

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**INFORME TECNICO**

**ESTUDIO METALURGICO EN LA EMPRESA  
MINERA POLIMETALICA ANTAMINA**

**PRESENTADO POR:**

BACH. RUBEN ENRIQUEZ SERRANO

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

**BAJO LA MODALIDAD DE SERVICIOS A NIVEL PROFESIONAL**

**DIRECTORA DE LA UNIDAD DE INVESTIGACION:**

DRA. ING. AMANDA ROSA MALDONADO FARFAN

**CUSCO – PERU**

**2024**

# INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

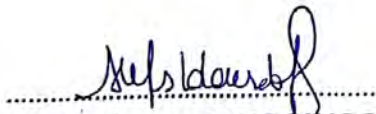
La que suscribe, ha sometido al sistema Turnitin, el trabajo de investigación: "ESTUDIO METALURGICO EN LA EMPRESA MINERA POLIMETALICA ANTAMINA" presentado por: ENRIQUEZ SERRANO, Rubén con DNI 23987724, para optar al Título Profesional de Ingeniero Químico. Informo que el Informe Técnico ha sido sometido a revisión por 01 vez, mediante el software Antiplagio, conforme al Art. 6° del *Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de laUNSAAC* y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 3 %.

## 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 se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en condición de Directora de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Procesos, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 08 de febrero de 2024



Dra. Ing. ~~Amanda Rosa~~ MALDONADO FARFAN

DNI: 23822559

ORCID: 0000-0002-4870-7078

### Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio:  
<https://unsaac.turnitin.com/viewer/submissions/oid:27259:325345660?locale=es-MX>

NOMBRE DEL TRABAJO

**ESTUDIO METALURGICO EN LA EMPRE  
SA MINERA POLIMETALICA ANTAMINA  
5 (3) (1).pdf**

AUTOR

**RUBEN ENRIQUEZ SERRANO**

RECUENTO DE PALABRAS

**16968 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**79357 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**82 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**3.4MB**

FECHA DE ENTREGA

**Feb 6, 2024 11:27 AM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Feb 6, 2024 11:28 AM GMT-5****● 3% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 3% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 0% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

**● Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Bloques de texto excluidos manualmente
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 20 palabras)

## **DEDICATORIA**

Con todo mi cariño dedico este trabajo a mi esposa Josefina y a mis hijos Michelle, Darío y Sophia por quienes lucho para superarme y son la inspiración de cada día.

A mi hermano Justo que es el modelo que sigo al éxito y a mis hermanas Teo y Carmen, que siempre me acompañan en mis logros.

En memoria a mis recordados padres Rosa y Eloy por ser el ejemplo en vida de honradez, fe, lealtad, sapiencia y amor.

Ruben Enriquez Serrano

## Índice

Índice.....	ii
Tabla de figuras.....	v
Índice de tablas.....	viii
Índice de anexos.....	ix
Resumen.....	x
Capítulo I.....	1
Operaciones y procesos en compañía minera Antamina.....	1
Ubicación de las operaciones.....	1
La mina.....	2
Campamento Yanacancha.....	3
Presa de relaves.....	4
Descripción de las operaciones.....	5
Operaciones mina.....	5
Geología.....	10
Planta concentradora.....	13
Capítulo II.....	39
Metalurgia del depósito de Antamina.....	39
Penalidades y créditos en elementos menores.....	39
Concentrado De Cu.....	40
Concentrado Zn.....	41
Metalurgia del circuito de cobre.....	41
Efecto del pH y la cal en la flotación cobre.....	43
Efecto del cianuro en la flotación cobre.....	43
Efecto del colector PAX.....	44
Efecto de la pirita en la alimentación al molino.....	44

Efecto del Moly en la alimentación del molino.....	45
Efecto de la oxidación de la mena.....	46
Efecto De La Oxidación De La Mena.....	47
Metalurgia del circuito de zinc .....	49
Efecto de la cal y el pH .....	49
Efecto del sulfato de cobre .....	50
Efecto del cobre.....	51
Metalurgia del circuito de separación.....	52
Separación del bismuto .....	53
Separación del Moly .....	55
Capitulo III.....	56
Investigaciones metalúrgicas.....	56
3.1. Efecto del cianuro de sodio y pH en la flotación Rougher cobre .....	56
Introducción .....	56
Objetivo .....	56
Plan de evaluación .....	56
Resultados metalúrgicos de las pruebas.....	57
Conclusiones .....	61
3.2. Evaluación metalúrgica para disminuir el consumo de sulfato de zinc y cal.....	63
Introducción .....	63
Objetivo .....	63
Procedimientos.....	63
Pruebas de flotación para disminuir el consumo de cal por efecto del pH .....	67
Conclusiones .....	71
3.3. Evaluación de rotores Float Force .....	73

Antecedentes .....	73
Resultados de la evaluación .....	73
Conclusiones .....	80
Recomendaciones.....	80
Bibliografía.....	81
Glosario .....	81
Anexos .....	83
Microscopia de diferentes minerales de Antamina.....	83

## Tabla de figuras

Figura 1 Antamina y las cuatro zonas de operaciones .....	2
Figura 2 Campamento Yanacocha .....	3
Figura 3 Presa de relaves.....	5
Figura 4 Vista del Tajo Abierto Antamina.....	6
Figura 5 Tractores de oruga .....	8
Figura 6 Tractores de ruedas.....	8
Figura 7 Camion CAT 793 C de 240 Tm.....	10
Figura 8 Alteración esquemática y zona de metal.....	10
Figura 9 Faja CVB-001, Apilador Radial y Pilas de Almacenamiento de Mineral .....	14
Figura 10 Explotación a tajo abierto .....	14
Figura 11 Régimen de alimentación unitario al SAG .....	16
Figura 12 Velocidad para que suministre mayor cantidad de mineral al SAG .....	16
Figura 13 Trommel del SAG.....	17
Figura 14 Molino SAG.....	18
Figura 15 Molienda en el molino SAG.....	18
Figura 16 Molino SAG.....	21
Figura 17 Ciclones para la clasificación de tamaños .....	23
Figura 18 Analizador de tamaño de partículas .....	24
Figura 19 Molino de bolas .....	26
Figura 20 Circuito de molienda.....	26
Figura 21 Chancadora Pebles.....	28
Figura 22 Calcopirita.....	28
Figura 23 Bornita .....	29



Figura 24 Esfalerita .....	29
Figura 25 Bismuto.....	29
Figura 26 Celdas de flotación convencional .....	31
Figura 27 Remolienda .....	31
Figura 28 Proceso de Clasificación .....	32
Figura 29 Espesador .....	34
Figura 30 Mineroducto .....	36
Figura 31 Operaciones de Puerto .....	38
Figura 32 Procesamiento de menas de Antamina.....	42
Figura 33 Efecto de la Cabeza de Zn en la Contaminación del Concentrado de Cu.....	46
Figura 34 Dosis de NaCN para el esquema reactivo ZnSO <sub>4</sub> , Basado en el Ensayo de Cabeza de Cusol .....	48
Figura 35 Perdida de Cu.....	55
Figura 36 Influencia del NaCN y pH sobre el grado de Cu (Conc. Rougher de Cu) .....	58
Figura 37 Influencia del grado de Cu.....	58
Figura 38 Influencia del NaCN y pH en la Recuperación de Cu (Conc. Rougher de Cu) .....	59
Figura 39 Diagrama de pareto de los efectos estandarizados .....	59
Figura 40 Diagrama de efectos principals de recuperacion del Cu .....	60
Figura 41 diagrama de cubo de recuperacion de Cu .....	60
Figura 42 Desplazamiento de zinc en concentrado Rougher de cobre.....	64
Figura 43 Grado de Cu Vs Zn .....	65
Figura 44 Recuperacion de Cu Vs ZnO <sub>4</sub> .....	65
Figura 45 Grado de cobre en concentrado Rougher de cobre vs. Variación de pH .....	68
Figura 46 Desplazamiento de zinc en concentrado Rougher de cobre vs. variación de pH.....	69

Figura 47 Recuperación de cobre en concentrado Rougher de cobre vs. variación de pH.....	69
Figura 48 Recuperación Cobre.....	74
Figura 49 Recuperación Cobre.....	75
Figura 50 Histograma de diferencias Multi Mix – Float Force .....	75
Figura 51 Porcentaje de recuperación Cu por fracciones.....	76
Figura 52 Carta de control M4A .....	77
Figura 53 Análisis de Microscopia M4A .....	78
Figura 54 Float force pasados 4 meses de operación 1 .....	79
Figura 55 Float force pasados 4 meses de operación 2 .....	79

**Índice de tablas**

Tabla 1 Descripción del tipo de mineral .....	39
Tabla 2 Flotacion Rougher de Cobre variando en NaCN y la cal .....	57
Tabla 3 Flotación Rougher de Cobre variando la dosificación de ZnSO <sub>4</sub> .....	63
Tabla 4 Reducción del consumo de Sulfato de Zinc en el ahorro de costos .....	66
Tabla 5 Efecto de la reduccion del sulfato de Zinc en el ahorro del consume de Cal en Mineral M4A .....	67
Tabla 6 Efecto del pH en la flotación Rougher de Cobre.....	68
Tabla 7 Efecto del pH en la reduccion del consumo de cal y ahorro de costos .....	70
Tabla 8 Recuperacion de Cobre .....	73
Tabla 9 Analisis granulometrico Cu/Zn .....	76
Tabla 10 Analisis microscopico M4A.....	77

## Índice de anexos

Anexo A. Minerales en M1 A .....	83
Anexo B. Minerales en M2 B .....	86
Anexo C. Minerales en M2A C .....	88
Anexo D. Minerales en M4 D .....	89
Anexo E. Minerales en M4A E .....	91
Anexo F. Minerales en M6 F .....	92
Anexo G. Zona no oxidada G .....	94

## **Resumen**

El presente trabajo tiene por objetivo brindar una clara explicación de lo complejo de la metalurgia de una de las minas polimetálicas más compleja y grandes del mundo.

Este trabajo esta resumido en tres partes, la primera da una explicación de las operaciones unitarias en cada área de la empresa minera y así se podrá tener una clara visión de las operaciones que se realizan en este complejo minero.

La segunda parte da una explicación de la metalurgia con cada uno de los 5 tipos de minerales que se procesan en la planta concentradora, dando una explicación de lo complejo que es la metalurgia en este yacimiento minero.

La tercera parte muestra 3 investigaciones metalúrgicas que se implementaron en la planta concentradora por parte del área de Laboratorio metalúrgico en la optimización de recursos como son reactivos y/o equipos, con el objetivo de bajar costos y mejorar los performances de la planta.

Palabras clave: Yacimiento, mineral, recuperación, grado.

## Capítulo I

### Operaciones y procesos en compañía minera Antamina

#### Ubicación de las operaciones

La mina está ubicada en el distrito de San Marcos, provincia de Huarí en la Región Ancash, a 200 km. de la ciudad de Huaraz y a una altitud promedio de 4,300 metros sobre el nivel del mar. Se cuenta con un puerto, llamado Punta Lobitos, ubicado en la provincia costera de Huarney. (Ver figura 1). *Fuente: [www.antamina.com](http://www.antamina.com)*

Antamina es un complejo minero polimetálico que produce concentrados de cobre, zinc, molibdeno, y como subproductos concentrados de plata y plomo.

La inversión en Antamina (aproximadamente US\$ 2,300 millones de inversión inicial, más US\$ 1,200 millones de inversión en la expansión de sus operaciones) es considerada la más alta en la historia de la minería peruana. Actualmente es uno de los mayores productores peruanos de concentrados de cobre y zinc y una de las diez minas más grandes del mundo en términos de volumen de operaciones. Fuente: Minería en línea.

Compañía Minera Antamina S.A. es una empresa constituida bajo las leyes peruanas, entre cuatro empresas líderes en el sector minero mundial.

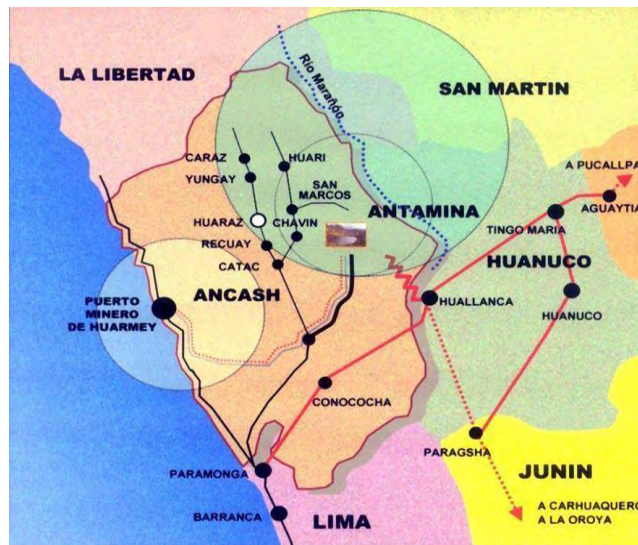
Los accionistas de Antamina son:

- BHP Billiton (33.75%)
- Glencore (33.75%)
- Teck (22.5%)
- Mitsubishi Corporation (10%)

*Fuente: [www.antamina.com](http://www.antamina.com)*

## Figura 1

*Antamina y las cuatro zonas de operaciones*



Fuente: [www.antamina.com](http://www.antamina.com)

### *La mina*

La mina está ubicada en la quebrada Antamina, en el distrito de San Marcos, a una latitud de  $9^{\circ}32'S$  y a una longitud de  $77^{\circ}03'W$ , y tiene una vida útil estimada hasta el año 2029. Se trata de una operación a tajo abierto que explota un depósito tipo “skarn”, Fuente: Estudio de Factibilidad, Lakefield Research.

Diariamente se extrae un promedio de 430,000 toneladas de material y se opera 24 horas al día, 365 días al año, en turnos de 12 horas, lo que la convierte en una de las diez principales operaciones mineras en términos de volumen, el tajo de la mina mide actualmente 3,400 metros de largo por 1,800 metros de ancho y tiene una profundidad de 700 metros, las reservas totales probadas y probables ascienden a 745 millones de toneladas métricas.

Fuente: [www.antamina.com](http://www.antamina.com)

### ***Campamento Yanacancha***

El campamento Yanacancha esta ubica cerca de la Planta Concentradora, que puede ser considerada una de las plantas de mayor automatización que existen actualmente en el mundo, equipada con una tecnología de punta que permite procesar el mineral extraído del tajo, el campamento también cuenta con un moderno y cómodo alojamiento para todo el personal. (Ver figura 2).

*Fuente:* [www.antamina.com](http://www.antamina.com)

### **Figura 2**

#### ***Campamento Yanacancha***



*Fuente:* [www.antamina.com](http://www.antamina.com)

### ***Puerta Punto Lobitos***

Está ubicado en Huarney, a 290 kilómetros al norte de Lima. Aquí se reciben los concentrados que son transportados desde la mina a través de un moderno ducto de acero, revestido con HDPE, y que recorre 302 kilómetros. Los concentrados, que vienen en forma de pulpa (con un contenido de 65% de sólidos) son recibidos, filtrados, almacenados y embarcados en buques para su exportación. El agua remanente de los concentrados es tratada y luego utilizada en la forestación de un bosque de 170 hectáreas de extensión.

*Fuente:* [www.antamina.com](http://www.antamina.com)



### ***Presa de relaves***

Ubicada en la Quebrada Huincush, a 4,107 metros sobre el nivel del mar (Elevación en crecimiento en el tiempo), es considerada la más alta del mundo. En su enorme dimensión, podría almacenar hasta 550 millones de toneladas de relaves, o 330 Mm<sup>3</sup> durante el tiempo de su vida útil, su diseño estructural a prueba de filtraciones, garantizan un estricto cuidado del medio ambiente.

La presa de relaves se encuentra a tres kilómetros de la planta concentradora, esta poza de relaves cuenta con una presa de arranque de 135 metros de altura y con una placa interior de concreto reforzado, esta elevación está protegida a su vez con geomembranas de alta densidad para evitar posibles filtraciones desde la poza de relaves hacia el exterior. (Ver figura 3).

*Fuente:* [www.antamina.com](http://www.antamina.com)

Túneles de drenaje, inyecciones de concreto de hasta 80 metros en los estribos y canales colectores de agua de lluvia con capacidad máxima de 25m<sup>3</sup>/s, complementan una obra de alta tecnología, lo que garantiza el cuidado del medio ambiente, así como su estabilidad estructural.

La presa de relaves no solo es empleada en la disposición de las fracciones no comerciales de lo procesado en la molienda, sino también para recircular el 98.5% del agua empleada por la concentradora, de esta manera Antamina no afecta cuerpos de agua.

Las descargas que se realizan desde la presa de relaves hacia el valle de Ayash, cumplen con los límites máximos permisibles (LMPs) vigentes y aseguran la libre disponibilidad del recurso en el valle como flujo ribereño todo el año, en al menos un caudal de 150 litros por segundo.

*Fuente:* [www.antamina.com](http://www.antamina.com)

**Figura 3. Tailing ,** *Fuente:* www.antamina.com

### *Presa de relaves*



*Fuente:* www.antamina.com

### **Descripción de las operaciones**

A continuación, se detalla una breve descripción de las operaciones en la mina

#### ***Operaciones mina***

El sistema de minado es a Tajo abierto, por lo que los riesgos de exposición a caídas de rocas son menores respecto a labores subterráneas.

Previamente Geología clasifica y limita los polígonos de minerales o de desmonte, marcándolos con banderines de diferentes colores predeterminados, luego se realizan reuniones a cargo de la Superintendencia de Mina para evaluar y priorizar los trabajos de carguío según la necesidad de producción, cabe resaltar que el plan de minado incluye perforación, voladura y acarreo de mineral y/o desmonte. La relación de desmonte total a Mineral total es de 2.70 actualmente

*Fuente:* www.antamina.com

**Figura 4.***Vista del Tajo Abierto Antamina**Fuente:* [www.antamina.com](http://www.antamina.com)

**Perforación y voladura.** La mina elabora los planes de perforación y voladura semanalmente, para ello se diseña mallas de perforación y se da instrucciones de carguío de explosivos para los taladros perforados y diseño de amarres de voladura.

