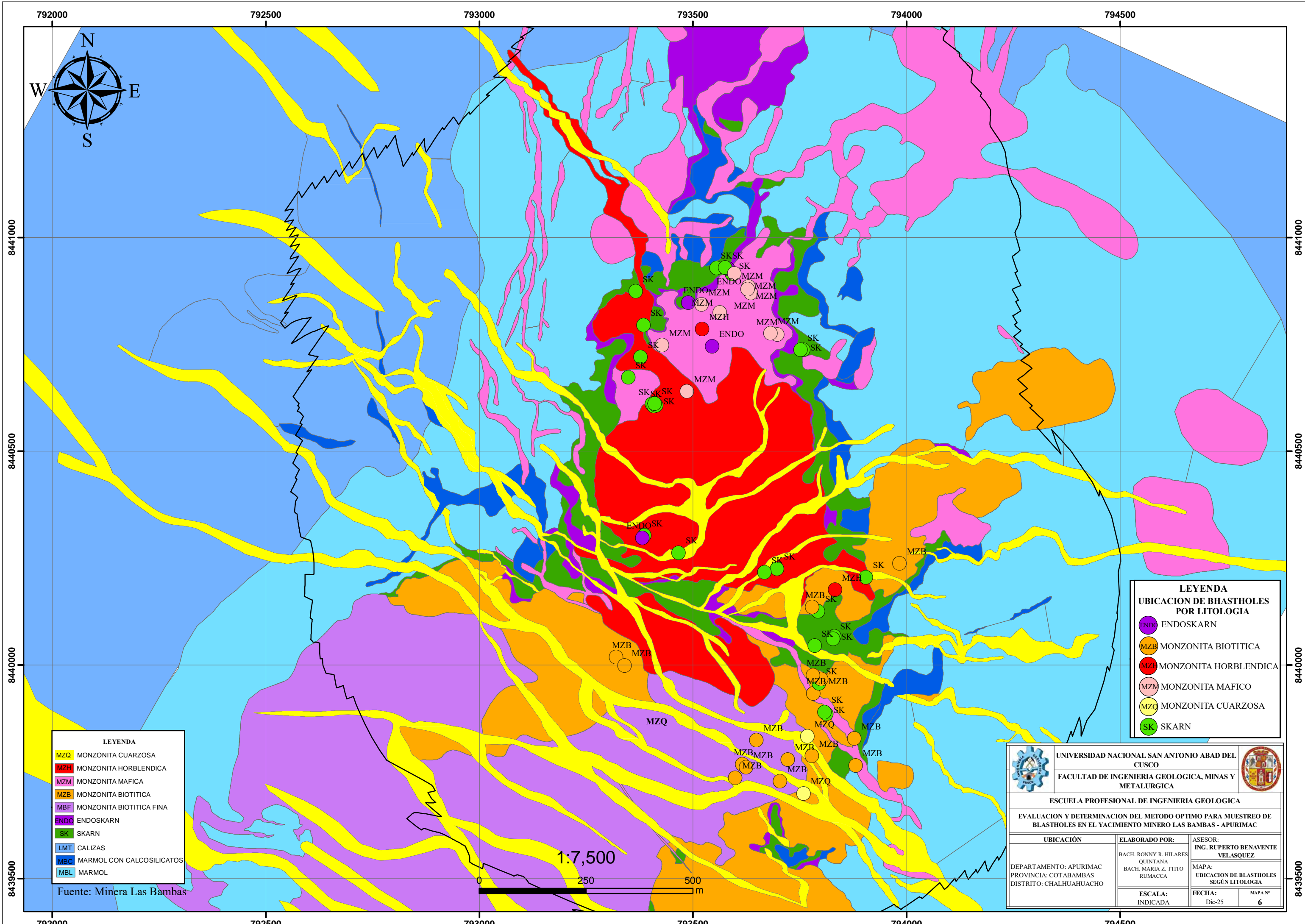
9.1 GENERALIDADES

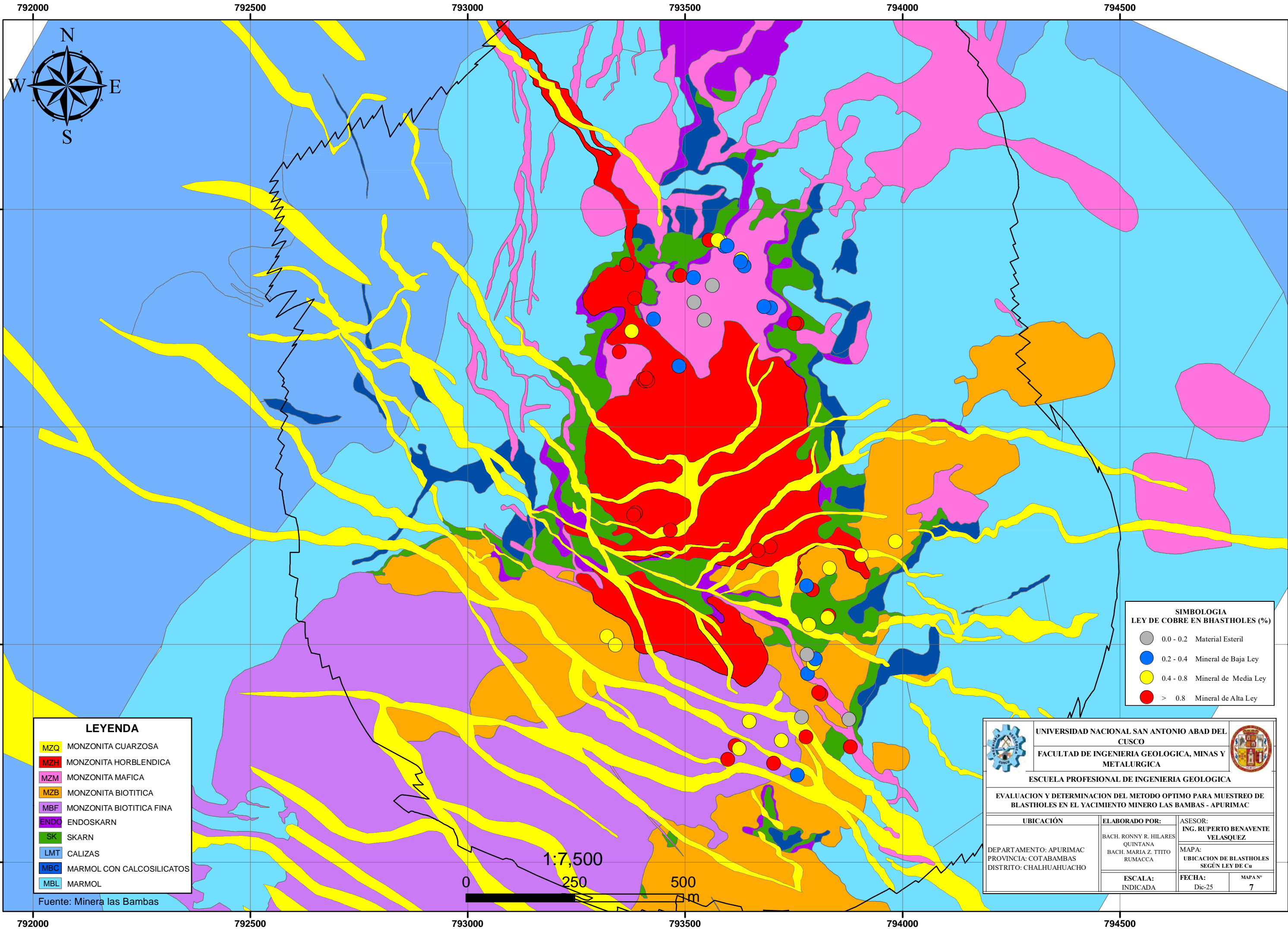
Este capítulo, abarca la evaluación de resultados finales del estudio. La comparación estadística de resultados de análisis químico entre cada uno de los métodos: auger, tubo, canal versus el cono total tendrá influencia directa en la decisión sobre el objetivo del estudio, lo cual fue evaluar y determinar el método óptimo para muestreo de blastholes en el yacimiento minero Las Bambas – Ferrobamba.

En el estudio se han obtenido información de análisis químico de 2280 muestras las cuales fueron enviadas a laboratorio, de estas para el análisis de resultados se han utilizado información de 57 muestras ya que 3 muestras mostraron valores atípicos o altos erráticos los cuales fueron excluidos para evitar influencia incorrecta.