La operación de perforación propiamente dicha se realiza con 5 perforadoras 49R, los cuales perforan taladros de hasta 18.5 metros considerando que la altura de los bancos es de 15 metros, el diámetro de broca de perforación es de 12 ¼”.

*Fuente:* [www.antamina.com](http://www.antamina.com)

Dependiendo del grado de dureza de la roca se obtendrá una velocidad de penetración que normalmente puede variar entre 100 y 25 m/h. También se tiene 2 perforadoras DMM2, que perforan taladros de 18.5 metros y con brocas de 9 7/8” de diámetro.

Las barras en este caso son de 32 y 35 pies de longitud y diámetro de 7 5/8”, además llevan un estabilizador en la parte inferior y un adaptador al cabezal de rotación, la velocidad de penetración que se logra es de 15 a 40 m/h, una vez concluida la perforación se procede a colocar el explosivo.

*Fuente:* [www.antamina.com](http://www.antamina.com)

El proceso de VOLADURA se inicia con la verificación de la profundidad de los taladros, si estos están con la profundidad de diseño, se cercará el área a cargarse con explosivo y colocarse los letreros de seguridad respectivos. Se decide el uso del tipo de explosivo según la presencia de agua en los taladros.

Si el taladro es seco se utilizará una carga de fondo de ANFO PESADO de 2.5 metros y una carga de columna de 7.5 metros con ANFO, si la presencia de agua es circundante y no se puede cercar el taladro mediante bombeo se utilizará como explosivo ANFO PESADO en toda la columna.

*Fuente:* [www.antamina.com](http://www.antamina.com)

Asimismo, se utilizarán los accesorios necesarios para la iniciación del explosivo, los que consisten en una línea nonel que lleva una película de aluminio en su interior y en uno de los extremos lleva un fulminante con sustancia explosiva capaz de arrancar a un iniciador explosivo que se coloca en el fondo del taladro, este último será el que explotando produzca la detonación de la columna de explosivo.

Una vez cargado con explosivo los taladros, estos se unen el día del disparo mediante un cordón detonante de acuerdo con un diseño previamente establecido y entre los taladros se colocarán retardadores de tiempo que normalmente van entre los 25 y 100 MS con la finalidad de dar un orden de detonación de los taladros y evitar daños por vibración.

Muy próximo a la hora de la voladura se procederá a extender una línea nonel conectada a la malla con una longitud suficiente hacia un lugar seguro para iniciar la detonación, la misma que se inicia con un instrumento detonador que acciona por golpe un fulminante normal.

*Fuente:* [www.antamina.com](http://www.antamina.com)

Como parte de su trabajo Mina se encarga de elaborar archivos por cada malla de perforación. Asimismo, se tiene reportes de consumo de explosivos y accesorios de voladuras. También se tiene reporte de consumo de brocas, donde se registran para cada broca los metros y horas perforadas. Al final de la voladura se realiza un control de calidad de los explosivos.

*Fuente:* [www.antamina.com](http://www.antamina.com)

## **Carguío.**

### **Figura 5**

*Tractores de oruga*



*Fuente:* [www.antamina.com](http://www.antamina.com)

### **Figura 6**

*Tractores de ruedas*



*Fuente:* [www.antamina.com](http://www.antamina.com)

El carguío se efectúa con maquinaria pesada de alto tonelaje y de fabricación de última generación; se cuenta con una flota capaz de poder mantener y cumplir con la producción necesaria.

Para el carguío de los camiones CAT 793-C, se emplean cuatro palas eléctricas de última generación marca Bucyrus modelo 495II de 56 yd<sup>3</sup>; cuya capacidad por cuchareo es de 80 TM de material y dos cargadores frontales CAT modelo 994D de 35 toneladas de capacidad, adicionalmente se cuenta con cargadores frontales CAT 992-G de 22 toneladas de capacidad para cargar a los camiones CAT 777-D. Todos ellos son usados para completar la disponibilidad de equipo de carguío. El DISPACHT en la zona de carguío según una programación y necesidades de producción controla los tiempos, desplazamientos, paradas, tonelaje por equipo o acumulado, etc. (Ver figuras 5,6 y 7).

*Fuente:* [www.antamina.com](http://www.antamina.com)

Acarreo. El DISPACHT se encarga de distribuir la flota de camiones dentro de todo el ámbito de la Mina. Para el acarreo Antamina cuenta con 40 camiones CAT 793-C de 240 Tm, también se cuenta con 03 camiones CAT 777-D de 90 toneladas de capacidad. El ACARREO se realiza desde los puntos de carguío hasta la CHANCADORA PRIMARIA, o STOCK PILES en el caso de mineral a los BOTADEROS o al TAILING DAM como desmonte o material de relleno, son diferentes kilómetros que recorrer, así como diferentes rutas, durante las cuales los operadores calificados en los diferentes equipos trabajan en todo momento con seguridad y eficacia. El DISPACHT, también controla el trabajo de los equipos auxiliares como motoniveladoras.

*Fuente:* [www.antamina.com](http://www.antamina.com)

**Figura 7**

*Camión CAT 793 C de 240 Tm*



*Fuente:* [www.antamina.com](http://www.antamina.com)

***Geología***

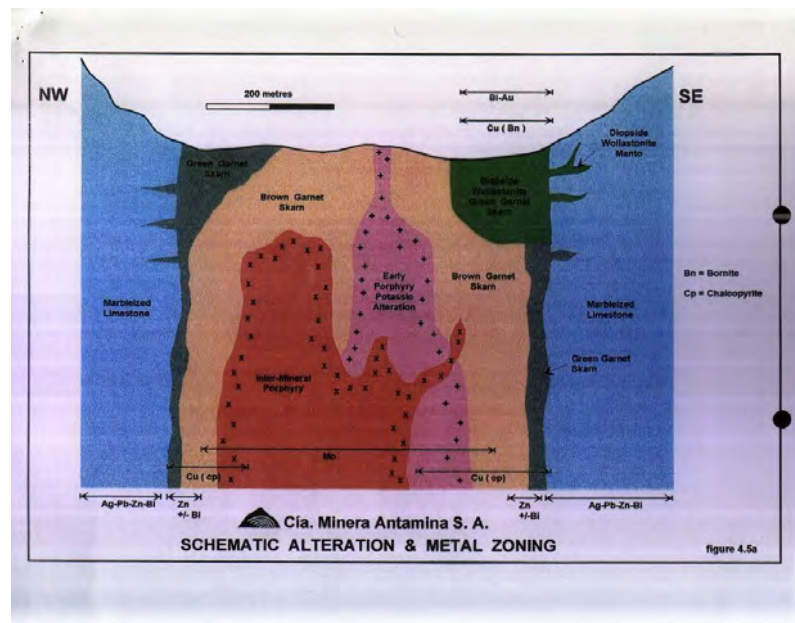
El yacimiento de Antamina es tipo Skarn con mineralización de cobre, zinc, plata y molibdeno principalmente. El endoskarn, caracterizado por la presencia de granate “café”, contiene mineralización principalmente de cobre (calcopirita) y la zona del exoskarn con granate verde es rica en zinc (esfalerita), además de los minerales mencionados se tiene la presencia de plata, bismuto y molibdeno, entre otros dándole cierta complejidad al yacimiento. (Ver figura 8). *Fuente:* [www.antamina.com](http://www.antamina.com)

Las actividades del departamento de geología están relacionadas con el proceso de producción, garantizando el correcto destino de los materiales y optimizar el posible beneficio recuperable antes de los procesos de concentración de mineral, Es decir, Geología proporciona en detalle el grado (leyes) y tonelaje de minerales económicos existentes en el yacimiento y los que corresponden como desmonte.

*Fuente:* [www.antamina.com](http://www.antamina.com)

## Figura 8

*Alteración esquemática y zona de metal*



Fuente: [www.antamina.com](http://www.antamina.com)

### Objetivos del departamento de geología.

- Optimizar la rentabilidad del proceso de minado mediante la determinación de zonas económicas y no económicas.
- Optimizar el planeamiento de minado apoyando en la toma de decisiones concernientes a las campañas de mineral dando a conocer la calidad del mineral a procesar.
- Mantener las características de calidad de mineral a ser procesado por la Planta Concentradora minimizando la variabilidad de leyes, presencia de contaminantes y optimizando la mezcla “blending”.
- Reducir el impacto de las operaciones sobre el Medio Ambiente mediante el monitoreo del material de desmonte.



- Mantener un inventario de material minado, almacenando en stockpiles y enviando a la Concentradora.
- Compilar información que ayude a optimizar el cálculo de recursos y reservas para ampliar el grado de certeza de mineral durante la vida de la Mina.

La complejidad en la mineralización de Antamina ha obligado a implementar una sofisticada metodología para definir la naturaleza del material minado con precisión y confiabilidad.

El trabajo de geología incluye. El Muestreo de blastholes, durante la perforación para la voladura se obtienen conos con detritus que representan el material a ser volado en un banco de 15 metros de altura, el muestreo consiste en tomar una cantidad representativa del material de los detritus de los blastholes, esta muestra es procesada y analizada para obtener los valores de leyes de los metales presentes en el terreno siendo los principales cobre, zinc, plata, molibdeno, bismuto y cobalto, gracias a estos valores se puede determinar el contenido metálico en cada uno de los blastholes, como referencia se puede indicar que en Antamina el valor de una muestra puede ser del orden de US\$ 25,000 a US\$ 150,000 de allí la importancia en la correcta toma de muestra y del cuidado para procesarla.

*Fuente:* [www.antamina.com](http://www.antamina.com)

Determinación de los parámetros económicos. La información de leyes del muestreo es procesada y se llega a determinar el contenido metálico presente en el material volado, gracias a esta estimación se puede simular como si el material haya sido procesado metalúrgicamente, transportado y refinado para su comercialización estando in-situ.

Control de mineral en campo. Los polígonos de minado son monitoreados en el campo mediante señalización usando banderines y estacas de colores de acuerdo con su clasificación y evitar destinar el material inadecuadamente, para optimizar este trabajo se

realiza un constante entrenamiento a los jefes de guardias y operadores de palas, cargadores y camiones, además se recomienda a Operaciones técnicas para optimizar el carguío y se les entrega en cambio de turno un sketch de la situación real de los polígonos en el campo.

En base a la información obtenida por el Departamento de Geología, el Departamento de Ingeniería desarrollara el planeamiento correspondiente.

*Fuente:* [www.antamina.com](http://www.antamina.com)

### **Planta concentradora;**

**Operación de chancado.** El mineral que es transportado por los camiones es llevado y vaciado en la tolva de alimentación de la Chancadora primaria “Dump Pocket” cuya capacidad es de 480 toneladas, cabe mencionar que sobre la tolva de alimentación de la Chancadora hay un Martillo hidráulico para triturar las rocas que no pasan hacia la Chancadora, el motor que acciona a este equipo es de 150 Kw., debajo de la tolva se encuentra la CHANCADORA GIRATORIA de 60” x 89” marca Fuller, es aquí donde se realiza la primera reducción de tamaño de las rocas que contiene el material “mineral”, el producto de esta Chancadora es de un tamaño máximo de 6 pulgadas, los que se depositan en una tolva de transferencia “Surge Pocket” de 480 toneladas de capacidad, desde donde el Apron Feeder 0210-FEA-001 alimenta a la faja 0220-CVB-001 para que esta transporte el mineral ya chancado a una distancia de 2,700 metros, para luego pasar a la faja 0220-CVB-002 del Apilador Radial donde el transporte es de 360 metros más, lo que en total hace un recorrido de 3,060 metros.

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

Durante el recorrido dentro del túnel la faja 0220-CVB-001, está suspendida por cadenas las mismas que están ancladas al techo del túnel, esta faja tiene una capacidad de diseño de 5,800 toneladas / hora, y es accionada por tres motores eléctricos de 1,305 Kw.

La faja del Apilador Radial o Stacker 0220-CVB-002 tiene una altura de 130 metros y puede apilar girando máximo a un ángulo de 60 grados, desde esta faja se pueden formar dos pilas de acopio, donde cada pila contiene 260,000 toneladas de mineral con una capacidad útil de 50,000 tons. Este apilador radial es accionado por un motor de 597 Kw. (Ver figura 9).

### **Figura 9**

*Faja CVB-001, Apilador Radial y Pilas de Almacenamiento de Mineral*



*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

### **Acopio de minerales.**

### **Figura 10**

*Explotación a tajo abierto*



*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

Es un conjunto de rocas que provienen de la mina que en nuestro caso como se observa en la figura 10, es una explotación a Tajo abierto por el alto volumen que se trata, en este conjunto

de rocas se tienen aquellas de valor económico como: calcopirita mineral de cobre, esfalerita mineral de zinc acompañados de molibdenita mineral de molibdeno, bismutinita mineral de bismuto y más adelante se tendrá bornita que es mineral de cobre, además se tiene mineral que no tienen valor económico como la pirita mineral de fierro, calcitas, cuarcita, etc.

La capacidad viva es el tonelaje que los alimentadores de placas pueden extraer del área de acopio sin necesidad de empujar por algún medio el material a los orificios de extracción del alimentador de placas.

Los diferentes tipos de mineral van a ser tratadas por campañas para obtener un buen rendimiento metalúrgico de cada tipo de mineral. La finalidad de cada operación es acabar el stock vivo en cada ruma para empezar con otro tipo de mineral a la siguiente área, cada área o pila de mineral tiene tres alimentadores de placas con motores de velocidad variable, los operadores son los que visualmente y con la ayuda del Cuarto de control dan la velocidad para balancear el tamaño y cantidad de carga que va al SAG ya que por ningún motivo el molino debe estar sin alimentación de carga. (Ver figura 11).

El operador de acuerdo con la granulometría que tenga en cada alimentador de placas indicara la variación de velocidad de alimentación para balancear la alimentación al SAG como se sabe en el acopio para formar las rumas o pilas hay segregación del mineral en la parte externa está la mayoría de mineral grueso y en la parte interna y céntrica el mineral de menor tamaño. (Ver figura 12).

El operador no solo controla la velocidad del alimentador de placas, sino que controla la velocidad de la faja que alimenta al SAG. Esta faja está equipada con una balanza Ramsey que tiene un rango de capacidad de 0 a 6,000 TPH, se tiene un sensor de velocidad que ambas variables determina el peso que se alimenta al SAG por hora, el operador debe controlar el

peso para así ajustar el valor predeterminado para indicar al Cuarto de control si la faja transportadora va a más.

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

### **Figura 11**

*Régimen de alimentación unitario al SAG*

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

### **Figura 12**

*Velocidad para que suministre mayor cantidad de mineral al SAG*



*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

**Mantenimiento y protección del equipo.** Operador y asistente deben realizar las inspecciones con regularidad (cada 2 horas), o según lo indique la supervisión para una alta disponibilidad del equipo. (Ver figura 13).

- Alimentador de placas: Alineamiento del alimentador, que los pernos de sujeción de las placas en buen estado, que las ruedas motrices y de cola en buen estado.
- Faja de alimentación al SAG: está equipada con dispositivos de enclavamiento de tipo faja normal rasgadura debajo de los chutes de descarga del aprom feeder, desplazamiento lateral, detección de chute atorado, pull cord o cordones de emergencia que se deben accionar si se detecta un problema en la faja o problema que atente la seguridad del personal.
- Sensor de velocidad cero para los alimentadores de placas y faja transportadora.
- Sistema de eliminación de polvo
- Ventilación del túnel de extracción.

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

### **Figura 13**

*Trommel del SAG*



*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

**Figura 14***Molino SAG*

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

**Figura 15***Molienda en el molino SAG*

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

**Consideraciones metalúrgicas y operacionales.** El proceso de molienda de mineral está diseñado para reducir el tamaño del mineral chancado en su preparación para el proceso de concentración por flotación selectiva, la parrilla de descarga del SAG tiene 38mm de abertura. (Ver figura 20).

El proceso de molienda consume cantidades extremadamente altas de energía eléctrica, hay cuatro molinos para la molienda: un molino SAG de 38' de diámetro y 19' de largo y la potencia del motor es de 27,000 HP y tres molinos de bolas cada uno de 24' de

diámetro por 36' de largo con un motor de 15,000 HP de potencia. Por las diferentes zonas de mineral, el mineral varía en cuanto a dureza y tamaño cobre solo o cobre zinc, por lo que se va a tratar en campañas y debemos moler a un producto de 80% pasante de 150 micrones ó 100 micrones.

El nivel de carga de bolas en el molino se basa principalmente en el consumo de bolas histórico, si el mineral se pone más duro y/o más abrasivo, aumenta el desgaste de las bolas, si el mineral es más suave, el desgaste de las bolas disminuye, por esta razón el alimentador de bolas se opera periódicamente para alimentar bolas junto con la carga en la faja transportadora que alimenta al SAG.

En la etapa de molienda del molino SAG, se usa un trómel integral equipado con aberturas de 13 mm y un cañón de retorno que cierra el circuito. La carga y las bolas de molienda descargan en el chute de alimentación al molino SAG, en el que se agrega agua de proceso, la lechada de cal y cianuro de sodio (NaCN) se agregan al molino SAG tanto para mineral de cobre-zinc como para cobre solo.

El término molino SAG es el acrónimo de molino de molienda semiautogena, el término de molienda semiautogena significa que toda la acción de molienda es realizada por partículas de mineral que son frotadas entre sí y por la acción de las bolas, si se tratara de molinos totalmente autógenos, no habría bolas de molienda. En los molinos semiautógenos, una parte de la molienda es autógena mientras que la otra es realizada por bolas de molienda, de ahí el término semiautogena. El molino SAG no tiene engranajes (Sistema GEAR LESS) y es accionado por un motor con disipador térmico, enfriado con ventilador, de velocidad y frecuencias variables (un motor de anillo). (Ver figura 14, 15 y 16).

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.



El rotor de este motor está unido al molino, y el estator está construido en un círculo alrededor del molino, la velocidad del molino SAG puede variar, esto regula la acción de catarata (caída) en el molino y proporciona medios para controlar el régimen de molienda. El agua se agrega en el molino SAG en dos puntos: Se agrega al chute de carga y también en el sistema de retorno del trómel de descarga, la adición de agua combinada se realiza en proporción al peso del mineral que está siendo suministrada desde el área de acopio, ello permite obtener la densidad de pulpa deseada (También conocida como porcentaje de sólidos) en el molino.

Después que la pulpa de mineral descarga por las aberturas del trómel cae a una canaleta de descarga y luego pasa al cajón de distribución equipado con dos vertederos ajustables (a la canaleta de alimentación de los molinos 1 y 3), un vertedero fijo (hacia el cajón del molino 2) y tres válvulas dardo. Cada válvula permite que el flujo de pulpa de mineral descargue por gravedad a uno de los tres cajones de bombas a los ciclones.

Se debe revisar rutinariamente los siguientes elementos con el fin de lograr la molienda requerida para la flotación.

- Eficiencia de molienda molino SAG (radio de reducción).
- Carga de bolas en el molino SAG.
- Potencia (molino)
- Estado de revestimiento (elevación)
- Tonelaje de mineral, densidad de pulpa en el molino SAG.
- Avisos y luces de alarma que informa sobre la condición operativa del circuito.

Muestreadores y PSI para asegurarse el tamaño de partícula de molienda sea el adecuado.

Para mantener una buena operación:

- Mantener % de solidos
- Flujo de agua del cañón del trómel del molino SAG (retorno de gruesos).
- Régimen de adición de lechada de cal al chute del molino SAG
- Alimentación de bolas al SAG: 6 – 10% Volumen de bolas.
- Sonido del molino SAG evitar sobrecarga o molino vacío.
- Consumo de potencia
- Velocidad del molino: eficiencia de molienda

La clasificación se da en los nidos de ciclones que reciben la descarga del molino de bolas y el agua usada para el control de densidad impulsadas por las bombas de alimentación a los ciclones, los finos de los ciclones (Over flow) pasan por un sistema de muestreo en su camino hacia el cajón distribución de alimentación al circuito de flotación de cobre y la parte gruesa (Under Flow) retorna al molino de bolas para continuar su molienda.

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

## **Figura 16**

*Molino SAG*



*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

**Sistema de clasificación.** En el circuito de Antamina, se usan ciclones para la clasificación de tamaños, el uso de ciclones es un método de separación por gravedad que no es costoso. El ciclón es un dispositivo que separa el producto mezclado del molino SAG y el molino de bolas en dos partes: el producto terminado que es la parte fina y del grado deseado por mineral a tratar, va por la parte superior del ciclón y la parte gruesa que tiene un tamaño excesivo que es devuelto al molino de bolas para su remolienda, va por la parte inferior del ciclón. (Ver figura 17).

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

En el cajón distribuidor de la descarga del SAG y separada la parte fina menos 13 mm es dividido en tres partes para ser enviadas por canaleta a los cajones de las bombas de alimentación a los ciclones en los cajones de bombas (SUL) se adiciona agua de proceso para mantener un nivel adecuado en los cajones y controlar el tamaño de corte de los ciclones.

Cada cajón de alimentación está equipado con una bomba de tamaño 30" x 28" con un motor de 1,500HP, esta bomba alimenta a un nido de 14 ciclones D-26 que son alimentados por un distribuidor de alimentación común.

Cada bomba de alimentación tiene una válvula de compuerta tipo cuchilla en la tubería de succión (2038, 3038, 4038), las válvulas 3036,3037 de drenajes de descarga y succión de las bombas, se ha adicionado dos válvulas en cada línea 2041 y 2042 para abrir las líneas de descarga cuando se para la bomba.

La válvula 2039 está en la parte superior descarga de los molinos se abre en forma automática para que ingrese agua de proceso y lave la succión de la bomba.

La tubería de descarga de la bomba de alimentación a los ciclones ingresa a un nido de 14 ciclones, el nido está compuesto de ciclones, un distribuidor de alimentación, una canaleta de recolección de finos y una canaleta de recolección de gruesos, normalmente se

trabaja con 12 ciclones y 2 ciclones en stand by, estas trabajan en forma automática para abrir y cerrar las válvulas tipo cuchillas.

La pulpa de gruesos de cada ciclón es recolectada en una canaleta y fluye por gravedad al cajón de alimentación al molino de bolas.

El rebalse o parte final de cada ciclón es recolectada en una canaleta que fluye por gravedad hacia una tubería y luego va a ser muestreada en el muestreador primario luego por el muestreador secundario, todos los remanentes van al cajón distribuidor para alimentar a las líneas de la flotación Rougher de cobre A/B/C.

El analizador de tamaño de partículas proporciona datos sobre el tamaño de partículas y porcentaje de solidos de la pulpa, en nuestro caso se tiene el PSI-200(Outokumpo). (Ver figura 18).

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.com.

### **Figura 17**

*Ciclones para la clasificación de tamaños*



*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

## Figura 18

*Analizador de tamaño de partículas*



*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

Molienda en el molino de bolas. Los molinos de bolas reciben el grueso de los ciclones que se descargan por gravedad, también reciben las bolas que se agregan de 3" o 2 ½" de acuerdo con lo que se necesite potencia del molino, de acuerdo con el tipo de mineral también se agregan lechada de cal, cianuro de sodio, PAX en la canaleta de recolección de gruesos, además se tiene instalados las tuberías de los reactivos sulfato de zinc, para situaciones que el mineral lo requiera.

La descarga del molino de bolas fluye por gravedad hacia el cajón de bombas de alimentación a los ciclones donde se une con la corriente de pulpa del cajón distribuidor del SAG.

El molino de bolas no tiene engranajes y es accionado por un motor con disipador térmico enfriado con ventilador, de velocidad y frecuencia variables (un motor de anillo). El rotor de este motor está unido al molino, y el estator está construido en un círculo alrededor del molino.

Durante la operación del circuito de molienda se debe de tener en cuenta:

- Eficiencia de molienda del molino de bolas, radio de reducción.
- Carga de bolas
- Consumo de potencia
- Caudal de pulpa y densidad de pulpa que ingresa a los ciclones.
- Lazos de control de nivel de los cajones (SUL).
- Avisos y luces de alarmas que informa el estado operacional del circuito.
- Los muestreadores y PSI indican que se alcance el tamaño de partícula de molienda adecuado, revisar línea evitar atoros.

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

### **Diferentes tipos de mineral que van a ser molidos:**

Mantener un nivel de alimentación a los ciclones, si no es así hace que cierre o abre uno o dos ciclones. Mantener el control de presiones en los nidos de los ciclones para tener el tamaño adecuado de partículas: más presión más fina será el rebalse y menos presión más gruesa el rebalse.

Control de alimentación de bolas al molino de bolas: esto significa mantener la carga de bolas adecuada y asegurar una buena eficiencia de molienda. La potencia relacionada con la velocidad del molino, no exceder la velocidad critica de 75%. En base a la potencia se determina si se necesita agregar bolas a los molinos. (Ver figura 19).

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.



**Planta chancadora de Pebbles.** Luego de seis años de operación ininterrumpida, y de acuerdo con su política de mejora continua en los procesos productivos, la empresa inició su proyecto de optimización en la obtención de concentrados construyendo una nueva planta chancadora de Pebble, la construcción de la planta se inició en el 2007 y demandó una inversión de 40 millones de dólares. (Ver figura 21).

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina

Los pebbles (guijarros, trozos o piedras pequeñas en inglés) son el resultado de la molienda del mineral que denominamos M4, que contiene cobre, zinc y bismuto, se trata de un material duro y difícil de ser reducido en tamaño en el molino semi-autógeno (SAG), los pebbles son considerados material redundante, por ello es necesario que la chancadora disminuya el tamaño de los pebbles de tal forma que pueda ser reincorporado al circuito de molienda y así procesarlo nuevamente.

La chancadora es un proyecto de alto impacto para la empresa, con la mejora sustancial del proceso de molienda, la operación recupera parte del material que antes era descartado y obtiene un incremento de un 12% en la producción actual de la molienda.

Con esta nueva chancadora, Antamina se convierte en la primera empresa minera peruana en implementar este tipo de planta, reafirmando su liderazgo en el uso de tecnología moderna para maximizar el valor de sus recursos y ponerlos a la par con procesos de otras importantes operaciones mineras como Collahuasi, El Teniente y Pelambres (Chile), por mencionar sólo algunas.

La incorporación de esta nueva tecnología permitirá a la empresa procesar 516 toneladas por hora de pebble proveniente de la línea número 1 de molienda SAG existente y dejar las provisiones de espacio suficiente para procesar los pebbles de la línea 2 de molienda SAG, cuando se trate de campañas del mineral M4 (cobre-zinc).



El desarrollo del proyecto fue un reto para esta área, ya que fue el inicio de una serie de acciones que Antamina ejecutará como parte de su plan estratégico.

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina

### **Figura 21**

*Chancadora Pebles*

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina

### **Flotación de Cobre y Zinc.**

### **Figura 22**

*Calcopirita*



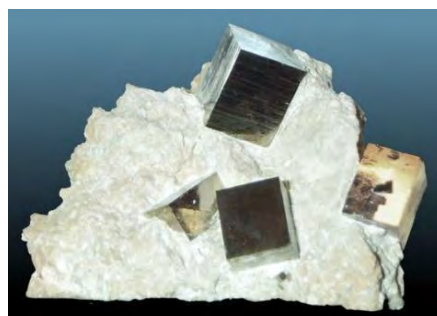
*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

**Figura 23***Bornita*

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina

**Figura 24***Esfalerita*

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina

**Figura 25***Bismuto*

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina

Se han identificado varios tipos de menas en Antamina y se han desarrollado seis esquemas de flotación diferentes para cada uno de ellos. Los tipos de mena contienen variadas cantidades de minerales de cobre (calcopirita y bornita), minerales de zinc (esfalerita), minerales de molibdeno (molibdenita) y también algunos minerales que contienen bismuto y plomo. El bismuto (cosalita, aikinita, y/o bismutinita) es un componente no deseado en el concentrado de cobre. (Ver figuras 22, 23, 24 y 25).

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

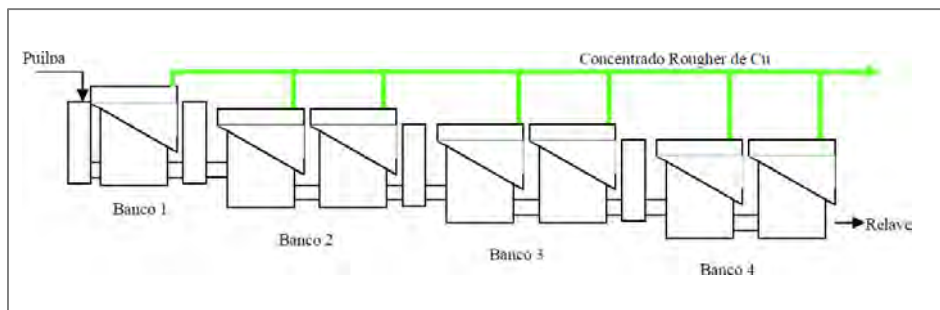
**Circuito de flotación cobre.** El circuito de flotación cobre consta de las siguientes etapas:

- 1.- Flotación Rougher.
- 2.- Remolienda de Concentrado.
- 3.- Flotación Cleaner y Flotación Scavenger.

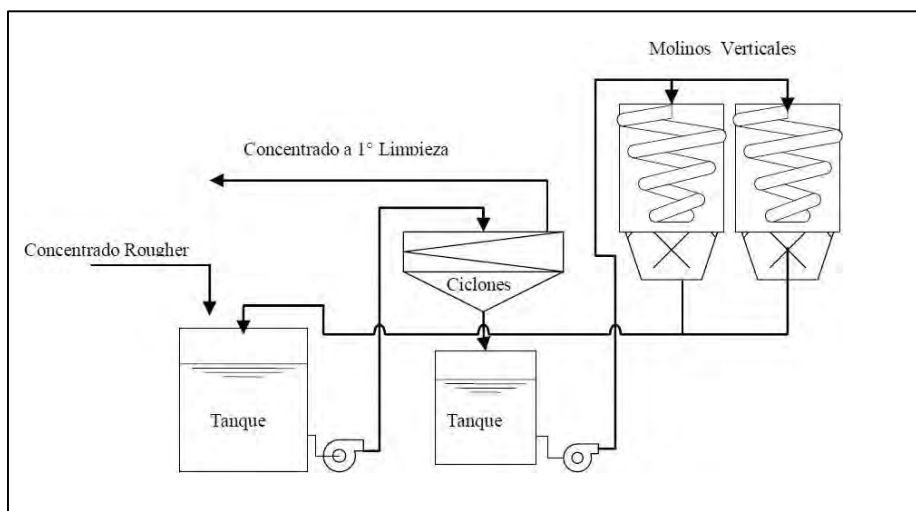
*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

#### **A. Flotación Rougher**

También llamada flotación primaria, consiste en recuperar el cobre contenido en el mineral utilizando celdas de flotación convencional, en la Concentradora se cuenta con tres filas de celdas de flotación convencional de cuatro bancos cada uno dispuestos de la siguiente manera, la primera con una caja de alimentación y una celda convencional y tres con una caja de alimentación y dos celdas de flotación cada una. (Ver figura 26). *Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

**Figura 26****Celdas de flotación convencional**

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

**B. Remolienda****Figura 27***Remolienda*

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

Consiste precisamente en remoler el concentrado rougher de cobre, donde se obtienen como productos al concentrado de rougher de cobre y al relave, este última pasa al circuito de flotación de zinc si el contenido de zinc en el relave así lo permite, el concentrado rougher de cobre contiene partículas de cobre de entre 50 a 150 micrones de tamaño por lo que se hace

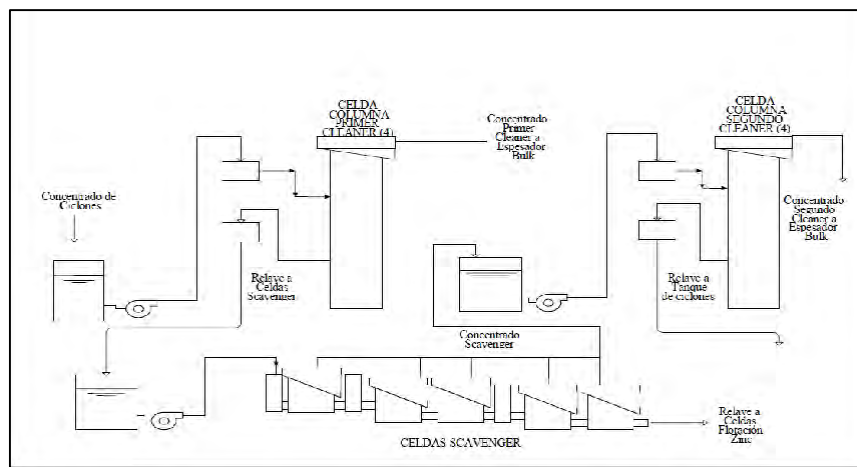
necesario reducir ese tamaño hasta una dimensión menor de 45 micrones con la finalidad de mejorar la recuperación de cobre y realizar un trabajo más eficiente. (Ver figura 27).

Como se observa en la figura 28, el concentrado rougher pasa a un tanque desde el cual es bombeado hacia un sistema de clasificación con ciclones, de esta clasificación el concentrado que ya tiene un tamaño menor a 45 micrones caerá dentro de un tanque para luego ser enviado a las celdas columna de primera limpieza.

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

## Figura 28

### Proceso de Clasificación



*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

### C. Cleaner y flotación Scavenger

En esta etapa se purifica y enriquece el concentrado aún más, para lograr este objetivo, el concentrado rougher clasificado por el nido de ciclones (menores de 45 micrones de diámetro) ingresa a un tanque desde donde es bombeado hacia cuatro celdas columnares de primera limpieza (1er Cleaner), el concentrado que flota pasa como concentrado final al Espesador Bulk, el concentrado scavenger resultante caerá en un tanque y será bombeado a las celdas columnares del segundo cleaner, luego de su paso por las celdas columnares de segundo cleaner, el concentrado de cobre flotará y será transportado hacia el Espesador Bulk,

los relaves de las celdas columnares de segunda limpieza retornarán al tanque de alimentación de los molinos verticales para pasar nuevamente por el circuito explicado.

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

#### **D. Circuito de flotación zinc**

El circuito de flotación de zinc es desarrollado de manera similar al esquema del circuito de flotación de cobre, con la excepción que cada fila de flotación rougher cuenta con una celda adicional (celda de acondicionamiento) y cada etapa de limpieza cuenta con una columna de flotación adicional

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina

#### **E. Circuito de flotación molibdeno - bismuto**

Se divide en las siguientes etapas:

##### **Circuito de flotación modo molibdeno:**

Espesamiento y almacenamiento de concentrado Bulk. - la carga para este proceso proviene del circuito de flotación de cobre y fluye hacia el espesador de concentrado Bulk. El concentrado bulk a 60% de sólidos se bombea al tanque de almacenamiento de bajo bismuto.

Flotación Rougher. - Consta de 12 celdas Outokumpu OK-16, los cuales son alimentados por el concentrado del tanque acondicionador y el concentrado producido se envía a remolienda, las colas rougher constituyen el concentrado final de cobre.

Remolienda de Concentrados. - Recibe el concentrado proveniente de las celdas de flotación rougher. Consiste en un molino vertical, que trabaja cerrando el circuito con un nido de ciclones. El rebose del ciclón constituye la alimentación para la Primera Limpieza.

Flotación Cleaner. - Consta de tres etapas de limpieza usando celdas columna, que trabajan en cascada. Obteniendo un concentrado final de 50% de Molibdeno aproximadamente.