Cada blasthole ensayado fue muestreado por los 3 métodos: auger, tubo y canal; cada muestra tomada fue de aproximadamente 6 a 8 kg. cabe recalcar que, éste mismo blasthole o cono de detritus fue extraído en su totalidad, siendo cuarteado y reducido a cantidades manipulables.

Todas estas muestras fueron enviadas a laboratorio químico para su análisis correspondiente.







| SIMBOLOGIA | |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| LEY DE COBRE EN BHASTHOLES (%) | |
| | 0.0 - 0.2 Material Estéril |
| | 0.2 - 0.4 Mineral de Baja Ley |
| | 0.4 - 0.8 Mineral de Media Ley |
| | > 0.8 Mineral de Alta Ley |

| LEYENDA | |
|---------|----------------------------------|
| | MZQ MONZONITA CUARZOSA |
| | MZH MONZONITA HORBLENDICA |
| | MZM MONZONITA MAFICA |
| | MZB MONZONITA BIOTITICA |
| | MBF MONZONITA BIOTITICA FINA |
| | ENDO ENDOSKARN |
| | SK SKARN |
| | LMT CALIZAS |
| | MBC MARMOL CON CALCOSILICATOS |
| | MBL MARMOL |

Fuente: Minera las Bambas

| | | | | | | |
|---|--|------------------------------------|---|---|--|----------------|
|  | UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO | |  | | | |
| FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGICA | | | | | | |
| ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA | | | | | | |
| EVALUACION Y DETERMINACION DEL METODO OPTIMO PARA MUESTREO DE BLASTHOLES EN EL YACIMIENTO MINERO LAS BAMBAS - APURIMAC | | | | | | |
| UBICACIÓN | | ELABORADO POR: | | ASESOR: | | |
| DEPARTAMENTO: APURIMAC PROVINCIA: COTABAMBAS DISTRITO: CHALHUAHUACHO | | BACH. RONNY R. HILARES QUINTANA | | ING. RUPERTO BENAVENTE VELASQUEZ | | |
| | | BACH. MARIA Z. TITTO RUMACCA | | MAPA: UBICACION DE BLASTHOLES SEGÚN LEY DE Cu | | |
| | | ESCALA: INDICADA | | FECHA: | | MAPA Nº |
| | | | | Dic-25 | | 7 |

Laboratorio químico reportó los resultados de análisis químico por Cu, Ag, Mo, para su procesamiento en gabinete.

En la figura 19 se puede observar el resumen de muestras enviadas a laboratorio para su análisis químico; se consideran las muestras enviadas por método de muestreo y adicionalmente las muestras de control insertadas. De los 60 blastholes ensayados, en total se enviaron 2280 muestras, lo más resaltante son las 1920 muestras analizadas que corresponden a los 60 blastholes (32 muestras por blasthole).

FIGURA 19 CUADRO RESUMEN DE MUESTRAS ENVIADAS A LABORATORIO POR MÉTODO DE MUESTREO, Y MUESTRAS DE CONTROL INSERTADOS

| TIPO DE MUESTRA | | CANTIDAD (Und) |
|------------------------|------------------------|----------------|
| Por metodo de muestreo | Auger | 60 |
| | Canal | 60 |
| | Tubo | 60 |
| | Cono completo(cuarteo) | 1920 |
| Muestras de control | Estandares | 90 |
| | Blancos | 90 |
| Total | | 2280 |

9.2 EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS DE MUESTREO

9.2.1 Parámetros estadísticos básicos

Los parámetros estadísticos que serán analizados son: promedio o media aritmética, coeficiente de variación, coeficiente de correlación lineal. Estos parámetros nos ayudaran a entender estadísticamente la representatividad del muestreo observando los resultados analíticos por cada método de muestreo.

9.2.1.1 Promedio o media aritmética

El resultado se obtiene al dividir la suma total de los datos de la variable entre el número de observaciones. Este parámetro se utilizará para calcular el promedio de ley (Cu, Mo, y Ag) de las 32 muestras del cono completo.

FIGURA 20

FÓRMULA PARA CALCULAR EL PROMEDIO ARITMÉTICO O MEDIA ARITMÉTICA

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n}$$

A continuación, un ejemplo de la información obtenida luego del ensayo de muestreo en un blasthole.

TABLA 9

EJEMPLO PARA VISUALIZAR DATOS OBTENIDOS LUEGO DEL MUESTREO Y RESPECTIVO ANÁLISIS QUÍMICO. EL EJEMPLO MUESTRA LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO, PARA UN BLASTHOLE

| N° de Pozo | Metodo | N° DE MUESTRA | Cu-AA62(%) | Ag-AA61(ppm) | Mo-AA61(ppm) | Lito |
|-------------------|--------|---------------|------------|--------------|--------------|---------|
| 1-01-3735-003-423 | Auger | ESP-FE-1112 | 1.07 | 4.6 | 787 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Tubo | ESP-FE-1113 | 0.96 | 4 | 631 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Canal | ESP-FE-1114 | 1.17 | 5.1 | 730 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1115 | 0.98 | 4.1 | 640 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1116 | 0.98 | 4.1 | 632 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1117 | 1.03 | 4.6 | 588 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1119 | 1.05 | 4.1 | 566 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1120 | 1.07 | 4.6 | 565 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1121 | 1.08 | 5.1 | 639 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1122 | 1.09 | 5.2 | 716 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1123 | 1.07 | 4.8 | 649 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1124 | 0.97 | 3.9 | 548 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1125 | 1.04 | 4.2 | 604 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1126 | 1.01 | 4.2 | 553 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1127 | 1.06 | 4.4 | 564 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1129 | 0.86 | 3.5 | 562 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1130 | 0.92 | 3.7 | 521 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1131 | 0.81 | 3.1 | 461 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1132 | 0.94 | 3.6 | 510 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1133 | 0.97 | 4.2 | 661 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1134 | 0.98 | 4.2 | 669 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1135 | 1.01 | 4.3 | 724 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1136 | 1.00 | 4.7 | 722 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1137 | 1.01 | 3.9 | 785 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1139 | 0.93 | 4 | 843 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1140 | 1.04 | 4 | 885 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1141 | 0.97 | 3.9 | 787 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1142 | 0.85 | 3.3 | 585 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1143 | 1.01 | 3.7 | 724 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1144 | 1.01 | 3.5 | 731 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1145 | 1.03 | 3.9 | 774 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1146 | 0.92 | 3.5 | 551 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1147 | 1.18 | 4.5 | 574 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1148 | 1.10 | 4.6 | 615 | Pórfido |
| 1-01-3735-003-423 | Cono | ESP-FE-1149 | 1.07 | 4.3 | 532 | Pórfido |

Del cuadro anterior se puede apreciar lo siguiente: de un total de 35 muestras obtenidas, 32 corresponden al cono completo (4 muestras por cada sección), y 3 muestras corresponden a los 3 métodos estudiados. Finalmente, para realizar las comparaciones de la ley del blasthole y la de los 3 métodos de muestreo se necesita tener una ley representativa del cono completo, esto quiere decir que se necesita la ley media o promedio de las 32 que se muestran (tabla 9). Para éste blasthole por ejemplo se tiene como promedio los siguientes valores: 1.00%Cu, 4.12ppmAg, 640ppmMo. Esta metodología fue aplicada para calcular la ley promedio o media aritmética de los 57 conos es así como tienen mayor precisión y representatividad, en cambio las leyes para

cada método es una sola muestra; lo que finalmente se comparará en el análisis general son: ley promedio del cono completo versus ley por auger, ley por tubo, ley por canal.

9.2.1.2 Coeficiente de variación

Se trata de una medida de dispersión que permite analizar la distribución de los datos en relación con la media, así como la variabilidad existente entre los propios datos (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).

FIGURA 21

FÓRMULA PARA CALCULAR EL COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE UNA POBLACIÓN DE MUESTRAS

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \cdot 100\%$$

Donde:
 CV = Coeficiente de variación.
 σ = desviación estándar de la población.
 μ = media aritmética de la población.