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

### **Circuito de flotación modo bismuto:**

Espesamiento y Almacenamiento de Concentrado Bulk.- Que proviene del circuito de flotación de cobre y va hacia el espesador de concentrado bulk, el concentrado bulk a 60% de sólidos se bombea al tanque de almacenamiento de alto bismuto.

Flotación Rougher. - Que consta de 12 celdas convencionales Outokumpu OK-16, los cuales son alimentados por el concentrado del tanque acondicionador, el concentrado producido se envía a la etapa de limpieza. Las colas rougher constituyen el concentrado final de cobre.

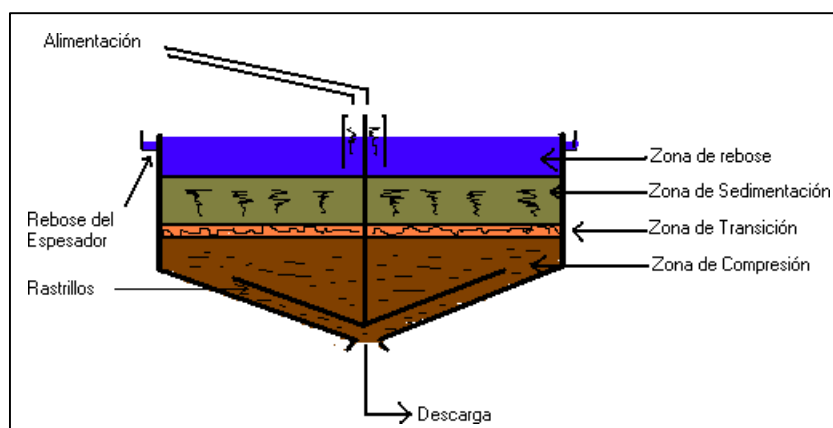
Flotación Cleaner. - Consta de tres etapas de limpieza usando celdas columna, estas trabajan en cascada. Obteniendo un concentrado final mayor a 50% de Plomo

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

### **Espesamiento.**

#### **Figura 29**

*Espesador*



*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

La separación Sólido – Líquido, consiste en la eliminación de agua de los concentrados de cobre y zinc producidos, el espesamiento ocurre por sedimentación de las partículas. En esta etapa se producen lodos de 60 a 65% de sólidos y simultáneamente líquido con un grado de turbidez apreciable. (Ver figura 29).

El proceso de sedimentación se realiza en espesadores, estos son recipientes de forma cilíndrica con fondo en forma de cónica con un ángulo de inclinación grande, se pueden distinguir las siguientes zonas:

**Zona de Rebose.** - En esta fase se tiene agua clara con mínima cantidad de sólidos que fluyen hacia la parte superior y rebosa por los bordes del espesador.

**Zona de Sedimentación.** - Es el lugar donde la pulpa de concentrado ingresa para su sedimentación propiamente dicha, se caracteriza porque el porcentaje de sólidos es igual, al porcentaje de sólidos de la alimentación

**Zona de Transición.** - Este es un estado intermedio en la cual la pulpa de concentrado está en una etapa de transición entre la sedimentación libre de obstáculos y la compresión.

**Zona de Compresión.** - Denominada así porque los sólidos eliminan parte del agua por compresión, de las partículas que fuerzan al líquido salir de los intersticios del lodo espesado

**Mineroducto.** El mineroducto tiene una longitud de 302 Km, se inicia en la estación de bombas en la mina y termina en la estación terminal de Huarney, el mineroducto es una tubería de acero de alta resistencia con un revestimiento interior de polietileno de alta densidad (HDPE) para proteger la tubería contra la abrasión y la corrosión. El diseño hidráulico del mineroducto requiere bombeo desde la estación inicial del circuito hasta la parte más alta del recorrido, desde donde el flujo de la línea continuara su camino por



gravedad, hasta su punto final de llegada en el Puerto. (Ver figura 30). Fuente: Manual de Operaciones Antamina

El mineroducto cuenta con estaciones de monitoreo de presión, en donde se registrarán condiciones intermedias dentro de la tubería durante su largo recorrido, adicionalmente se cuenta con estaciones de válvulas intermedias que se usan para dividir la cabeza estática y eliminar el exceso de cabeza durante la operación.

Se cuenta con un sistema de transmisión de información del comportamiento de la línea, por medio de la fibra óptica a lo largo de toda la tubería.

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

### **Figura 30**

*Mineroducto*



*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

**Operaciones Puerto.** (Ver figura 31) En Puerto la llegada del concentrado es monitoreada por un sistema, el cual indica el tiempo de aproximación del concentrado a las instalaciones del puerto, aquí se cuenta con un densímetro en línea el que va tomando los sólidos de la estela (mezcla de agua y sólidos) avisando que el concentrado está llegando a su destino en puerto.

Advertidos de la llegada la carga es recepcionada en un cajón distribuidor el cual deriva la carga de concentrado al cajón distribuidor de cobre o de zinc, para el concentrado de cobre el cajón puede ser derivado al clarificador o al tanque de almacenamiento de cobre, de igual forma sucede con el de zinc se puede derivar o bien al clarificador de zinc o al tanque de almacenamiento de zinc.

Los tanques de almacenamiento de cobre o de zinc pueden ser derivados al tanque de alimentación de los filtros (4 filtros) tipo prensa marca LAROX de 18 placas cada una, las cuales filtran el concentrado separando el sólido del líquido, para una alimentación inicial de 60% de sólidos se llega a obtener el queque con una humedad de 8%.

La torta transferida por fajas y luego por medio de un tripper se almacena el concentrado, para los diferentes tipos de concentrados que se obtienen del cobre y sus variantes con alto y bajo bismuto y las variantes del zinc, seguidamente de este almacén por medio de cargadores frontales se alimentan a unos sistemas de fajas móviles donde se tiene también un muestreador en línea, además de una balanza que se encargará de pesar el concentrado que será enviado al barco. Al final del sistema de fajas se tiene el equipo sofisticado llamado Shiploader (cargador de barcos), el cual se encarga de colocar todo el concentrado dentro del buque.

El agua extraída por los filtros es colectada y enviada al tanque de agua filtrada, el cual por medio de bombeo envía el agua a los clarificadores de cobre y zinc, los

clarificadores deben tener los sólidos en un valor de 60%, se enviará el producto a los tanques de almacenamiento para su posterior tratamiento en la planta de efluentes.

*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

### **Figura 31**

*Operaciones de Puerto*



*Fuente:* Manual de Operaciones Antamina.

## Capítulo II

### Metalurgia del depósito de Antamina

La mineralogía del depósito de Antamina es simple en textura, i.e. de grano relativamente grueso, pero compleja en variabilidad. Antamina es quizás, el depósito polimetálico más grande en el mundo. Deben considerarse los siguientes metales: Cu, Zn, Bi/Pb, y Mo. Muy pocos depósitos en el mundo requieren considerar 4 metales en su Diagrama de Flujo. Es el número de metales y la variedad de combinaciones lo que hará que la metalurgia sea un desafío. Como se observa en la tabla 1, el depósito ha sido dividido en 5 tipos de mena principales.

**Tabla 1**

*Descripción del tipo de mineral*

Código	Tipo de mineral- descripción
M1	Cobre- bajo Bismuto
M2	Cobre- alto Bismuto
M4B	Cobre- Zinc- Bismuto
M5	Bornita- bajo Zinc
M6	Bornita- alto Zinc

*Fuente:* Estudio de Factibilidad, Lakefield Research 2000.

### Penalizaciones y créditos en elementos menores

Como muchos depósitos en el mundo, Antamina recibirá penalidades y créditos de elementos menores de los concentrados producidos todas las pruebas de ciclo cerrado y muchas de las operaciones en planta piloto presentaron sus concentrados para un análisis de

concentrado detallado, es bien entendido para Antamina la penalidad de Bi y el crédito de plata para el concentrado de Cu en Antamina, pero otros elementos tales como As en el concentrado de Cu y Co en el concentrado de Zn también serán considerados.

*Fuente:* Estudio de Factibilidad, Lakefield Research 2000.

### ***Concentrado De Cu***

El Bismuto es un problema importante para el Depósito de Antamina, el Bismuto es tal vez uno de los peores elementos menores en un concentrado de Cu porque es difícil de remover durante el proceso de fundición y pequeñas cantidades de Bi en el cátodo Cu hacen quebradizo al Cu, la solución dado por Antamina para al problema del Bi es operar un circuito de separación que removerá la mayor parte de Bi del concentrado de Cu y consecuentemente cuando todo el concentrado de Cu esté mezclado junto, es muy probable que no existan penalidades para contenido de Bi.

El Pb también podría haber sido un problema para Antamina de cuando en cuando, pero el circuito de separación es también muy efectivo en remover el Pb del concentrado de Cu.

El Arsénico también puede ser un elemento de penalidad de cuando en cuando, el nivel de As promedio en los concentrados de Cu probablemente permanecerá por debajo del nivel de penalidad común de 1000 g/Tm, pero las muestras de concentrado individual han llegado a un nivel de 2.7% de As. El principal conductor de As en los concentrados de Cu es la tennantita, un mineral sulfosal Cu-As. la respuesta de flotación de este mineral es muy buena e invariablemente reportará al concentrado de Cu, la mena contiene algo de arsenopirita, pero esto generalmente reporta a los relaves, Los niveles más altos de As han sido encontrados en la zona de Bornita.

La plata y el oro serán créditos de elementos menores en el concentrado de Cu, el concentrado de Cu usualmente ensayará 250 g/Tm de Ag. El Oro sólo ocasionalmente llegará a ser un crédito, típicamente el concentrado de Cu ensayará  $< 1$  g/Tm de Au y consecuentemente se esperará muy poco retorno. Ocasionalmente el contenido de Au ha sido de 5 g/Tm Au, y usualmente en concentrados de Bornita, No se esperan otros elementos menores que otorguen créditos o penalidades para los concentrados de Cu en Antamina.

*Fuente:* Estudio de Factibilidad, Lakefield Research 2000.

### ***Concentrado Zn***

Los concentrados Zn en Antamina tendrán en alguna ocasión niveles elevados de Co ( $>300$  g/Tm), el Co ha sido encontrado presente en la esfalerita.

Elevados niveles de Co aparecen más comúnmente en las menas CuZn con elevado Bi, basados en la información de Lakefield Research.

El nivel de Cd en los concentrados de Antamina está también alto, pero nuevamente este elemento se encuentra en la celosía de la esfalerita.

No se espera que otros elementos menores produzcan créditos o penalidades para los concentrados de Cu en Antamina.

*Fuente:* Estudio de Factibilidad, Lakefield Research 2000.

### **Metalurgia del circuito de cobre**

La metalurgia del Cobre es generalmente muy común en la industria, el circuito ha sido configurado como si siempre estuviera manejando una mena CuZn con moderada pirita, el Zinc (como la esfalerita) es tal vez el principal problema metalúrgico en el circuito de cobre, con la pirita en segundo lugar, el bismuto y Moly son los mayores problemas desde

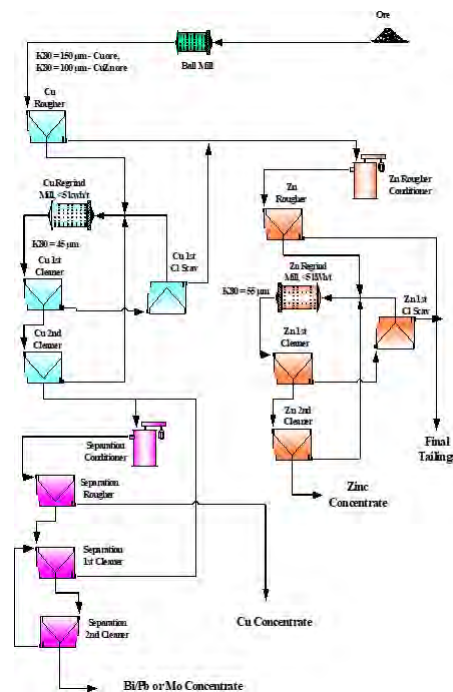
una perspectiva metalúrgica total pero son sólo problemas menores desde una perspectiva del circuito de cobre, ellos tienen poca influencia en cómo se opera el circuito de cobre.

La metalurgia estándar del Cu añade cal al circuito de molienda a un pH de 10.0 para flotación Rougher de Cu, también se añade una pequeña dosis de NaCN (comúnmente 25 g/Tm) para ayudar en la depresión de Zn y pirita, el PAX (xantato amílico) es el colector de rougher, es un colector muy fuerte, todo el concentrado de rougher se envía al molino de remolienda para remoler con más cal y NaCN, el Colector PAX es el colector requerido para asistir a la flotación Cu en limpieza, dos etapas de limpieza a un pH de 11 son suficientes para producir un concentrado de alto grado (30% Cu). La molienda para menas de sólo Cu es 80% pasando 100 en malla, la molienda para menas de CuZn es 80% pasando 150 en malla, el objetivo de remolienda es 80% pasando 40 a 50  $\mu\text{m}$ , (Ver figura 32)

*Fuente:* Estudio de Factibilidad, Lakefield Research 2000.

### Figura 32

*Procesamiento de menas de Antamina*



*Fuente:* Estudio de Factibilidad, Lakefield Research 2000.

### ***Efecto del pH y la cal en la flotación cobre***

Un pH de 10.0 es ideal para la flotación rougher de Cu, este pH es suficientemente alto para deprimir la pirita adecuadamente sin tener ningún efecto depresor en el Cu, este pH es típico para la mayoría de menas Cu y existe una fuerte base electroquímica para este nivel de pH, si el pH es muy bajo <9.6 la pirita va a flotar fácilmente y va a perturbar el circuito Cu y también podría perturbar el circuito de Zn, si el pH es muy alto > 10.4 la flotación de Cu se volverá lenta y pueden esperarse altos relaves, un pH más alto puede también incrementar la flotación de Zn en el concentrado rougher, la dosis común de cal ha sido 500 g/Tm en molienda primaria y 250 g/Tm en la remolienda.

En cleaner se usa un pH de 11, este pH es ajustado para el rechazo de la pirita más que para cualquier otra cosa, si el rechazo de la pirita es un problema sería beneficioso aumentar el pH en cleaner por encima de 11.0. El control de cal y/o pH es una de las variables más importantes para controlar la flotación en las menas en Antamina.

*Fuente:* Estudio de Factibilidad, Lakefield Research 2000.

### ***Efecto del cianuro en la flotación cobre***

El NaCN se agrega como depresor tanto para la esfalerita como para la pirita, uno de los mecanismos más importantes de la depresión por NaCN es la complejación de cualquier ion de Cu en solución, el NaCN reacciona fácilmente con el Cu para formar complejos de  $\text{Cu}(\text{CN})^{2-4}$ , el cual previene que el Cu active la esfalerita, el NaCN también se usa típicamente para la depresión de sulfato de Fe (pirita, pirrotita).

En las menas más simples de Cu es posible que el NaCN tenga poco efecto en los resultados metalúrgicos. Las dosis comunes han sido 25 g/Tm en molienda primaria y 5 g/Tm en remolienda, la excepción a esta dosis de NaCN es para menas CuZn oxidadas las cuales serán explicadas más adelante.

*Fuente:* Estudio de Factibilidad, Lakefield Research 2000.



### ***Efecto del colector PAX***

PAX (xantato amílico de potasio) es el colector primario para ambos circuitos, de Cu y Zn, el PAX es el más fuerte de los xantatos comercialmente disponibles y ha sido seleccionado por encima del colector 3418 en el circuito de Cu debido a su fortaleza, este se requiere primariamente para las menas de Cu sólo ya que se encontró que el colector 3418 no era capaz de flotar la calcopirita gruesa liberada de estas menas, mientras que el PAX fue exitoso, el PAX es generalmente menos selectivo del colector 3418, pero no hubo una mayor pérdida en la selectividad Cu-Zn usando PAX vs 3418 al procesar las menas de CuZn.

El dosaje del PAX es dependiente de la ley de cabeza tanto para el circuito de Cu como el de Zn, si las cabezas son más altas, se requiere de más colector, una regla simple que usar como guía en el rougher Cu es:

$$\text{g/Tm PAX} = 15 + 10 \text{ g/Tm} / \% \text{ Cu}$$

El uso del Xantato, en comparación a la mayoría de otros colectores, usualmente facilita la operación de los circuitos de separación subsecuentes.

*Fuente:* Estudio de Factibilidad, Lakefield Research 2000.

### ***Efecto de la pirita en la alimentación al molino***

El contenido de la Pirita en la mena variará desde casi nada hasta un muy alto nivel de pirita en la mena, la receta estándar de pH 10.0 con cal y NaCN es adecuada para manejar todos los niveles de pirita en la mena mientras más alto sea el contenido de pirita, será más importante mantener el pH a 10.0 en los roughers, un bajo pH llega a ser un problema serio para menas con alta pirita se puede esperar que la dosis de cal sea más alta con menas de alta pirita ya que la pirita consumirá algo de la cal durante la molienda, esto es normal.

### ***Efecto del Moly en la alimentación del molino (Figura 33)***

Los niveles cambiantes de Zn en la alimentación del molino probablemente influirán más que nada en la metalurgia del circuito de Cu, las menas más simples de Cu no tienen Zn y por lo tanto el circuito puede ser flotado muy agresivamente para la recuperación de Cu, si la alimentación del molino contiene Zn entonces el circuito no puede ser operado tan agresivamente porque la contaminación de Zn llega a ser demasiado alta en el concentrado final, una vez que la ley de cabeza de Zn sube por encima de 0.3%, el circuito de Cu debe ser operado como si la mena fuera una mena CuZn, al margen de si se opere el circuito de Zn o no, se espera que la recuperación de Cobre sea 3% menos para menas CuZn, hay dos razones para esto, el circuito de cobre no puede ser flotado tan agresivamente porque la contaminación de zinc llega a ser demasiado alta en el concentrado de cobre y existen algunas texturas mineralógicas Cu-Zn difíciles (la enfermedad de la calcopirita que es esencialmente puntitos de calcopirita en la esfalerita), el cual tiende a reportar al circuito de zinc en vez del circuito de cobre mientras más alto sea el Zn en la alimentación se espera que sea más alta la contaminación de zinc en el concentrado de cobre, Las menas más difíciles de procesar son aquellas que tienen ley de cabezas similares de Cu y Zn, las menas con este tipo de alimentación deben ser operadas muy bien ya que cambios muy pequeños como 2% en la recuperación de cobre probablemente empujaran fuera de especificación al concentrado de Cu o al concentrado de Zn debido a una alta contaminación cruzada, leyes de cabeza más altas de Zn tolerarán que más cobre vaya al circuito de Zn mientras que altas leyes de cabeza de Cu tolerarán más Zn en el concentrado de Cu, a leyes de cabeza similares de Cu-Zn existe muy poco espacio para maniobrar en la recuperación de Cu y tienen que cumplir estrechamente con las metas, también debe indicarse que se ha observado que cualquier muestra de mena CuZn con muy bajo contenido de pirita puede ser propenso a activar la flotación de esfalerita en el circuito de Cu, no existe otra explicación para esto excepto que

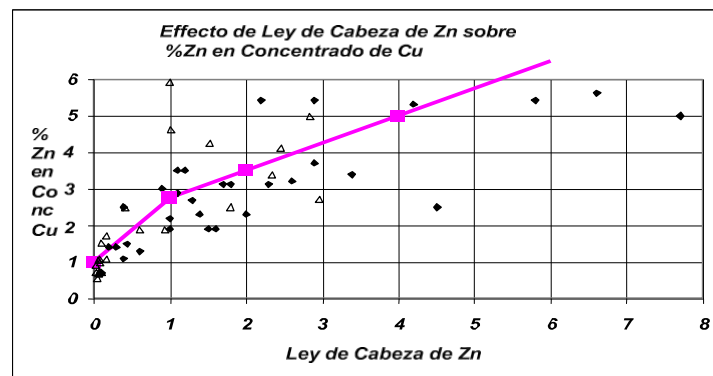
parece ser verdad, el ejemplo clásico de esto son las menas CuZn de la zona de Bornita estas menas invariablemente requieren el esquema de reactivos  $ZnSO_4/NaCN$  para controlar la flotación de Zn en el circuito de Cu, este paquete de reactivos será discutido ampliamente en la sección de menas oxidadas.

*Fuente:* Estudio de Factibilidad, Lakefield Research 2000.

Finalmente, el Zn llega a ser muy problemático cuando la mena se vuelve aun ligeramente oxidada. Esto será discutido en la sección de menas oxidadas. Por lo tanto, las cabezas variables de Zn en la mena tendrán posiblemente el mayor impacto en la metalurgia general el mayor reto para los operadores y metalurgistas será el ser capaz de responder apropiada y rápidamente a la mena.

### Figura 33

*Efecto de la Cabeza de Zn en la Contaminación del Concentrado de Cu*



*Fuente:* Estudio de Factibilidad, Lakefield Research 2000.

### *Efecto del Pb y Bi en la alimentación al molino*

En la mayor parte el Pb y Bi tienen poco efecto directo en la metalurgia del circuito de Cu porque los niveles son muy bajos,  $>0.01\%$  en la alimentación, el Pb y el Bi generalmente flotan moderadamente bien en el concentrado de Cu y por eso es la necesidad del circuito de separación para remover estas impurezas del concentrado final, el problema verdadero con el Pb y el Bi está en el circuito de separación, el cual será discutido más

adelante. Se ha encontrado en otros proyectos que el colector 3418 hace un lazo fuerte con la galena, el cual entonces llega a ser muy difícil deprimir.

*Fuente:* Estudio de Factibilidad, Lakefield Research 2000.

### ***Efecto de Moly en la alimentación del molino***

Generalmente el Moly tiene poco efecto en el circuito de Cu, salvo que, para una recuperación exitosa de Moly debe añadirse fuel oíl, se requieren pequeñas dosis en la molienda primaria y remolienda para una recuperación exitosa de Moly, las dosis deben ser minimizadas porque el fuel oíl tiene un efecto negativo en la selectividad de todo el circuito Cu. Se añadió una dosis de 25 g/Tm en la molienda primaria, y se añadió 3 g/Tm a la remolienda y el cleaner Scavenger. Como al Bi y Pb, el Moly se convierte en un problema en el circuito de separación, donde es removida del concentrado de Cu como un concentrado de Moly, vendible como un subproducto. Generalmente, el 75% de los valores de Moly se encuentran en el 25% de la mena. En ocasiones, las cabezas de Moly serán muy altas, > 0.1% Mo.

*Fuente:* Estudio de Factibilidad, Lakefield Research 2000.

### ***Efecto De La Oxidación De La Mena***

Pueden notarse dos efectos principales en una mena oxidada:

La recuperación es más baja porque la recuperación de Cu no-sulfatado es muy pobre y si hay Zn en la mena entonces la selectividad será difícil.

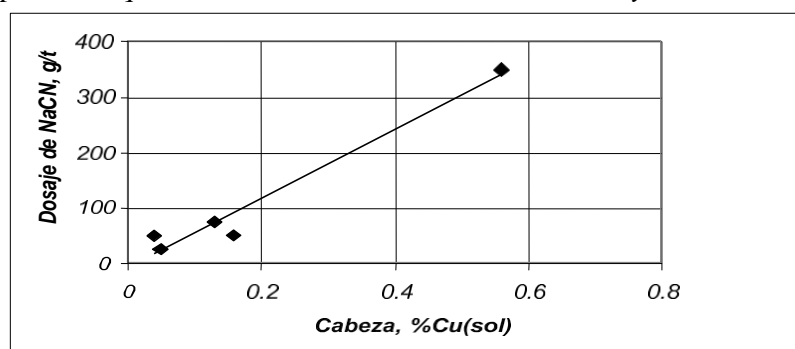
Se espera que Antamina tenga el enfoque que no se recuperará el Cu no-sulfatado, el ensayo de cabeza de Cusol es un buen indicador del grado de oxidación en la muestra, por lo tanto si la ley de cabeza de Cu para una mena oxidada es 1% Cu y el contenido de Cusol es 0.5%, entonces debe esperarse una recuperación del 50% Cu para la muestra, es posible

recuperar algo de los minerales Cu oxidados (mayormente malaquita – carbonato de Cu hidratado), pero los niveles relativamente bajos y el alto costo del reactivo inhibe que esto sea práctico. Cuando se introduce Zn en la matriz de la mena oxidada la metalurgia se convierte en un reto, en las menas oxidadas, algunos minerales están empezando a descomponer y como consecuencia están liberando iones de metal en la mena, los iones de Cu son rápidamente cogidos por la esfalerita y por lo tanto parte de la esfalerita puede estar pre-activada aún antes que la mena sea extraída, Se ha observado en algunas pruebas que la esfalerita pre-activada flota aún mejor que los minerales sulfuros de Cu, por esta circunstancia se requiere un esquema distinto de reactivo,  $ZnSO_4 + NaCN$  a un pH neutral, en este esquema de reactivos se añade el NaCN para complejar a los iones de Cu que estén libres en solución, el  $ZnSO_4$  es efectivo a un pH neutral porque forma un precipitado  $ZnSO_4$  básico en la esfalerita, el cual evita su flotación, el precipitado  $ZnSO_4$  básico es estable sólo en un pH de 6.5 a 8.2 por lo tanto la necesidad de un pH neutral. Se encontró que la dosis de NaCN es dependiente del ensayo del CuSol de la muestra, la dosis de  $ZnSO_4$  es fija para el tamaño de molienda específico, a 450 g/Tm de la sal hepta-hidratada, o 300 g/Tm de sal monohidratada deben añadirse ambos reactivos al molino SAG para obtener el mayor efecto. (Ver figura 34).

*Fuente:* Estudio de Factibilidad, Lakefield Research 2000.

### Figura 34

*Dosis de NaCN para el esquema reactivo  $ZnSO_4$ , Basado en el Ensayo de Cabeza de CuSol.*



*Fuente:* Estudio de Factibilidad, Lakefield Research 2000.

## **Metalurgia del circuito de zinc**

La Metalurgia del circuito Zn es muy típica de la industria, cal + CuSO<sub>4</sub>, la metalurgia del circuito de Zn es generalmente muy buena y normalmente no existen problemas importantes más que la variación en las cabezas Zn.

La alimentación al circuito Zn es el combinado de los relaves del rougher de Cu y del Cleaner Scavenger, estas corrientes están condicionadas con cal y CuSO<sub>4</sub> a un pH de 11.0, la dosis de la cal para obtener un pH 11.0 es bastante baja porque el circuito de Cu ya se opera a un pH de 10 a 11, la dosis de CuSO<sub>4</sub> depende de las cabezas y se ha desarrollado una muy buena relación para Antamina para predecir la dosis CuSO<sub>4</sub>, Xantato es el colector y un concentrado de Zn rougher es flotado. El concentrado rougher es remolido con una pequeña cantidad de cal y CuSO<sub>4</sub> antes de cleaner, a pH 11.5 para producir un concentrado > 55% Zn, son adecuadas dos etapas de cleaner, el relave del Zn rougher y el relave cleaner scavenger se combinan en un relave final para su eliminación en la laguna de relaves. El objetivo de remolienda de Zn es 80% pasando 50 – 60 µm una de las cuestiones más interesantes en Antamina será reconocer el color de la espuma en el circuito de Zinc, el contenido de hierro en la esfalerita en Antamina es altamente variable desde ~0% a 10% Fe, el efecto de esto es cambiar el color desde casi plata, amarillo pálido /crema a anaranjado, rosado, rojo y finalmente a rojo oscuro, esto también tiene un efecto en cuál será la calidad de concentrado final, se espera que el grado de concentrado varíe de 52% Zn hasta 62% Zn, con un promedio de ~ 57% Zn.

*Fuente:* Estudio de Factibilidad, Lakefield Research 2000.

### ***Efecto de la cal y el pH***

La Cal es un reactivo importante en el circuito de Zn, para controlar los sulfitos de Hierro, los pHs son típicos para un circuito de flotación de Zn, pH 11.0 en rougher y pH 11.5

en cleaner, no deben haber mayores necesidades de ajustar este pH, la dosis común en rougher es 500 g/Tm una dosis mayor a 1000 g/Tm sugiere que existe un problema, la dosis común en remolienda está situada entre 300 g/Tm y 500 g/Tm dependiendo de las cabezas de Zn, un pH más alto tenderá a hacer lenta la flotación de Zn y posiblemente hacer aguada la espuma, muy rara vez un pH más alto puede ser beneficioso en la cleaner pero esto es más un signo de desproporción de reactivos en los roughers que un problema en cleaner.

*Fuente:* Estudio de Factibilidad, Lakefield Research 2000.

### ***Efecto del sulfato de cobre***

Generalmente si la dosis de  $\text{CuSO}_4$  es correcta el circuito de Zn es uno de los circuitos de flotación más fáciles de operar, se requiere del  $\text{CuSO}_4$  para activar la esfalerita para flotación, el mecanismo es un intercambio de iones en la superficie de la esfalerita, el Cu adhiriendo a la esfalerita mientras que el Zn es sacado, Efectivamente la esfalerita obtiene un forro de Cu en su superficie y por lo tanto flota como los minerales de Cu, el reto es añadir suficiente  $\text{CuSO}_4$  para activar la esfalerita pero no demasiado, que puede empezar a activar otros minerales como la pirita, la dosis puede ser calculada simplemente de la fórmula siguiente;

$$\text{g/Tm CuSO}_4 = 125 + 40 \times \% \text{ Zn en cabeza (para la sal Pentahidratada)}$$

Por ejemplo, una cabeza de Zn de 2% requerirá 200 g/Tm de  $\text{CuSO}_4$  ( $125+40 \times 2=205$ ).

Esta fórmula es correcta para la molienda de la mena de CuZn típica de Antamina, de 80% pasando 80 a 100  $\mu\text{m}$ . Si la molienda es engrosada, entonces la dosis será reducida, mientras que una molienda más fina requiere más  $\text{CuSO}_4$ .

Los síntomas de un dosaje incorrecto de  $\text{CuSO}_4$  son:

- La esfalerita gruesa no flota si el dosaje es ligeramente insuficiente.
- Espuma muy pesada, pero luce rica en esfalerita si existe una sobredosis.

- Es muy difícil limpiar debido a la activación de la pirita.

Como regla general, es más seguro sobre dosificar ligeramente el  $\text{CuSO}_4$ , que estar sub-dosificado, Debemos mencionar que la pirrotita es un consumidor de  $\text{CuSO}_4$  y debe ser contabilizado si existen cantidades apreciables en la mena, la asignación general es 15 g/Tm para cada % de pirrotita en la mena, el depósito en Antamina tiene pirrotita muy ocasionalmente y por ello generalmente puede ser ignorado.

*Fuente:* Estudio de Factibilidad, Lakefield Research 2000.

### ***Efecto del cobre***

El Cobre en el circuito de Zn tiene un efecto negativo en la metalurgia, el problema mayor está en llegar el grado de concentrado, las condiciones en el circuito de Zn son similares a aquellas en el circuito de cobre (como deben ser desde que activamos la esfalerita con  $\text{CuSO}_4$ ) y por lo tanto cualquier Cu que aparece en los cleaners de Zn invariablemente reportará al concentrado de Zn, la calcopirita es el principal mineral de Cu en Antamina, si el % de Cu en el concentrado de Zn sube en 1% Cu, se debe esperar una reducción en el grado de concentrado de Zn del 2%, una pequeña cantidad de Cu en la espuma de Zn también cambia dramáticamente el color de la espuma y desde allí el circuito ya no es nunca más diagnosticado fácilmente por el ojo.

Generalmente el Cu en el circuito Zn sólo será un problema en menas con  $\text{Cu}:\text{Zn}>1$ , en estas menas una pequeña pérdida en la recuperación de Cu del circuito de Cu puede ser suficiente para perturbar significativamente el circuito Zn, una regla aproximada para las menas de Antamina es que la cantidad de recuperación de Cu tolerada en el concentrado de Zn es similar al valor de cabeza de Zn, por ejemplo, para una mena de cabeza de Zn de 1%, puede tolerarse una recuperación de Cu del 1% en el concentrado Zn, por lo tanto si se espera



un 94% de recuperación de Cu en el circuito Cu, pero sólo se logra un 92%, es probable que una recuperación extra del 2% de Cu reportara al concentrado de Zn, el resultado final es que se producirá un concentrado de Zn significativamente contaminado, el cual puede no ser vendible si no es mezclado con concentrados buenos, la producción de buenos concentrados de Zn de cabezas de Zn menores a 0.6% será difícil debido al efecto de Cu.

*Fuente:* Estudio de Factibilidad, Lakefield Research 2000.

### **Metalurgia del circuito de separación**

El circuito de separación es un componente clave en el molino de Antamina, el circuito es esencial para reducir el contenido de Bi1 en el concentrado de Cu sino gran parte del concentrado de Cu producido en Antamina no sería vendible, la remoción del Bi también tiene un efecto secundario. beneficioso, al remover Pb del concentrado, el circuito de separación también será usado para recuperar el Moly del concentrado de Cu.

Generalmente, cuando existen altos niveles de Moly en la mena, los niveles de Pb y Bi son muy bajos, y viceversa, sólo muy ocasionalmente la mena contiene elevados niveles naturales de Bi y Moly, en cuyo caso el circuito de separación es operado en modo de remoción Bi y tanto el Bi y Moly son removidos del concentrado de Cu final.

El Bi es una impureza particularmente problemática en el concentrado Cu. Pequeñas cantidades (~ ppm) de Bi en el cátodo Cu hace al Cu quebradizo y no satisface la prueba de estiramiento, esto o bien reduce el valor del cátodo, o lo hace no vendible, el Bi es también muy difícil de remover durante las etapas de fundición y refinamiento, por lo tanto, el Bi es una de las peores impurezas en los concentrados de Cu.

---

La química básica del circuito de separación es similar para operación en modo Bismuto o en modo Moly, la depresión de Cu con un agente reductor, en modo Bi, el depresor es NaCN, en modo Moly el depresor es NaSH.

*Fuente:* Estudio de Factibilidad, Lakefield Research 2000.

### ***Separación del bismuto***

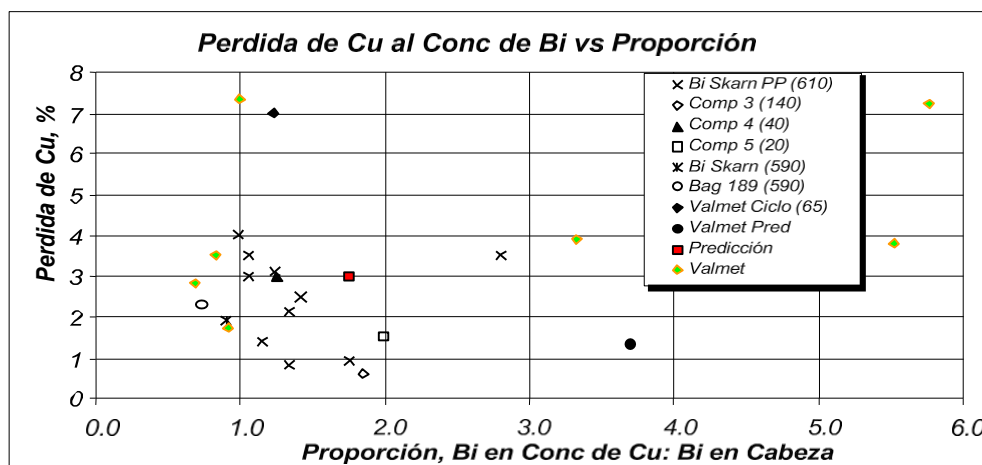
La técnica de separación de Bi fue adaptada de una técnica de separación Cu-Pb, fue postulado debido a que el Bi está a continuación del Pb en la tabla periódica, los minerales de Bi podrían comportarse en forma similar a la galena, la primera demostración de la técnica fue en realidad una separación de Pb, una mena CuZnBi alta en Pb, el objetivo fue remover el Pb del concentrado de Cu, después del hecho, se notó que tenía un alto nivel de Bi en el concentrado de Cu y sólo entonces se llevó a cabo el estudio de prueba de separación del Pb original para la conducta de Bi, como arte de magia, el Bi siguió al Pb y así se desarrolló un proceso, el proceso ya ha sido sometido a prueba en todas las menas con contenido de Bi aplicables y se ha encontrado que funciona muy bien en todos salvo en las muestras de la zona de Bornita. La mineralogía del bismuto en Antamina es bastante compleja y variable, los minerales de bismuto identificados en el depósito de Antamina ya se encuentran definidos como son la bismutinita ( $\text{Bi}_2\text{S}_3$ ), cosalita ( $\text{Pb}_2\text{Bi}_2\text{S}_5$ ) y aikinita ( $\text{CuPbBiS}_3$ ), se encontró que todos los minerales se separan favorablemente, la mineralogía de la Bornita llega a ser mayor en la familias de wittichenita y emplecita ( $\text{Cu}_3\text{BiS}_3$ ,  $\text{CuBiS}_2$ ), estos minerales generalmente están íntimamente asociados con los minerales Cu y tienen poca oportunidad de liberarse de los minerales Cu, han habido muy pocos granos liberados de wittichenita y emplecita observados y por lo tanto su respuesta en el circuito de separación es desconocido.