Para el cálculo del coeficiente de variación de pares de muestras o duplicados, se empleará la siguiente fórmula:

FIGURA 22

FÓRMULA PARA CALCULAR COEFICIENTE DE VARIACIÓN PARA PARES DE MUESTRAS

$$CV_{AVR}(\%) = 100 \times \sqrt{\frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{(a_i - b_i)^2}{(a_i + b_i)^2} \right)}$$

Esta fórmula será aplicada para comparar las leyes obtenidas del muestreo del cono completo y los 3 métodos de muestreo, en este caso se está tomando a los resultados de los 3 métodos de muestreo como muestras duplicadas para ver cuál es el performance de cada uno de ellos, se observará el método de muestreo con el que las muestras están menos dispersos.

A continuación, se muestra el cuadro de resultados calculados del coeficiente de variación por rangos de ley para cada método de muestreo. Los rangos de leyes fueron tomados de la tabla de clasificación de materiales de Ferrobamba - Las Bambas.

TABLA 10

RESULTADOS DE CÁLCULO DE COEFICIENTE DE VARIACIÓN OBTENIDOS PARA CADA TIPO DE MUESTREO COMPARADO CON LA LEY DEL CONO TOTAL, POR ELEMENTO ANALIZADO Y POR RANGO DE LEYES.

| Metodo | Rango de ley Cu | CV por elemento | | |
|--------------|----------------------------|-----------------|-----|-----|
| | | Cu | Ag | Mo |
| Auger | Baja ley (0.20% - 0.39%) | 13% | 40% | 14% |
| | Media ley (0.40% - 0.79%) | 16% | 14% | 11% |
| | Alta ley ($\geq 0.80\%$) | 13% | 16% | 15% |
| Tubo | Baja ley (0.20% - 0.39%) | 7% | 37% | 14% |
| | Media ley (0.40% - 0.79%) | 5% | 8% | 11% |
| | Alta ley ($\geq 0.80\%$) | 7% | 8% | 7% |
| Canal | Baja ley (0.20% - 0.39%) | 14% | 36% | 20% |
| | Media ley (0.40% - 0.79%) | 17% | 15% | 20% |
| | Alta ley ($\geq 0.80\%$) | 15% | 16% | 13% |

Según el cuadro se observa que los valores de Cu tienen menos variación que los de Ag y Mo, observándose hasta un máximo de 40% para Ag obtenido por el método del Auger esto, estos valores de Ag y Mo son muy sensibles ya que su concentración en la naturaleza es baja por ello se expresa en partes por millón (ppm). Los valores altos por encima de 15% podrían darse debido a errores de muestreo y la sensibilidad de sus valores en este caso para los elementos Ag y Mo.

En Cuanto al Cu se tiene un CV máximo de 17% obtenido por el método del canal, los valores más bajos se muestran para los métodos del auger 13% y tubo con un CV más bajo de 5% por ende mejor comportamiento.

Para observar de manera general los resultados obtenidos en cuanto al coeficiente de variación, a continuación, el resumen por método de muestreo.

TABLA 11

RESULTADOS OBTENIDOS LUEGO DEL CÁLCULO DE COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LOS DATOS TOTALES. EN ESTE CASO NO SE TOMA EN CUENTA LOS RANGOS DE LEYES.

| Metodo | CV por elemento | | |
|--------|-----------------|-------|-------|
| | Cu | Ag | Mo |
| Auger | 13.7% | 24.7% | 13.6% |
| Tubo | 6.5% | 20.6% | 10.8% |
| Canal | 15.5% | 23.0% | 17.7% |

Para el Cu se observa un mejor performance para el método del tubo, los resultados obtenidos con este método de muestreo son menos dispersos 6.5%, en segundo lugar, el método con mejor comportamiento es el auger 13.7%, y por último el método de muestreo con mayor variación es el del canal 15.5%. Para Ag y Mo el método del tubo tiene mejor valor 20.6% y 10.8% respectivamente, en el caso del método del auger para Ag posee mayor variación 24.7%, pero menor variación para Mo 13.6% en comparación al método del canal.

En general se observa mejores resultados para el método del tubo, este método de muestreo tiene valores con menor variación para los elementos Cu, Ag, Mo.

9.2.1.3 Desviación estándar de la población

La desviación estándar, o desviación típica, es una medida que revela la dispersión media de una variable. Su valor es siempre mayor o igual a cero. Una desviación estándar baja sugiere que la mayoría de los datos de la muestra se concentran cerca de la media (o valor esperado), mientras que una desviación estándar elevada revela que los datos se distribuyen en un rango más amplio de valores.

FIGURA 23

FÓRMULA PARA CALCULAR LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE UNA POBLACIÓN DE MUESTRAS

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^N (x_i - \bar{X})^2}{N}}$$

• X → Variable
• x_i → Observación número i de la variable X .
• N → Número de observaciones.
• \bar{X} → Es la media de la variable X .

En este caso los valores que se utilizan son el conjunto de resultados obtenidos en laboratorio para cada método de muestreo, se obtiene por la formula mostrada anteriormente, para el caso: x_i = Ley Cu por cada método, \bar{X} = ley promedio obtenido por cada método.

TABLA 12

RESULTADOS DE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LAS POBLACIONES DE MUESTRAS CALCULADAS PARA CADA MÉTODO DE MUESTREO Y POR ELEMENTO

| Metodo Muestreo | Desviacion Estandar por Elemento | | |
|--------------------|----------------------------------|---------|---------|
| | Cu(%) | Ag(ppm) | Mo(ppm) |
| Auger | 0.97 | 5.45 | 226.91 |
| Tubo | 0.99 | 5.75 | 240.28 |
| Canal | 1.01 | 5.91 | 270.14 |

Observando los resultados obtenidos, se evidencia que el muestreo realizado por el método del auger (0.97%) presenta menos dispersión con respecto a los obtenido por los métodos tubo (0.99%) y canal (1.01%). El segundo método con menos desviación es el del tubo para los 3 elementos, el método con mayor dispersión es el método del canal para los 3 elementos.

La distancia de los datos a su media aritmética es menor para el caso del muestreo con auger, y para el caso del tubo y canal se observa un rango más amplio de datos.

9.2.1.4 Coeficiente de correlación lineal

Este parámetro nos permite analizar la intensidad de correlación entre pares de datos, cuanto más se acerca a 1 o 100%, la correlación es alta. Se pueden presentar correlación positiva (curva pendiente positiva), negativa (curva pendiente negativa), y correlación nula cuando no tiene ninguna tendencia (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).

Los gráficos de dispersión son herramientas muy importantes en este análisis, nos ayuda a identificar la correlación entre valores procesados, en este caso leyes de Cu, Ag, Mo.

FIGURA 24

ILUSTRACIÓN GRAFICA DE CORRELACIÓN LINEAL DE DATOS MOSTRANDO LA ORIENTACIÓN DE LA LÍNEA DE REGRESIÓN SEGÚN LOS VALORES DE ÍNDICE O COEFICIENTE DE CORRELACIÓN



FIGURA 25

FÓRMULA PARA CALCULAR EL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL DE DATOS. TAL COMO SE MUESTRA EN LA FORMULA SE UTILIZA PARA COMPARAR PARES DE DATOS Y SU INTENSIDAD DE CORRELACIÓN.

$$r = \frac{S_{XY}}{S_X S_Y} \quad \begin{array}{l} S_{XY} = \text{Covarianza} \\ S_X S_Y = \text{Desviación Estandar de X multiplicada} \\ \text{por la Desviación Estandar de Y} \end{array}$$

Para obtener este parámetro se necesita de la covarianza, tan como indica la formula.

9.2.1.5 Covarianza

Es un valor que indica en qué medida dos variables aleatorias varían juntamente con respecto a sus medias, permitiendo evaluar cómo se comporta una variable en relación con la otra. Si la covarianza es <0 resulta que las variables tienen relación inversa; y si la covarianza es >0 quiere decir que las variables tienen relación directa. La covarianza se calcula por la fórmula de la figura 25 (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).

FIGURA 26

FÓRMULA PARA CALCULAR LA COVARIANZA DE DATOS QUE SIRVE PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN

$$S_{xy} = \frac{\sum_1^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{N}$$

9.2.2 Gráficos de correlación lineal de leyes para métodos de muestreo: auger, tubo y canal vs leyes del cono total

A continuación, se presentan los gráficos de correlación lineal o de dispersión para leyes obtenidas del muestreo de blastholes por los métodos estudiados: auger, tubo y canal. En esta parte del estudio se evaluarán la comparación de las leyes obtenidas por los 3 métodos de muestreo vs las leyes obtenidas de la extracción del cono total, esta evaluación se realizará para los elementos analizados cobre, molibdeno y plata los cuales son los principales en el yacimiento minero Ferrobamba.

La cantidad total de blastholes ensayados o estudiados son: 57, de los cuales 31 corresponden a zona de skarn y 26 a zona de pórfido. Cada uno de éstos 57 blastholes o conos de detritus cuenta con 1 muestra obtenida por método del auger, 1 muestra obtenida por método del tubo, y 1 muestra obtenida por método del canal, así mismo, cada blasthole cuenta con “una” ley que resultó del promedio de 32 muestras analizadas que provienen del cuarteo de las 8 secciones por blasthole.

Para tener consideración, una correlación perfecta positiva es cuando el valor de la ley de Cu, Mo, o Ag, muestreado por los métodos auger, tubo o canal son directamente proporcionales con la ley obtenido del cono total, en el caso en que estos sean inversamente proporcionales se dice que tienen correlación perfecta negativa.

Cuando los puntos ploteados en los gráficos de dispersión no tienen ninguna orientación o tienen distribución circular indica que los valores no tienen correlación o tienen correlación nula, si se presentara este caso al comparar las leyes obtenidas por cualquiera de los 3 métodos

de muestreo con las leyes del cono total estaríamos en el caso que el método de muestreo no tiene validez o no es óptimo.

A continuación, analizaremos lo antes mencionado para cada uno de los métodos de muestreo.

9.2.2.1 Correlación lineal de leyes para el método del auger

Los resultados del análisis químico de laboratorio luego del muestreo por el método del auger, fueron comparados con la ley del cono total, con la finalidad de conocer la intensidad de correlación de los resultados y determinar si el empleo de este método es óptimo.

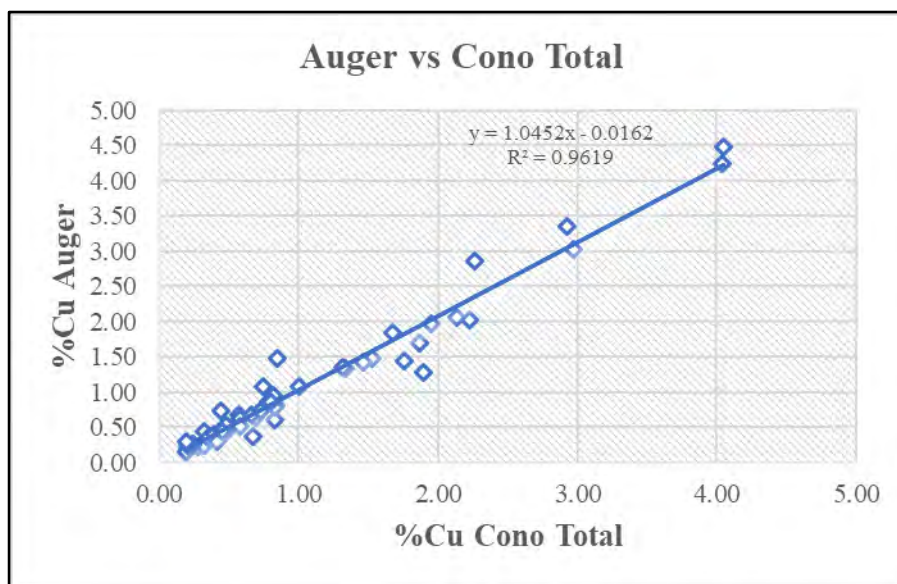
El muestreo por el método del auger es más ligero en comparación con el tubo y canal, porque se utiliza un atornillador que utiliza fuente de energía para ayudar al operador a extraer la muestra, lo que facilita que se pueda extraer más muestras que por los otros métodos.

9.2.2.1.1 Auger vs cono total para Cu

Se utiliza el grafico elaborado en Excel, en el eje “X” se plotan los valores de leyes de Cu obtenidos de la extracción del cono total, y en el eje “Y” los valores de Cu obtenidos por el método de muestreo auger. La línea de tendencia de los puntos plotados que corresponden a las leyes de Cu debería tener una correlación perfecta positiva en teoría, sin embargo, por la variabilidad del yacimiento y la naturaleza de la mineralización en la práctica no se logra obtener esos valores, pero deberían tener valores similares y presentar una tendencia positiva y el coeficiente de correlación cercano a 1 o 100%.

FIGURA 27

COMPARACIÓN DE LEYES DE CU MUESTREADO POR EL MÉTODO DEL AUGER VS LEYES OBTENIDOS DE LA EXTRACCIÓN DEL CONO TOTAL



Según la figura 27 la nube de puntos ploteados presenta una correlación positiva con coeficiente de correlación 0.96, significa que las leyes obtenidas por el método del auger están muy cercanos a los obtenidos por el muestreo del cono total.

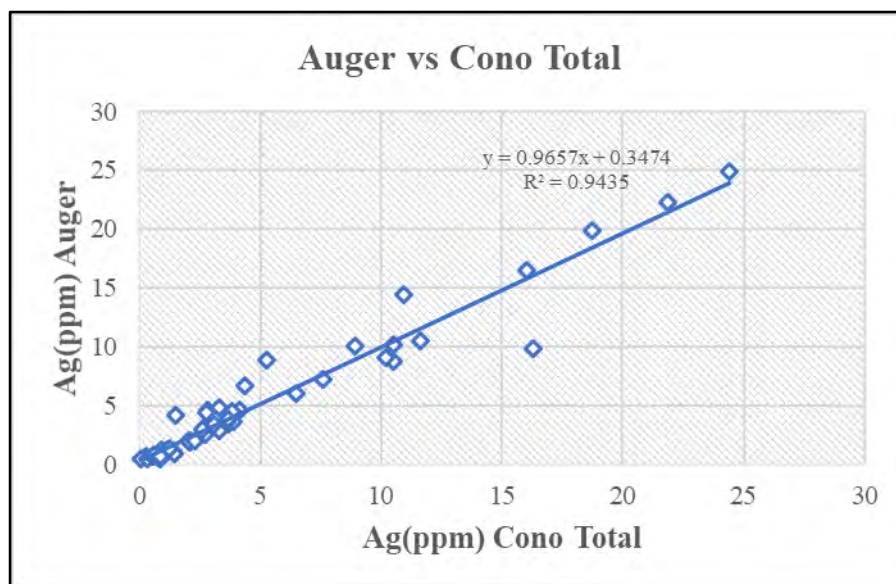
9.2.2.1.2 Auger vs cono total para Ag

Del mismo modo que para el Cu en este caso se evaluara la correlación para Ag a partir del grafico de leyes obtenidas del muestreo por el método del auger versus las leyes obtenidas de la extracción del cono total.

El elemento Ag es un metal importante en la industria de la electricidad y otros fines, sin embargo, la concentración en el yacimiento Ferrobamba es baja y se cuantifican en partes por millón (ppm), esto no desmerece que se realice el estudio respectivo para evaluar los métodos de muestreo óptimos.

FIGURA 28

COMPARACIÓN DE LEYES DE AG MUESTREADO POR EL MÉTODO DEL AUGER VS LEYES OBTENIDOS DE LA EXTRACCIÓN DEL CONO TOTAL



Los valores de análisis de Ag obtenidos por el método del auger según el gráfico de correlación de leyes comparado con las leyes obtenidas del cono total muestra buen resultado para el coeficiente de correlación 0.94 (figura 28). A pesar de la sensibilidad que tienen sus valores por la concentración en ppm se muestran puntos que tienen la tendencia positiva con fuerte correspondencia entre los pares de datos.

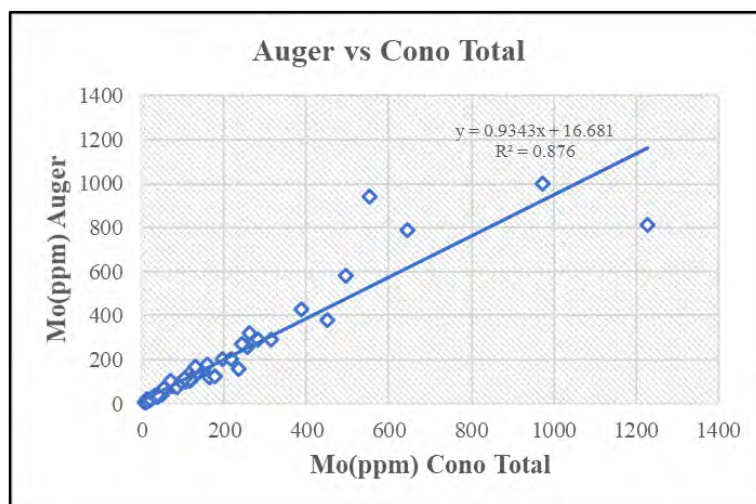
9.2.2.1.3 Auger vs cono total para Mo

El Mo es de gran importancia en el yacimiento Ferrobamba, al igual que el Ag las concentraciones se distribuyen en ppm, se realiza este estudio porque es el segundo elemento importante después del Cu para la empresa y por ello se cuenta con una planta de procesamiento de molibdeno para recuperar el metal.