Se usa un esquema de depresión por NaCN para la separación de minerales de Bi del concentrado de Cu, se añade el NaCN hasta que se deprime el Cu, esto puede ser medido mediante el redox de la pulpa, cuando el redox está por debajo  $-200$  mv los minerales Cu se

deprimen, una pequeña dosis de carbón pulverizado es usualmente beneficioso para controlar la textura de la espuma, la cual puede ser muy espumosa debido al alto Na del NaCN, se añade Xantato si el circuito debe ser “jalado” para hacer flotar a los minerales Bi (Ver figura 35). Se debe mencionar que al airear la pulpa (i.e. incrementando el redox) usualmente revive la flotación de Cu, tal que se sugiere una etapa de adición de NaCN en el banco de roughers, se limpia dos veces el concentrado de rougher a fin de producir un concentrado de Pb+Bi con valores mínimos de Cu, se requerirá la adición por etapas de NaCN y posiblemente carbón a lo largo de los cleaners para controlar la flotación de Cu y la textura de la espuma, debe notarse que muchos minerales Ag discretos reportarán al concentrado Bi+Pb, el color de la espuma en el circuito puede ser un indicador razonable del su desempeño, el color de la calcopirita es verde mientras que muchos de los minerales de Bi tienden a ser de color plateado. Noten que los minerales como la bismutinita tienen un color crema pálido similares a la pirita en muchos aspectos.

Si existe Moly en la mena, también flotará bien en el circuito de separación en modo Bi, el esquema NaCN era una técnica de separación de Moly temprana, la cual ahora ha sido reemplazada por el esquema más común NaSH, si el concentrado de Bi tiene un contenido significativo de Moly, es posible separar el Moly del Bi al añadir NaSH. el NaSH deprime eficientemente el Bi y el Moly continúa flotando.

*Fuente:* Estudio de Factibilidad, Lakefield Research 2000.

**Figura 35***Perdida de Cu*

*Fuente:* Estudio de Factibilidad, Lakefield Research 2000.

### **Separación del Moly**

La separación del Moly sigue el procedimiento estándar, el que la industria prefiere, NaSH y gas de nitrógeno para flotación del Moly del Cu, el mecanismo para la depresión del Cu es el mismo que para la separación del Bi, añadir un agente reductor para reducir el redox a un nivel donde el Cu no flote. El gas de nitrógeno se usa para minimizar la adición de NaSH, si se usa aire como gas de flotación, entonces el NaSH reacciona con el oxígeno y no está disponible para reducir el redox. (Nota: se requiere aire para una separación exitosa de Bi, por favor no intentar la separación de Bi con nitrógeno), se añade CO<sub>2</sub> para controlar la textura de la espuma a través de la modificación del pH. Si el pH es muy bajo (<pH 8) se liberará H<sub>2</sub>S, el Moly es por naturaleza hidrófobo y se requerirá usualmente un poco de fuel oíl para ayudar a la flotación, el Moly flota mejor cuando se le mantiene tan grueso como posible.

*Fuente:* Estudio de Factibilidad, Lakefield Research 2000.

## Capítulo III

### Investigaciones metalúrgicas

#### 3.1. Efecto del cianuro de sodio y pH en la flotación Rougher cobre

##### *Introducción*

El uso del Cianuro de Sodio en Planta tiene un efecto importante en la depresión del Zinc y Fierro principalmente en minerales Cu/Zn, sin embargo, en ocasiones el exceso de este reactivo puede tener un efecto depresor en las especies de Cobre que queremos recuperar asimismo el incremento de colectores y espumantes. Actualmente debido a las características de los minerales Cu/Mo que presentan altos contenidos de Fierro y Zinc en algunos casos el uso del Cianuro de Sodio se hace necesario para controlar el desplazamiento de estas especies, pero no sabemos hasta qué punto puede ser favorable en la flotación sin afectar la calidad y recuperación del Cobre.

##### *Objetivo.*

Evaluar el efecto del Cianuro de Sodio y pH en el grado y recuperación del Cobre con mineral M1.

##### *Plan de evaluación.*

Los materiales para las pruebas de flotación consta de 1 celda de flotación de 2.5L, micropipetas, molino de rodillos y molino de bolas de 12"X12", con una pulpa al 28% de sólidos, los reactivos usados se muestran en la tabla 2, se usó el software minitab 15 para el análisis estadístico.

El mineral para evaluar fue tomado de la Faja #4 en condiciones de operación en las que el consumo de Cianuro de Sodio estaba en valores mayores a 15g/Tm, principalmente por niveles altos de Fe > 15%, para esta evaluación se realizaron pruebas preliminares para tener una línea base de consumo de reactivos y tiempo de flotación, posteriormente se hizo un DOE de 2x2 con 1 punto central, variando la dosificación de NaCN de 5 a 15 g/Tm y pH 10.2 a 10.8, manteniendo constante las dosis de espumante, el consumo de PAX fue acuerdo

al requerimiento de la espuma y dosis de Cianuro, la prueba se realizó a condiciones estándares de laboratorio.

El criterio para iniciar con una dosis mínima de Cianuro de Sodio fue el hecho de poder controlar la activación de Fierro con pH y ver la influencia del exceso de Cianuro en la recuperación y consumo de PAX.

### **Resultados metalúrgicos de las pruebas**

**Tabla 2**

*Flotación Rougher de cobre variando en NaCN y la Cal*

CABEZA DE FLOTACION											R	
Mineral	Cu %	Pb%	Zn%	%Fe	Bi <sub>ppm</sub>	Ag	As <sub>ppm</sub>	Mo%	%CuOx		ZnCO <sub>3</sub>	
									xCN	xAc		
Faja N° 4 - M1	1.99	0.04	0.31	15.77	2	16.00	102	0.028	0.1	0		

Mineral M1								C	
Prueba	(g/tn)						pH	C	
	NaCN	SO <sub>4</sub> Zn	Fuel Oil	Cal (g)	PAX	F582			
1	5	50	10	0.65	10	7	10.21		
2	5	50	10	1.1	10	7			
3	15	50	10	0.65	15				
4	15	50	10	1.1	1				
5	5	50	10	0.65					
6	5	50	10						
7	15	50							
8	15								
9									

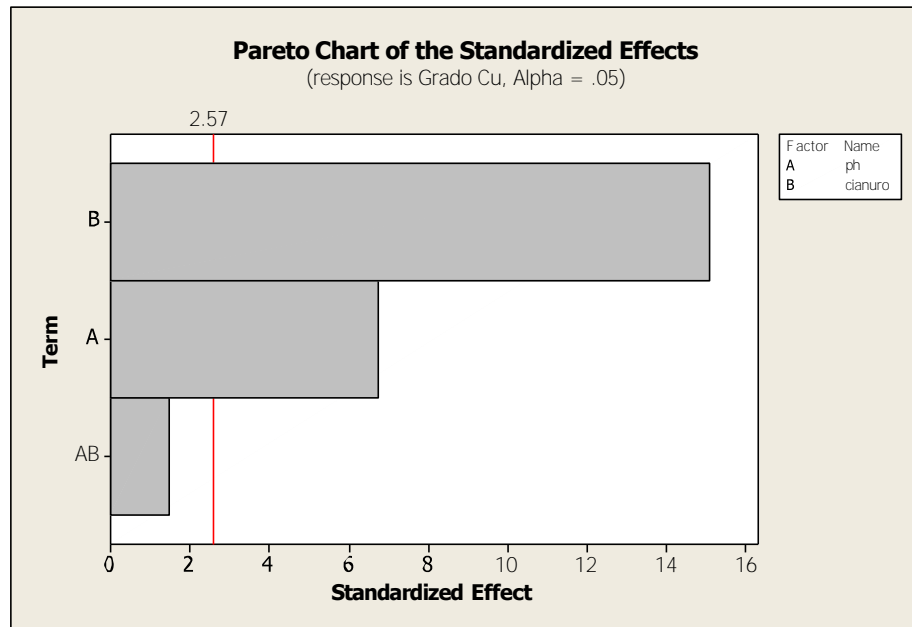
*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

Se realizaron un diseño experimental DOE 2x2 con 1 punto central, para diferentes pruebas de flotación (Ver tabla 2), teniendo como variables más importantes el NaCN y la cal, el resumen se detalla a continuación:

De acuerdo con el Pareto analizado se tiene el mayor efecto de ambas variables de NaCN y pH en el grado del Cobre en forma individual y no como combinación. (Ver figura 36).

**Figura 36**

*Influencia del NaCN y pH sobre el grado de Cu (Conc. Rougher de Cu)*

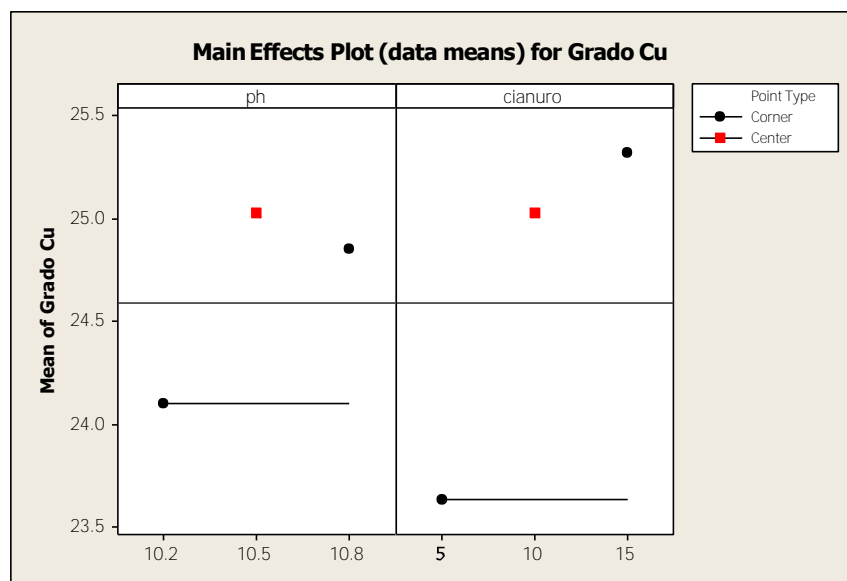


*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

En la figura 37 se observa que la mayor influencia en el grado de Cobre es para valores altos de pH y cianuro.

**Figura 37**

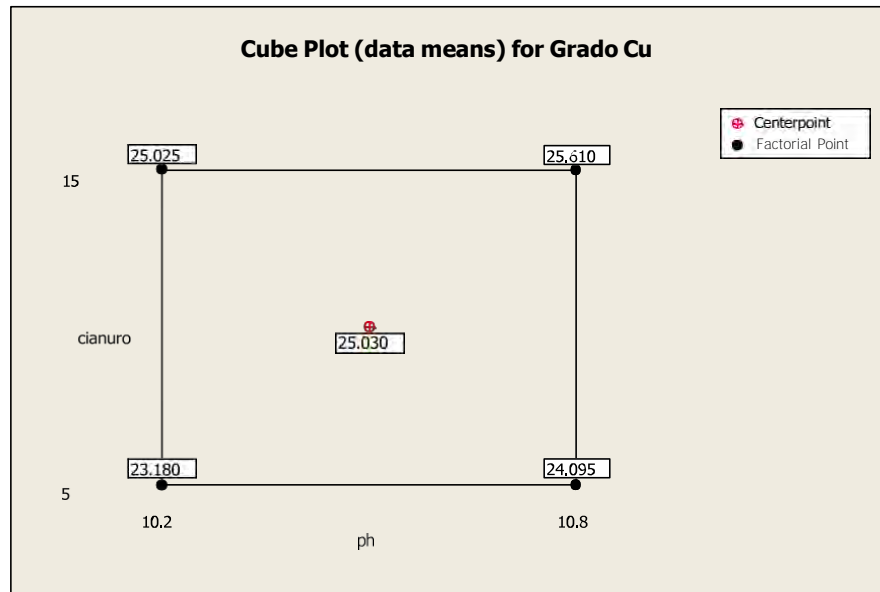
*Influencia del grado de Cu*



*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

**Figura 38**

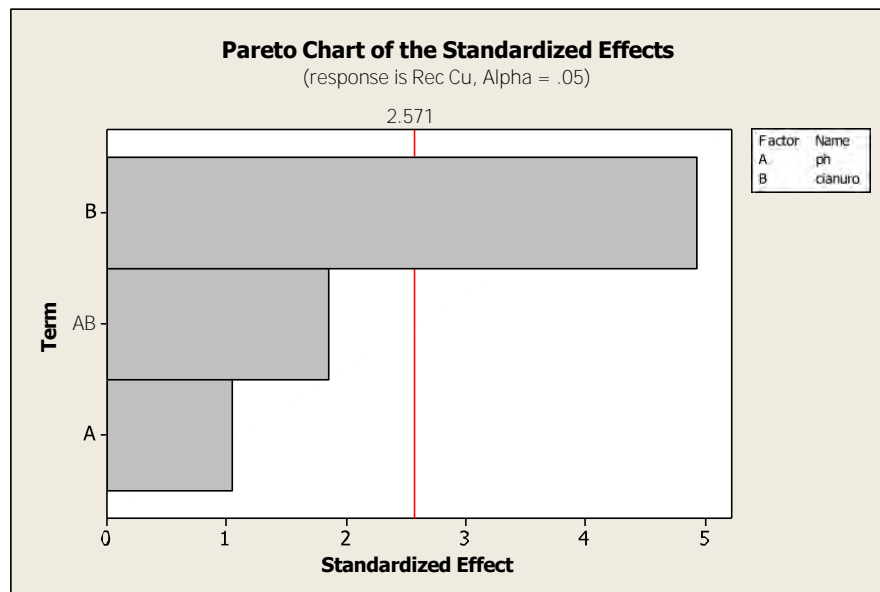
*Influencia del NaCN y pH en la Recuperación de Cu (Conc. Rougher de Cu)*



*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

**Figura 39**

*Diagrama de Pareto de los efectos estandarizados*



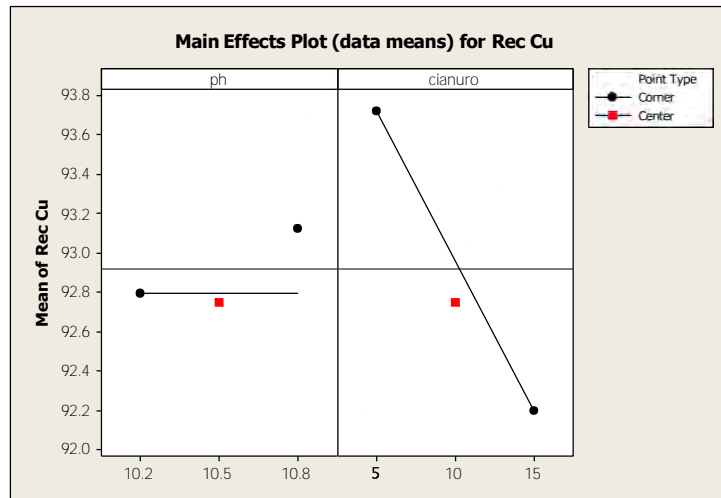
*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)



En la fig. 40 se observa que el mayor efecto en la recuperación del Cu, es la variable del cianuro a bajas dosificaciones de 5 g/Tm

### Figura 40

Diagrama de efectos principales de recuperación del Cu

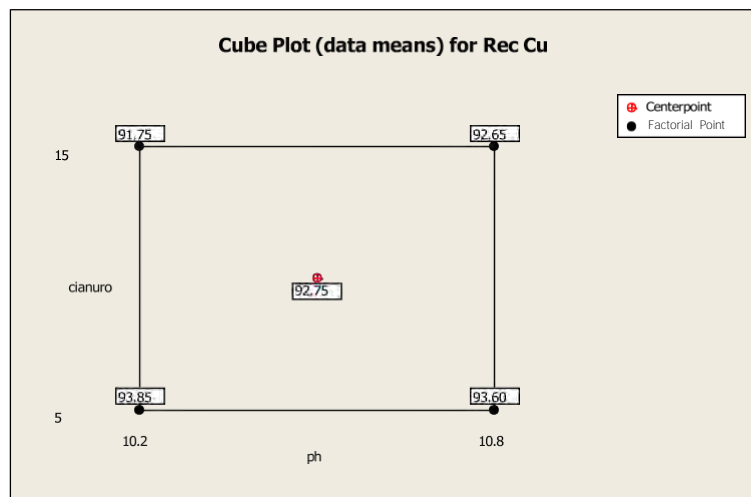


Fuente: (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

La mejor recuperación del Cu se da para condiciones de 5 g/Tm de cianuro y pH de 10.2, ver Fig. 41

### Figura 41

Diagrama de cubo de recuperación de Cu



Fuente: (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

## *Conclusiones*

- En las pruebas preliminares, antes del DOE 2X2 con 1 punto central, se pudo concluir que, para este mineral, el no usar Cianuro de Sodio incrementa considerablemente el contenido de Hierro en el concentrado Rougher lo que se pudo observar visualmente, por lo tanto, esto perjudicaría la calidad del concentrado.
- De las dos variables evaluadas, el cianuro de Sodio es el que presenta mayor influencia en el grado y recuperación del Cobre ver fig. 37 y 40.
- El pH tiene una influencia en el grado de Cu sin embargo no tiene influencia en la Recuperación (ver fig. 37 y 40).
- El uso del Cianuro de Sodio en exceso (15 g/Tm) tiene una influencia en la mejora del grado de Cu por disminución del grado de hierro, asimismo ligera disminución del desplazamiento de Zinc, sin embargo, se tiene también una disminución considerable en la recuperación de Cu (ver Fig. 37).
- Con un consumo de Cianuro de Sodio de 5 g/Tm y pH aprox. 10.2, se tuvo resultados en el grado de Cu menores comparado con el uso de 15 g/Tm de Cianuro, sin embargo, las recuperaciones fueron mayores, pero al incrementar el pH a 10.8 se pudo compensar este efecto logrando incrementar el grado de Cu. Cabe mencionar que en operaciones normales de Planta no necesariamente requerimos llegar a un grado Cu > 25% en el Rougher para alcanzar calidades altas en el concentrado bulk.
- El uso de dosificaciones altas de Cianuro de Sodio perjudica la recuperación de Cu, el grado de Cu puede controlarse hasta cierto punto con incremento de pH.
- No necesitamos llegar a grados muy altos en Rougher puesto que en la etapa de limpieza podemos controlar los desplazamientos de hierro.