Se evalúa la correspondencia de leyes de Mo obtenidos por el método del auger, y leyes obtenidas de la extracción del cono total.

FIGURA 29

COMPARACIÓN DE LEYES DE MO MUESTREADO POR EL MÉTODO DEL AUGER VS LEYES OBTENIDOS DE LA EXTRACCIÓN DEL CONO TOTAL



Según el grafico de leyes de Mo obtenidos por el muestreo del método del auger versus leyes obtenidos del cono total se puede observar un coeficiente de correlación de 0.88 (figura 29), la distribución de pares de leyes tiene una tendencia lineal positiva, sin embargo, los datos se alejan de la recta de regresión, se debe tener un análisis más detallado al momento de sacar conclusiones.

9.2.2.2 Correlación lineal de leyes para el método del tubo

Los resultados de muestras obtenidos por el método del tubo fueron correlacionados con las leyes del cono total, con la finalidad de conocer si el empleo de este método y resultados obtenidos reflejan la ley del cono total.

Se realiza este análisis para los 3 elementos químicos: Cu, Mo, Ag; es importante realizar estos análisis a fin de conocer el grado de correlación de las leyes y tomar decisiones que tendrán un impacto positivo en los intereses de la empresa.

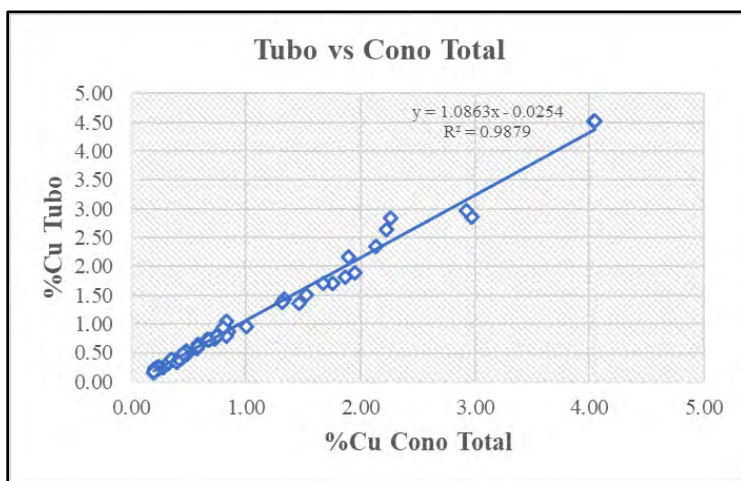
El muestreo por el método del tubo necesita algo más de esfuerzo que el del auger, porque el operador de manera manual debe introducir el tubo en el cono de detritus para poder extraer la muestra. La ventaja que tiene este método de muestreo es que se tiene menor pérdida de material que el auger.

9.2.2.2.1 *Tubo vs cono total para Cu*

Se evalúa el gráfico de leyes obtenidos por el método del tubo comparado con leyes obtenidos de la extracción del cono total. En este caso se evalúa la comparación para el elemento Cu, se obtiene la recta de regresión de los pares de datos y se analiza el coeficiente de correlación lineal.

FIGURA 30

COMPARACIÓN DE LEYES DE CU MUESTREADO POR EL MÉTODO DEL TUBO VS LEYES OBTENIDOS DE LA EXTRACCIÓN DEL CONO TOTAL



Según la figura 30 se observa un coeficiente de correlación 0.99 para el Cu, significa una correspondencia entre pares de datos muy elevado cercano al valor ideal.

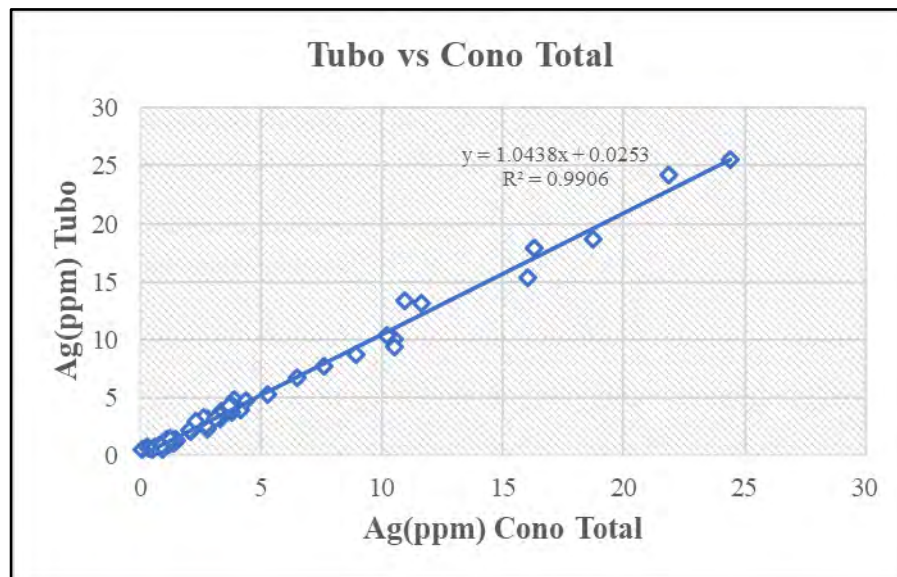
La ventaja de este método de muestreo es que se pierde menos material al momento del muestreo porque se trata de un tubo, sin embargo, se necesita mayor esfuerzo y tiempo para extraer las muestras.

9.2.2.2.2 *Tubo vs cono total para Ag*

A continuación, se presentan los gráficos de comparación de leyes para el muestreo por el método del tubo.

FIGURA 31

COMPARACIÓN DE LEYES DE AG MUESTREADO POR EL MÉTODO DEL TUBO VS LEYES OBTENIDOS DE LA EXTRACCIÓN DEL CONO TOTAL

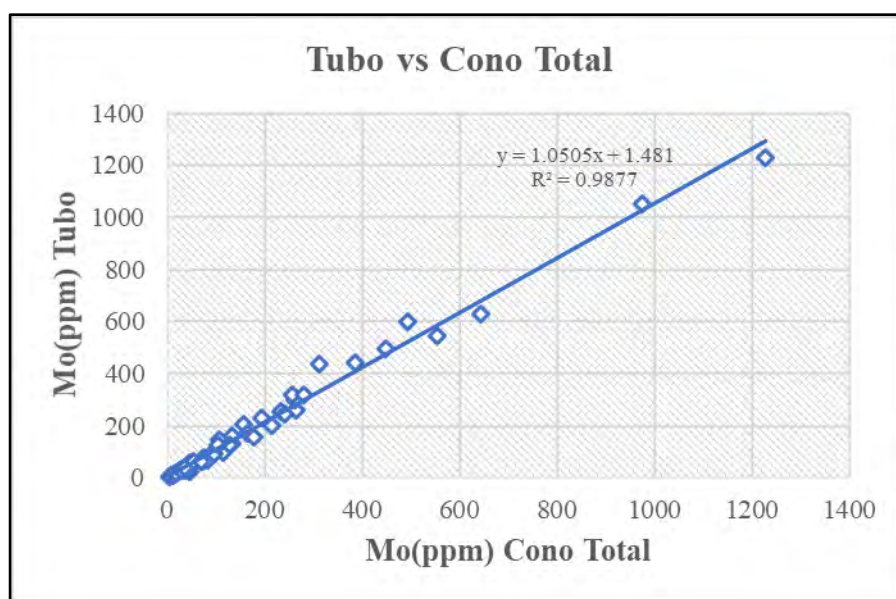


Según la figura 31, se puede afirmar que, las leyes obtenidas del muestreo de blastholes para Ag por el método del tubo, tienen muy buena correlación con las leyes del cono total. Se observa un coeficiente de correlación de 0.99, este valor es muy cercano al valor ideal 1; la mayoría de los pares ploteados se ubican muy cercanos a la recta de regresión.

9.2.2.2.3 Tubo vs cono total para Mo

FIGURA 32

COMPARACIÓN DE LEYES DE MO MUESTREADO POR EL MÉTODO DEL TUBO VS LEYES OBTENIDOS DE LA EXTRACCIÓN DEL CONO TOTAL.



En la figura 32, se muestra el grafico de correlación lineal de las leyes obtenidas por el muestreo del método del tubo versus leyes del Cono Total para Mo. Se observa muy buena correlación entre los pares de datos ploteados, la mayoría de los puntos se ubican cercanos a la recta de regresión. Analizando los gráficos obtenidos para los 3 elementos: Cu, Mo, Ag; en los 3 casos los coeficientes de correlación lineal son 0.99, muy cercanos al valor ideal 1. Por lo tanto,

el método de muestreo del tubo muestra valores muy consistentes al ser comparado con las leyes del Cono Total.

9.2.2.3 Correlación lineal de leyes para el método del canal

Los resultados de muestras obtenidas por el método del canal fueron correlacionados con la ley del cono total, con la finalidad de conocer si el empleo de este método y resultados obtenidos reflejan la ley total del cono.

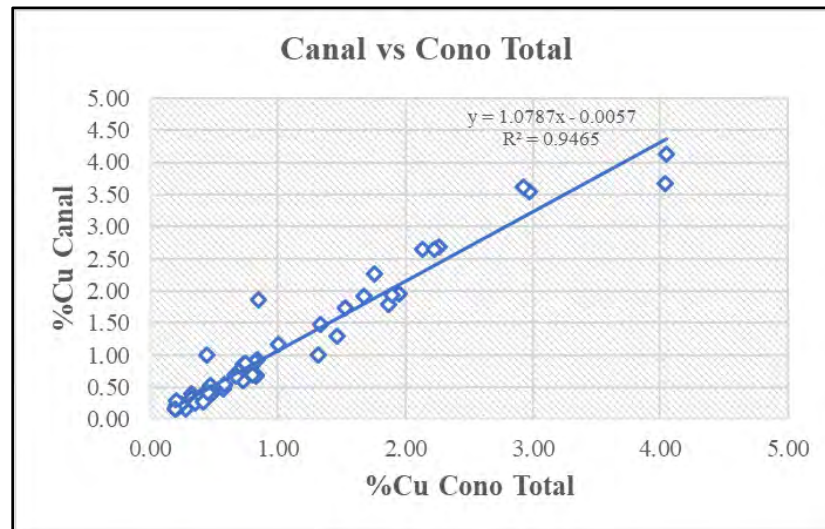
Al igual que los métodos del auger y el tubo, las leyes de muestras obtenidas por el método del canal fueron comparadas con las leyes del Cono Total, para los 3 elementos Cu, Mo, y Ag.

Para los análisis respectivos, se han elaborado gráficos de correlación lineal, comparando leyes de muestras obtenidas por el método del canal versus las leyes del Cono Total; los gráficos muestran una nube de puntos de los 57 blastholes ensayados, los cuales de acuerdo con la similitud en sus valores se grafican cerca de la recta de regresión si son similares o alejado en el caso de que sean más dispersos.

9.2.2.3.1 Canal vs cono total para Ag

FIGURA 33

COMPARACIÓN DE LEYES DE CU MUESTREADO POR EL MÉTODO DEL CANAL VS LEYES DEL CONO TOTAL



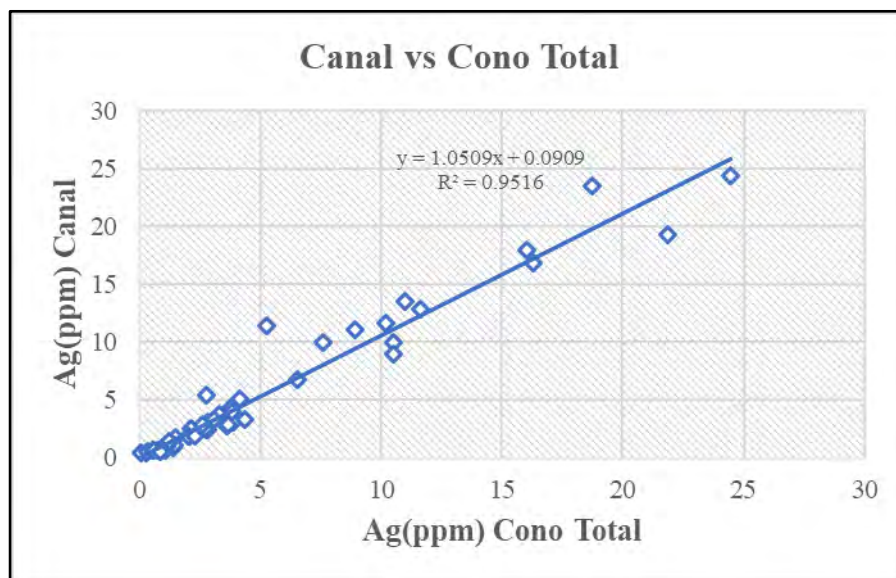
De acuerdo con lo observado en la figura 33, el grafico de leyes obtenidas del muestreo por el método del canal versus las leyes del Cono Total, muestra un coeficiente de correlación de 0.95 en este caso para el Cu.

Realizando la comparación de los valores de coeficiente de correlación lineal obtenidos por los métodos auger y tubo, el muestreo por el método del canal presente un valor ligeramente más disperso, la ubicación de los puntos plotados se muestran más alejado de la recta de regresión; sin embargo, no significa que este método no sea óptimo.

9.2.2.3.2 Canal vs cono total para Ag

FIGURA 34

COMPARACIÓN DE LEYES DE AG MUESTREADO POR EL MÉTODO DEL CANAL VS LEYES OBTENIDOS DE LA EXTRACCIÓN DEL CONO TOTAL



Para el elemento Ag el grafico de correlación de leyes de muestras obtenidas por el método del canal vs las leyes del Cono Total se muestra en la figura 34. El coeficiente de correlación lineal obtenido es 0.95, se observa que para zonas menores a 5ppm en ley de Ag los puntos se ubican concentradas cerca de la recta de regresión; para leyes mayores a 5ppm los puntos están más alejados de la recta.

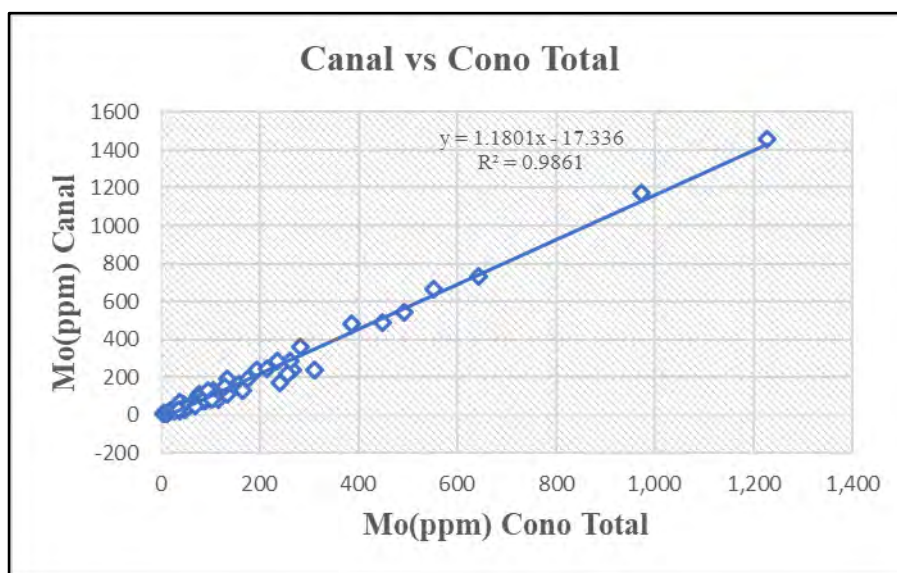
Se entiende que por la variabilidad del yacimiento no se pueden obtener las mismas leyes por ningún método de muestreo; la naturaleza de la concentración de elementos es muy variable para todos los elementos.

Realizando la comparación del método del canal con los métodos auger y tubo, presenta similares resultados con el método del auger.