- El uso de altas dosis de Cianuro de Sodio en la flotación implica también el incremento de consumo de colector y espumante y por lo tanto mayor costo en estos 3 reactivos (ver Tabla 2)

Por lo tanto en la flotación rougher de minerales Cu/Mo en el que tengamos altos niveles de hierro y en los que el Zinc no sea considerable como para tener valores  $> 3\%$  en el concentrado bulk, debemos trabajar a dosis bajas de Cianuro de Sodio e ir incrementando este reactivo gradualmente si el grado se perjudica por efecto del hierro (no es necesario trabajar con altas dosis de cianuro), asimismo podemos incrementar el pH para contrarrestar el efecto del hierro pero sin tener que alcanzar grados muy elevados ya que es una flotación rougher.

### 3.2. Evaluación metalúrgica para disminuir el consumo de sulfato de zinc y cal

#### *Introducción*

La dosificación de sulfato de zinc, así como los rangos de pH en la flotación rougher de cobre, actualmente se manejan de acuerdo con el criterio del mineral y supuestos en la operación, y con este informe se pretende esclarecer un el efecto del ZnSO<sub>4</sub> y Cal con estos tipos de mineral y definir los rangos en los que a evaluación en planta se podría operar y posible reducción de los consumos de ambos reactivos y no sobrepasar del presupuesto.

#### *Objetivo.*

Evaluar la posibilidad de reducir el consumo del sulfato de zinc y cal alcanzado en este trimestre en minerales de M4A sin perjudicar la metalurgia del Cobre y Zinc.

#### *Procedimientos*

Pruebas de flotación para disminuir consumo de sulfato de zinc. - Los materiales para las pruebas de flotación conta de 1 celda de flotación de 2.5L, micropipetas, molino de rodillos y molino de bolas de 12”X12”, con una pulpa al 28% de sólidos, los reactivos usados se muestran en la tabla 3, se usó el software minitab 15 para el análisis estadístico

**Tabla 3**

*Flotación Rougher de cobre variando la dosificación de ZnSO<sub>4</sub>*

TEST	g/Tm					pH	FLOTACION ROUGHER DE COBRE					
	ZnSO <sub>4</sub>	NaCN	PAX	F-582	GRADOS%			RECUPERACIONES %				
					Cu		Zn	Fe	Cu	Zn	Fe	
1	0	20	8	10	10	13.9	8.3	17.3	81.4	16.4	7.3	
2	50	20	8	10	10	13.7	7.1	16.7	81.3	14.3	7.1	
3	100	20	8	10	10	13.9	7.0	17.0	81.4	13.9	7.1	
4	150	20	8	10	10	14.7	6.9	17.3	80.3	12.9	6.7	
5	200	20	8	10	10	14.9	6.8	17.6	80.5	12.9	7.1	
6	250	20	8	10	10	14.8	6.6	17.4	80.5	12.3	6.9	

*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina).

Se realizaron pruebas de flotación rougher de Cu (con dos repeticiones) variando la dosificación sulfato de zinc 0, 50, 100, 150, 200 y 250, g/Tm de mineral, la prueba se realizó

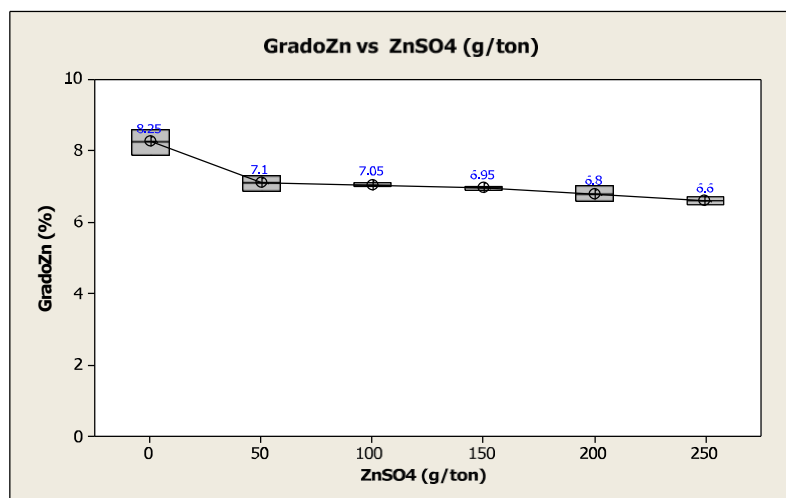
a condiciones estándar de laboratorio, para estas pruebas se usó mineral M4A de dos campañas: 18 de febrero, campaña 2009-10-M4A-02 polígono SP4174-M4A-C4/N9 (fase 3) + banco 4193 Campaña 2009-10-M4A-02 polígono SP4174-M4A-C4/N9 (fase 3) + banco 4193

La muestra evaluada reporta una cabeza Cu 0.85%, Zn 2.49% y Fe 11.1%.

Como se observa en los resultados, no se tiene diferencia estadística significativa en el desplazamiento del zinc en el cobre para dosificaciones entre 50 y 250 g/Tm de sulfato de zinc además que los grados y recuperaciones de cobre no se ven afectados significativamente (ver figuras 42, 43 y 44).

## Figura 42

*% de desplazamiento de zinc en concentrado Rougher de cobre*



*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina).

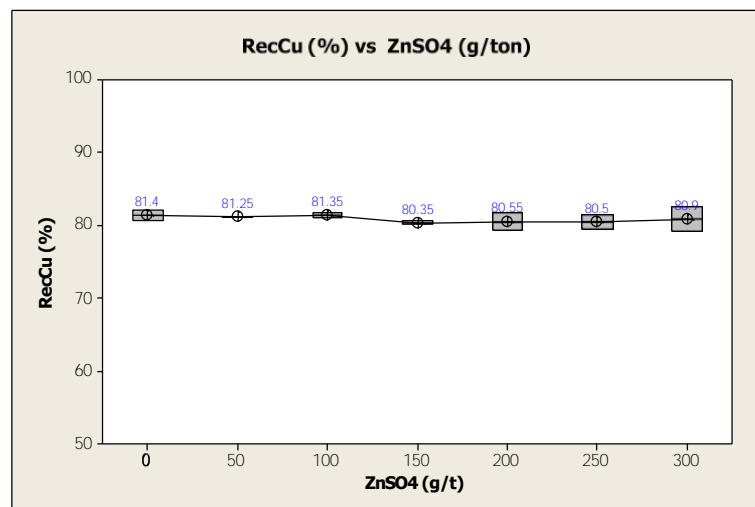
**Figura 43**

*%Grado de Cu Vs ZnSO<sub>4</sub> (g/Tm)*

*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

**Figura 44**

*%Recuperación de Cu Vs ZnO<sub>4</sub> (gr/ton)*



*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

- **Influencia de la reducción del consumo de sulfato de zinc en el ahorro de costos**

De acuerdo con los resultados de las pruebas realizadas, la reducción del consumo de sulfato de zinc en 100 g/Tm significaría un ahorro de 136 toneladas de sulfato de zinc por mes (considerando el procesamiento de mineral M4A un promedio de 15 días por mes), lo cual representa un ahorro aprox. de \$US 1,300,000 (ver tabla 4).

**Tabla 4**

*Reducción del consumo de sulfato de zinc en el ahorro de costos*

Campaña de mineral	Reducción dosificación ZnSO <sub>4</sub>	Ahorro ZnSO <sub>4</sub> g/Tm	Ahorro ZnSO <sub>4</sub> Tm/mes	Ahorro ZnSO <sub>4</sub> Tm/año	Ahorro ZnSO <sub>4</sub> \$ US/año
2009-10-M4A-02	200 a 100 g/Tm	100	136	1627	1,317,886

**Precio de Reactivos**

Reactivo	Precio S/Kg
ZnSO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O	0.81
Cal	0.18

*Fuente:* Laboratorio metalúrgico, 2014.

- **Reducción del consumo de cal por efecto de la reducción del sulfato de zinc**

Una de las características del sulfato de zinc es la acidez que tiene en solución y esto tiene influencia en el pH de la pulpa de mineral en la flotación rougher de cobre, por lo tanto, al disminuir su consumo sulfato de zinc también podemos reducir el consumo de cal para alcanzar un pH determinado.

Se hicieron pruebas de flotación rougher cobre; para ello en la etapa de molienda se acondicionó la pulpa con iguales cantidades de cal hasta obtener un pH aprox. de 9.5, para las diferentes dosificaciones de sulfato de zinc (entre 100 y 200 g/Tm); luego en la etapa de flotación se adiciona cal hasta alcanzar un pH de 10.4, registrando el consumo de cal para cada caso, de esta manera se determinó la diferencia de consumos de cal.

La reducción del consumo de sulfato de zinc de 200 a 100 g/Tm, representaría un ahorro de 129 toneladas de cal por mes (considerando el procesamiento de mineral M4A un promedio de 15 días por mes), para un tonelaje de 90400 tmspd, esto representa un ahorro considerable de \$183 000/ año en promedio (ver tabla 5).

**Tabla 5**

*Efecto de la reducción del sulfato de zinc en el ahorro del consume de cal en mineral M4A*

Campaña de mineral	Reducción dosificación ZnSO <sub>4</sub>	Ahorro de cal por			
		efecto de la reducción de consumo de ZnSO <sub>4</sub> Kg/Tm	Ahorro de cal Tm/mes	Ahorro de cal Tm/año	Ahorro de cal \$US/año
2009-10-M4A-02	de 200 a 100 g/Tm	0.075	102	1220	219.892
2009-17-M4A-03	de 200 a 100 g/Tm	0.05	68	814	146.595

*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

### ***Pruebas de flotación para disminuir el consumo de cal por efecto del pH***

Se realizaron pruebas de flotación Rougher de cobre a condiciones estándar de laboratorio, para ello se varió el pH 9.5, 9.8, 10.1, 10.4, 10.7 y 11.0; las demás variables se mantuvieron constantes, la evaluación se realizó en las mismas campañas anteriormente mencionadas.

Campaña 2009-17-M4A-03 polígono SP4174-M4A-S10/C4 (fase 4 y fase 3)+ banco 4193.

La muestra evaluada reporta una cabeza Cu 1.09%, Zn 3.68% y Fe 11.1%.



**Tabla 6**

*Efecto del pH en la flotación Rougher de cobre*

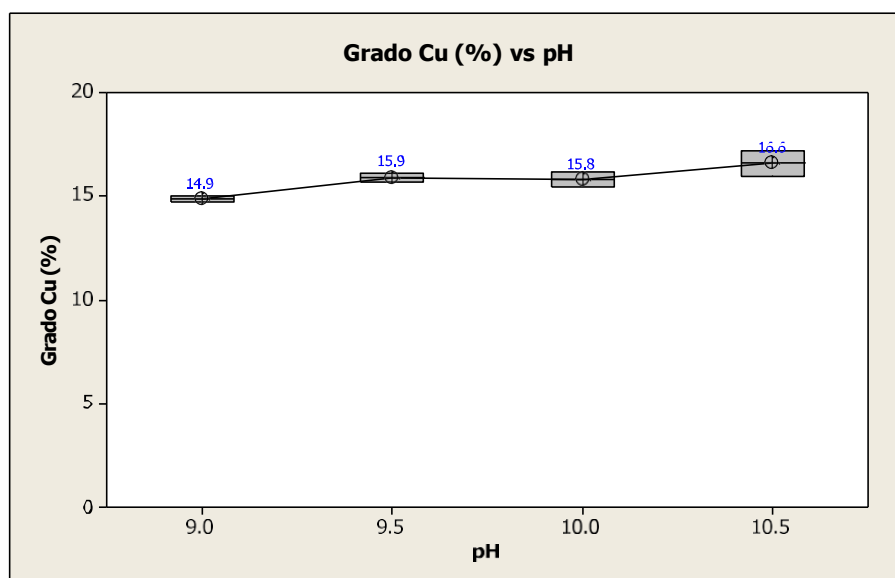
TEST	(gr/ tn)				pH	FLOTACION ROUGHER DE COBRE					
	ZnSO4	NaCN	PAX	F-582		GRADOS%			RECUPERACIONES %		
						Cu	Zn	Fe	Cu	Zn	Fe
4	100	20	15	10	9.0	14.9	6.5	16.6	65.7	8.5	7.2
3	100	20	15	10	9.5	15.9	6.2	17.4	66.9	7.7	7.0
2	100	20	15	10	10.0	15.8	6.6	17.5	69.4	8.4	7.5
1	100	20	15	10	10.5	16.6	6.7	17.6	71.0	8.3	7.1

*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 6, no se observa una diferencia estadística significativa respecto al grado y recuperación de cobre cuando se varía el pH de 10 a 10.5, lo mismo ocurre con los desplazamientos de zinc (ver tablas 45 y 46)

**Figura 45**

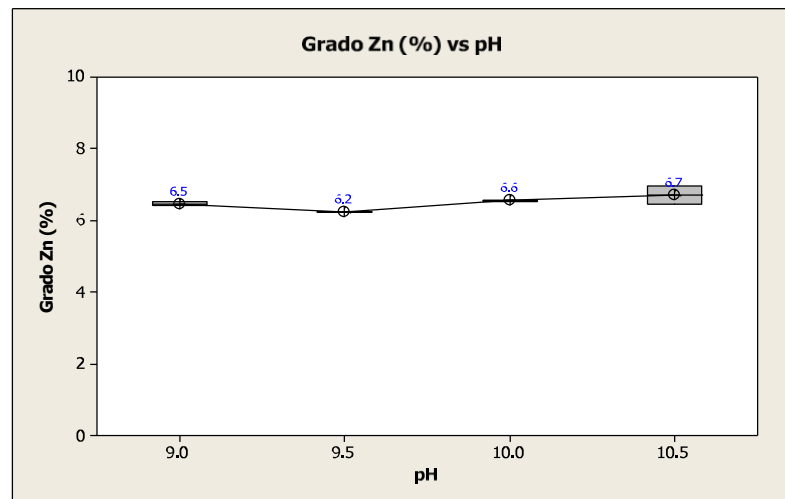
*Grado de cobre en concentrado Rougher de cobre vs. Variación de pH.*



*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

**Figura 46**

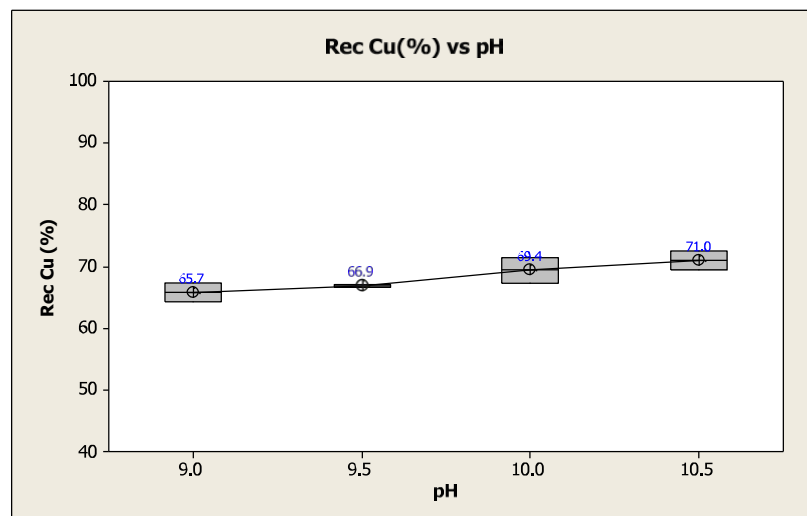
*Desplazamiento de zinc en concentrado Rougher de cobre vs. variación de pH*



*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

**Figura 47**

*Recuperación de cobre en concentrado Rougher de cobre vs. variación de pH*



*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

- **Efecto del pH en la reducción del consumo de cal y ahorro de costos**

De acuerdo con las pruebas realizadas y viendo que por efecto del pH la metalurgia no se ve afectada, al bajar el pH de 10.4 a 10.0 en la flotación rougher de cobre; tiene un ahorro significativo de cal de 132 toneladas por mes, esto representa un ahorro de \$260,000/año en promedio. (ver tabla 7).