9.2.2.3.3 Canal vs cono total para Mo

FIGURA 35

COMPARACIÓN DE LEYES DE MO MUESTREADO POR EL MÉTODO DEL CANAL VS LEYES OBTENIDOS DE LA EXTRACCIÓN DEL CONO TOTAL



Para el caso del Mo se tiene el figura 35, que muestra las leyes de muestras obtenidas por el metodo del canal versus las leyes del Cono Total, obteniendose un coeficiente de correlacion lineal de 0.99, este valor es muy elevado. Según el grafico se observa que la mayoría de los puntos se ubican muy cerca a la recta de regresion; los pares de datos ploteados muestran muy buena correlacion de leyes. Realizando la comparacion de los resultados del muestreo con el metodo del canal y el tubo ambos presentan un coeficiente de correlacion lineal de 0.99, lo que significa que los metodos de muestreo canal y tubo serían los mas recomendables para mostrar una zona de mineralizacion de Mo.

CONCLUSIONES

1. Se ha evaluado y determinado que el método óptimo para muestreo de blastholes en el yacimiento minero Las Bambas – Apurímac es el método del tubo, ya que cuenta con valores cercanos en cuanto a leyes a las del cono total.
2. Se ha comparado las leyes de Cu, Ag, y Mo obtenido por los métodos de muestreo auger, tubo, canal y se ha comparado con las leyes del cono total dando como resultado que el método del tubo se acerca más a la del cono total.
3. Se ha determinado que la mejor correlación de leyes de Cu, Ag, y Mo por rangos de ley (baja ley, media ley, alta ley) comparado con la ley del cono total, es la del método del tubo.
4. Se ha evaluado que el método de muestreo de blastholes que presenta menor variabilidad y mayor representatividad en comparación con la ley del cono total es el método del tubo.
5. Se ha determinado el coeficiente de variación y coeficiente de correlación lineal por tipo de roca (pórfido y skarn), entre la ley de cobre obtenida por los métodos de muestreo por auger, tubo, y canal comparado con la ley de cobre del cono total. Los resultados del coeficiente de variación para el pórfido son: auger: 11.69%, tubo: 6.12%, canal: 12.49%; para el caso del skarn: auger: 15.2%, tubo: 7.15%, y canal: 17.4%. Los resultados del coeficiente de correlación lineal para el pórfido son: auger: 0.92, tubo: 0.98, y canal: 0.93; para el caso del skarn: auger: 0.83, tubo: 0.98, y canal: 0.94. Finalmente se determina que el método de muestreo de blastholes que refleja menor coeficiente de variación y alto coeficiente de correlación lineal tomando en cuenta los tipos de rocas es el método del tubo.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda evaluar la implementación de muestreo de blastholes en el yacimiento minero Las Bambas – Apurímac por el método del tubo, y considerar como plan piloto esta implementación en zonas que sea operativamente accesible.
2. Se recomienda realizar la comparación de leyes de Cu, Ag, y Mo obtenidos por los métodos de muestreo de blastholes conocidos y compararlos con leyes del cono total en poblaciones mayores.
3. Se recomienda considerar los resultados que indican la mejor correlación de leyes de Cu, Ag, Mo por rangos de ley (baja, media, y alta ley), comparado con la ley del cono total para seleccionar el método óptimo para muestreo de blastholes que en el presente estudio es el del tubo.
4. Se recomienda evaluar el muestreo de blastholes por el método del tubo en diferentes partes del blasthole (baja, media, alta), para determinar su performance en cada una de ellas y comparar con la ley del cono total.
5. Se sugiere realizar análisis estadísticos adicionales como el sesgo y error relativo para cuantificar los errores sistemáticos y corroborar que el método del tubo sugiere menor variación con respecto a la ley del cono total.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahnert, F. (1991). *Geomorphology: An Introduction to the Study of Landforms (2nd ed.)*. Springer.
- Alvarez, R. J. (2021). *Estudio petrominerográfico, geoquímico y sus relaciones con mineralización del yacimiento Ferrobamba - Las Bambas - Apurímac*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco]. Obtenido de <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/5711?locale-attribute=en>
- Alvarez, R. J. (2021). *Estudio petrominerográfico, geoquímico y sus relaciones con mineralización del yacimiento Ferrobamba – Las Bambas – Apurímac*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. Obtenido de https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RUNS_28b1533c9fd6c46a8e279b01f68a813e
- Anchelia, J. H. (2021). *Reducción del error de muestreo aplicando protocolos de aseguramiento y control de calidad (QA/QC) en operaciones a tajo abierto*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Obtenido de https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_1d6a0944702cd9570914e3ec87bf6f6be
- Bobadilla, W. (2020). *Optimización del proceso de ore control mediante técnicas metodológicas de muestreo en blastholes para el plan de minado de corto plazo en mina Toquepala Southern Peru Copper Corporation*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional Del Altiplano]. Obtenido de https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RNAP_de77520da4f5c9ba0eb62b0963733724
- Bruni, M., & Spuhler, D. (2018). *Pozos perforados (pozo profundo)*. Sustainable Sanitation and Water Management (SSWM) Toolbox. Obtenido de <https://sswm.info/water-nutrient-cycle/water-sources/hardwares/groundwater-sources/drilled-wells>
- Carlotto, V., Cárdenas, J., Velarde, T., Cerpa, L., Tupacyupanqui, V., Acosta, H., & Jaimes, F. (2006). *Evolución sedimentaria y tectónica de la formación ferrobamba de la Región Cotabambas - Apurímac*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.
- Carlotto, V., Quispe, J., Acosta, H., Rodríguez, R., Romero, D., Cerpa, L., . . . Lu, S. (2009). Dominios Geotectónicos y Metalogénesis en Perú. *Bol. Soc. Geol. Perú*, 10, 1-89. Obtenido de <https://www.sgp.org.pe/wp-content/uploads/001-Carlotto.pdf>
- Chilque, C. J. (2023). *Reducción de la discrepancia de valores de las leyes en una misma zona de muestreo basado en la actualización de los protocolos de aseguramientos y control de la calidad*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Obtenido de https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_7157664b9cc1f449cb8ed711684c5f1e
- Choquetico, G. J. (2021). *Control de la calidad del muestreo de blastholes, litología y control de mineral del banco 3690, tajo ferrobamba mina Las Bambas - Apurímac*. [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de San Agustín]. Obtenido de https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNSA_bf6cfc6807d407a65f744b0400ed867b
- Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (1992). *An Introduction to the Rock-Forming Minerals (2nd ed.)*. Longman.

- Pons, J. M., Franchini, M. B., & Impiccini, A. (2009). Los skarns de Fe de Vegas Peladas: características geológicas, mineralógicas y distribución de las paragénesis minerales. *Rev. Asoc. Geol. Argent.*, 64(2). Obtenido de https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-48222009000200013
- Ramírez, F., Torres, J., & Vargas, A. (2015). *Geología y minería superficial: Técnicas y aplicaciones. Ediciones Geológicas.*
- Schwartz, D., García, F., & Rodríguez, A. (2017). *Técnicas modernas de minería a cielo abierto: Principios y prácticas. Editorial Minera.*
- Segundo, A., & Rojas, E. (2013). *Exploración de yacimientos minerales. Ediciones Técnicas Minerales.*
- Sillitoe, R. H. (2003). Skarn deposits and their relationship to ore-forming processes. *Ore Geology Reviews*, 22(4), 243-273.
- SRK Consulting Peru S.A. (2024). *Actualización del modelo estructural del tajo Ferrobamba, Las Bambas, Apurímac (Informe No. 23D69801, Rev. C). Preparado para MMG Limited.*
- Sucupuca, K. S., & Cruz, J. C. (s.f.). *Aseguramiento y control de calidad del proceso analítico por el método fluorescencia de rayos X de muestras Blastholes en una mina de tajo abierto en el sur del Perú.* [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de San Agustín]. Obtenido de https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNSA_539ecd1887ce1a87472efbf43414dd1a
- SYDLE. (2024). *Control de Calidad: ¿cuál es su función? ¡Descubre cómo hacerlo!* Obtenido de <https://www.sydle.com/es/blog/control-de-calidad-cual-es-su-funcion-descubre-como-hacerlo-635692df4037f135695fbd75>
- Universidad Americana de Europa. (2019). *La calidad en la industria.* Obtenido de <https://unade.edu.mx/que-es-la-calidad-en-la-industria/>
- Walpole, R. E., & Myers, R. H. (2002). *Probability and Statistics for Engineers and Scientists (7th ed.). Prentice Hall.*
- Washington, J., Pellegrini, A. E., & Cattani, V. M. (2014). *Contenidos de Edafología Génesis, evolución y propiedades físico químicas del suelo.* Universidad Nacional de la Plata.
- Xstrata Perú S.A. (2009). *Informe Programa de Exploración - 2008 Geología Las Bambas - Perú.*
- Zavaleta, J. L. (2022). *Uso de simulación para medir el impacto económico en una reconciliación de mineral [Tesis de título profesional, Universidad de Chile].* Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/185730/Uso-de-simulacion-para-medir-el-impacto-economico-en-una-reconciliacion-de-mineral.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ANEXOS

1. Matriz de consistencia

| MATRIZ DE CONSISTENCIA: EVALUACION Y DETERMINACION DEL METODO OPTIMO PARA MUESTREO DE BLASTHOLES EN EL YACIMIENTO MINERO LAS BAMBAS - APURÍMAC | | | | | | |
|--|--|--|--|--|---|---|
| PROBLEMA | OBJETIVO | HIPOTESIS | MARCO TEORICO | VARIABLES | METODOLOGIA | TECNICAS/INSTRUMENTOS |
| General: ¿Cual es el metodo optimo para muestreo de blastholes en el yacimiento minero las bambas - Apurímac? | General: Evaluar y determinar el metodo optimo para muestreo de blastholes en el yacimiento minero Las Bambas - Ferrobamba ubicado en la region Apurimac | General: La comparación de la ley de Cu, Ag y Mo obtenida por los métodos de muestreo auger, canal y tubo con la ley del cono total permite identificar un método de muestreo que presenta mayor representatividad y menor variación en la unidad minera Las Bambas – Apurimac. | <ul style="list-style-type: none"> •Muestreo •Blastholes o cono de detrito •Métodos de muestreo: auger, canal y tubo •Minera las Bambas •Yacimiento tipo pórfido de Cu – Mo. •Aseguramiento y control de calidad (QA/QC) | Variable Independiente: Metodos de muestreo de blastholes (auger, canal y tubo) | Tipo: aplicada Nivel: descriptiva-correlacional Diseño: experimental Enfoque: cuantitativo | Técnicas: <ul style="list-style-type: none"> •Análisis comparativo de métodos •Muestreo en campo •Revisión de resultados de laboratorio |
| Específicos: ¿Qué diferencias existen entre las leyes de Cu, Ag y Mo obtenida por el método de muestreo por auger, canal y tubo en comparación con la ley del cono total? | Específicos: Comparar las leyes de Cu, Ag y Mo obtenidas por los métodos de muestreo auger, canal y tubo con las leyes del cono total. | Específicos Existen diferencias significativas entre las leyes de Cu, Ag y Mo obtenidas por los métodos de muestreo auger, tubo, y canal en comparación con las leyes del cono total. | | | | |
| ¿Cuáles son los rangos de ley de Cu, Ag y Mo en los que presenta mejor correlación de leyes entre muestreo por auger, canal, tubo y el cono total? | Determinar los rangos de ley de Cu, Ag, y Mo en los que presenta mejor correlación de leyes entre muestreo por auger, canal y tubo, comparado con el cono total | El metodo de muestreo por auger presenta mejor correlacion en distintos rangos de ley de Cu, Ag, y Mo comparado con el cono total. | | | | |
| ¿Qué método de muestreo de blasthole presenta menor variabilidad y mayor representatividad en comparación con la ley del cono total? | Evaluar el metodo de muestreo de blastholes que presenta menor variabilidad y mayor representatividad en comparación con la ley del cono total. | El método de muestreo por auger es el que tiene menor variabilidad y mayor representatividad en comparación con la ley del cono total. | | | | |
| ¿Cual es el coeficiente de variación y coeficiente de correlación lineal por tipo de roca (porfido y skam), entre la ley obtenida por el metodo de muestreo por auger, tubo, canal, comparado con la ley del cono total? | Determinar el coeficiente de variación y coeficiente de correlación lineal por tipo de roca (porfido y skam), entre la ley obtenida por el metodo de muestreo por auger, tubo, canal, comparado con la ley del cono total. | Existe menor coeficiente de variación y mayor coeficiente de correlación lineal si se compara valores por tipo de roca (porfido y skam), entre la ley obtenida por el metodo de muestreo por auger comparado con la ley del cono total. | | | | |
| | | | | Variable Dependiente: Determinación del metodo óptimo para muestreo de blastholes. | Población: 60 Blastholes perforados en tajo Ferrobamba. Muestra: Blastholes seleccionados según criterios técnicos donde se aplicaron los cuatro métodos (auger, canal, tubo y cono total) y la codificación de muestras para tener trazabilidad. | Instrumentos <ul style="list-style-type: none"> •Procedimientos de muestreo Auger, Canal y tubo •Base de datos de leyes de Cu, Ag y Mo. |

2. Matriz de operacionalización de variables

| MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES | | | | |
|--|--|-----------------------------------|--|--|
| EVALUACION Y DETERMINACION DEL METODO OPTIMO PARA MUESTREO DE BLASTHOLES EN EL YACIMIENTO MINERO LAS BAMBAS - APURÍMAC | | | | |
| VARIABLE | DEFINICION CONCEPTUAL | DIMENSIONES | INDICADORES | ITEMS |
| Metodos de muestreo de blastholes (auger, canal y tubo) | <p>Es una técnica fundamental dentro de la metodología de la investigación, ya que permite seleccionar una parte representativa de la población para obtener información generalizable al total.</p> <p>Es un método que consiste en seleccionar un subconjunto de una población para estudiarlo y, a partir de los resultados obtenidos, extrapolar conclusiones al total de la población (Hernandez, Fernandez y Baptista, 2014)</p> | •Tipo de método de muestreo | <ul style="list-style-type: none"> •Método canal •Método tubo •Método auger | <ul style="list-style-type: none"> •Registro de método de auger •Registro de método de canal •Registro de método de tubo. |
| | | •Representatividad del muestreo | •Sesgo de la ley | El metodo subestima o sobreestima la ley de Cu |
| | | •Variabilidad de resultados | •Coeficiente de variación | Registro de leyes de Cu, Ag, Mo |
| Determinacion del método óptimo para muestreo de blastholes | <p>Es el proceso mediante el cual se selecciona la técnica de muestreo de blastholes más adecuada para el estudio, considerando los objetivos de la investigación, las características de la población, los recursos disponibles y el nivel de precisión requerido, con el fin de obtener resultados representativos y confiables (William G. Cochran 1977).</p> | •Calidad de informacion geologica | •Cumplimiento del QA/QC | Resultados de laboratorio |
| | | •Correlacion de resultados | •Coeficiente de correlacion lineal y coeficiente de variacion de ley Cu, Mo, Ag | De 0 a100% |
| | | •Analisis comparativo de metodos | •Consistencia de resultados, revision de resultados de laboratorio | Ley de Cu (%), Ag (ppm) y Mo (ppm) obtenidos por metodo auger, canal y tubo |

3. Abreviaturas

Cu: cobre

Mo: molibdeno

Ag: plata

Au: oro

Zn: zinc

Fe: hierro

MMG: Minerals and Metals Group

QA: quality assurance (aseguramiento de calidad)

QC: quality control (control de calidad)

CV: coeficiente de variación

Fm: formación

Fe: Ferrobamba

MBL: marble (mármol)

MZB: monzonita biotítica

MBF: monzonita biotítica fina

MZM: monzonita máfica

MZH: monzonita hornbléndica

MZQ: monzonita cuarzosa

SK: skarn

MBC: marble calcosilicates (mármol con calcosilicatos)

LMT: limestone (caliza)

ENDO: ensdoskarn

Mo: montañas

CL: colinas y lomadas

Pi: piedemontes

PD: planicies y depresiones

Ch: Chuquibambilla

So: Soraya

Ma: Mara

Vol: volcánicos

Vi: Vilcarani

Qr: quaternary

mf: morrenas y fluvioglaciales

Dgzmz: dioritas, granodioritas, cuarzo – feldespatos, y monzonitas

Ft: fases tardías

Puntos cardinales: E: norte, S: sur, E: este, W: oeste