**Tabla 7**

*Efecto del PH en la reducción del consumo de cal y ahorro de costos*

Campaña de mineral	Reducción de pH	Ahorro de cal Kg/Tm	Ahorro de cal Ton/mes	Ahorro de cal Tm/año	Ahorro de cal \$US/año
2009-10-M4A-02	de 10.4 a 10.0	0.098	132	1587	285,860
2009-21-M4A-05	de 10.4 a 10.0	0.080	108	1302	234,552

*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

### *Conclusiones*

- De acuerdo con los resultados de las pruebas realizadas en Laboratorio en dos campañas de mineral M4A (fase 3 y fase 4), al incrementar la dosificación de sulfato de zinc en un rango de 50 y 250 g/Tm no se tiene una variación significativa en el grado y recuperación de cobre, así como en el desplazamiento de zinc al concentrado de cobre. Por consiguiente, es posible disminuir el consumo de este reactivo. Ver fig. 45 y 47.
- Asimismo, al trabajar en un rango de pH entre 10 y 10.5 no se aprecia una diferencia significativa en los grados y recuperaciones de cobre, así como en el desplazamiento de zinc al cobre; entonces es posible trabajar con pH menores a los normalmente considerados en la operación sin perjudicar la metalurgia, como consecuencia podemos disminuir los consumos de cal. ver fig. 46.
- La reducción del consumo de sulfato de zinc de 250 a 150 g/Tm en la flotación rougher de cobre y debido a la menor acidez que se genera en la pulpa, representa un ahorro de 129 toneladas de cal al mes, esto significa un ahorro aproximado de \$US 183,000/año (considerando un consumo de cal necesario para llevar el pH de la pulpa a 10.4).
- La reducción del consumo de sulfato de zinc en 100 g/Tm significa un ahorro de 136 toneladas de sulfato de zinc por mes, lo cual representa un ahorro aprox. de \$US 1300 000/año.
- De acuerdo con las pruebas realizadas y viendo que por efecto del pH la metalurgia no se ve afectada, al bajar el pH de 10.4 a 10.0 en la flotación rougher de cobre; se tiene un ahorro adicional significativo de cal de 132 toneladas por mes, esto representa un ahorro aproximado de \$ US260 000/ año.

- Por lo tanto, la reducción del consumo de sulfato de zinc de 200 a 100 /Tm (consumo actual 250 g/Tm) y la disminución de cal: por efecto de la menor acidez de la pulpa y reducción de pH, tendríamos la posibilidad de ahorrar en total: \$US 1 743 000 / año. (Ahorro en Cal: \$US 443 000 / año y en Sulfato de Zinc: \$US 1 300 000/año), el cual sería confirmado en una prueba piloto a nivel planta.

### **3.3. Evaluación de rotores Float Force**

#### ***Antecedentes***

La investigación inicial estuvo orientada a:

- Cuantificar las pérdidas de cobre en tamaño grueso en relaves rougher en minerales Cu/Mo determinando, la distribución metálica en los relaves rougher.
- Análisis del grado de liberación de concentrados y relaves rougher.
- Determinación de los porcentajes de recuperación de cobre en las distintas fracciones de tamaño en el ámbito de la flotación rougher de cobre, tanto para minerales Cu/Mo

Con los datos obtenidos, se determinó la necesidad de mejorar los porcentajes de recuperación de cobre en las diferentes fracciones de tamaño, para ello se decidió adquirir rotores Float Force e instalarlos en la Fila C de Rougher Cobre, y evaluarlos en paralelo a los rotores Multi Mix de las Filas A y B.

En el presente reporte se analizará a detalle los resultados obtenidos en la flotación rougher de cobre, al operar los rotores Float Force (FF) instalados en la Fila C, comparando con los resultados obtenidos en las Filas A y B que actualmente operan con mecanismos Multi Mix (MM), para el caso de mineral Cu/Mo.

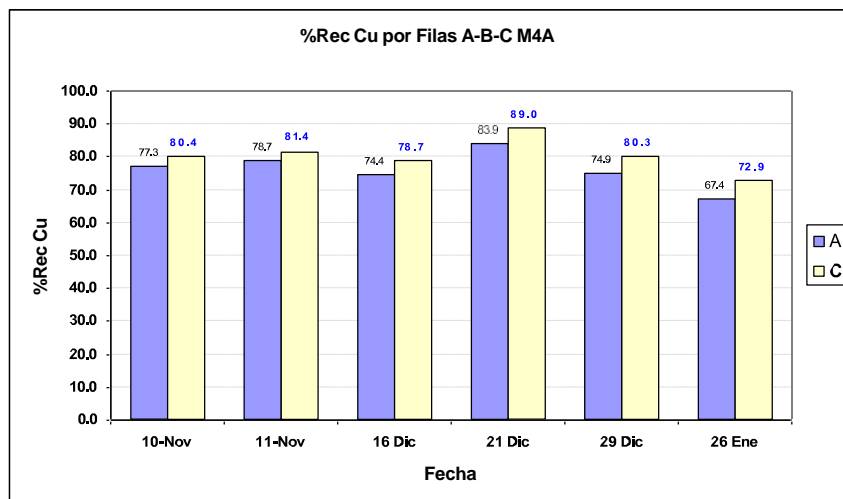
#### ***Resultados de la evaluación***

De los Balances del Muestreo en Planta; en la tabla 8 y las figuras 46 y 47, se observa un Incremento Promedio en 4.33%Rec Cu en Rougher Cu M4A con Rotores Float Force (Fila C), comparando con las recuperaciones obtenidas en la fila A con rotores Multi Mix.\*

**Tabla 8***Recuperación de cobre*

% Rec Ro Cu M4A	Diferencia		
	A	C	C-A
10-Nov	77.33	80.36	3.03
11-Nov	78.71	81.43	2.72
16-Dic	74.43	78.67	4.23
21-Dic	83.90	89.00	5.10
29-Dic	74.91	80.33	5.42
26-Ene	67.42	72.89	5.47
Incremento Promedio			4.33

*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 –Minera Antamina)

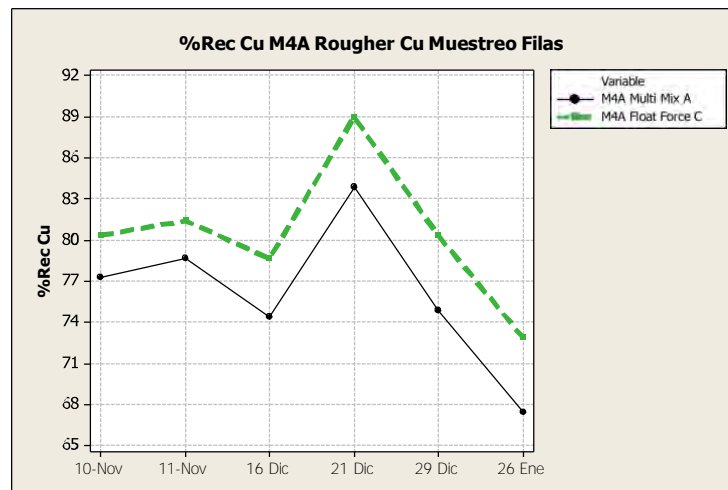
**Figura 48***Recuperación Cobre*

*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

Se hace la comparación entre la fila A y C teniendo en cuenta que la fila B trabaja con carga circulante de relimpieza (Conc. Scv Cleaner) diferente a la fila “C”

## Figura 49

### Recuperación Cobre

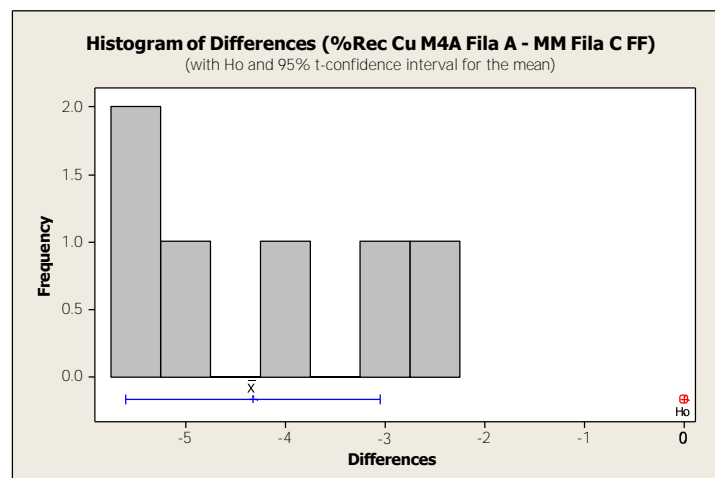


Fuente: (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

En la figura 48 se puede observar, según el análisis estadístico de paired Test que las medias son diferentes, reflejándose una diferencia  $>3\%$  entre las muestras (Fila A – Fila C).

## Figura 50

### Histograma de diferencias Multi Mix – Float Force



Fuente: (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

Los Balances Granulo químicos del Muestreo en Rougher de Cobre; en la tabla 9 y la figura 49 se observa incremento promedio en la malla 70 (212 micrones) de 10.82 %Rec Cu y 9.19 %Rec Cu al comparar la recuperación Rougher Fila C de Cu con rotores Float Force



vs. los resultados de las filas A y B con rotores Multi Mix, promediando un incremento de 10.0%Rec Cu, para tamaños superiores a 212 micrones.

**Tabla 8**

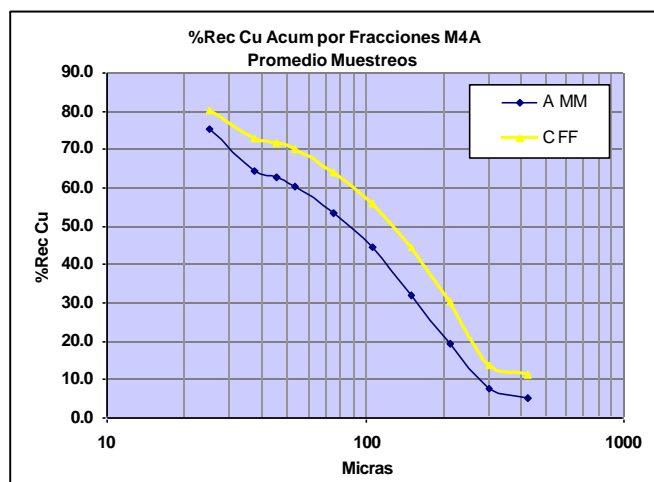
*Análisis granulométrico Cu/Zn*

Promedio M4A				
Malla	um	A MM	B MM	C FF
40	425	5.23	8.38	11.33
50	300	7.63	11.33	13.83
70	212	19.63	21.26	30.45
100	150	31.83	31.44	44.44
150	106	44.41	44.40	55.79
200	75	53.35	58.84	63.96
270	53	60.51	69.39	70.12
325	45	62.79	71.79	71.72
400	37	64.53	73.30	73.12
pan	25	75.21	81.73	80.25

*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

**Figura 51**

*Porcentaje de recuperación Cu por fracciones*

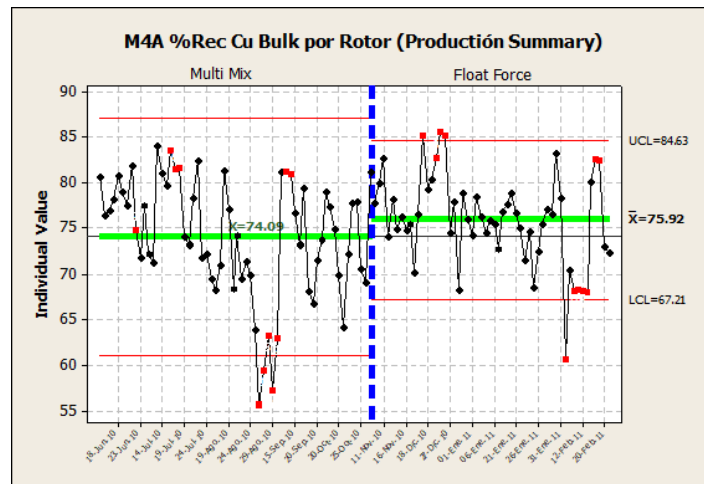


*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

De los balances generales de producción (Production Summary); para la figura 50, referencialmente, apreciamos incremento de tendencia promedio de Recuperación de Cu para minerales tipo M4A en 1.83% (74.09%Rec operando con Rotores Multi Mix en filas A, B y C y 75.92%Rec Cu operando con Rotores Float Force en la Fila C).

Figura 52

Carta de control M4A



Fuente: (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

En la tabla 10 los Análisis Microscópicos de los concentrados rougher de cobre muestran, menor grado de liberación de la calcopirita en los dos primeros bancos, para luego incrementarse en los dos últimos. Incremento de porcentaje en volumen de partículas mixtas, (mixto Calcopirita/Gangas (cp/GGs))

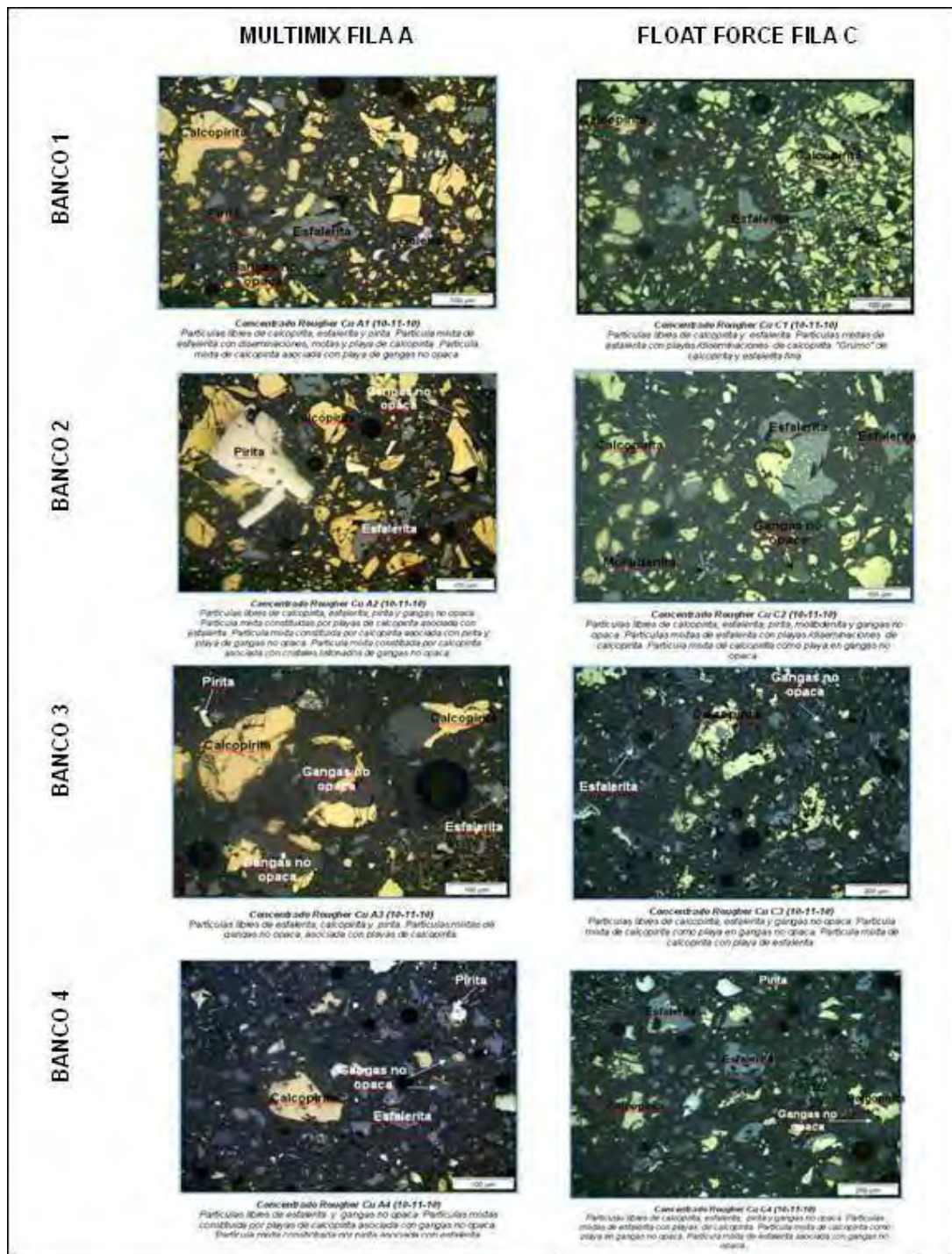
Tabla 9

Análisis microscópico M4

M4A	Multi Mix				Float Force			
	Conc. Ro Cu A1	Conc. Ro Cu A2	Conc. Ro Cu A3	Conc. Ro Cu A4	Conc. Ro Cu C1	Conc. Ro Cu C2	Conc. Ro Cu C3	Conc. Ro Cu C4
%Cu	23.1	18.3	11.2	6.2	23.3	20.0	10.1	9.3
%Zn	9.1	14.8	22.3	26.0	9.2	13.3	18.5	23.3
As ppm	216.0	176.0	153.0	152.0	164.0	172.0	139.0	222.0
Calcopirita	65.2	52.1	32.0	17.7	66.7	56.9	28.9	26.3
GL	92.0	92.0	73.0	40.0	82.0	76.0	77.0	54.0
Esferita	15.3	24.5	37.1	43.2	15.3	22.2	30.8	38.5
GL	58.0	75.0	68.0	90.0	41.0	70.0	69.0	80.0
Gangas no opaca	11.2	14.9	19.9	25.5	8.7	11.0	28.7	24.6
Insolubles	6.8	10.5	15.5	18.0	6.0	8.1	22.6	17.5
%Vol. Part. Mixtas	16.1	16.8	26.8	23.8	25.5	27.1	32.9	36.7
cp/ef	7.1	6.0	9.8		7.7	12.9	3.0	5.8
cp/GGs	4.9	6.6	12.5	11.2	8.9	12.0	16.9	17.0
cp/ef/GGs	1.8	1.2	1.8	5.7	2.6	1.2	8.0	3.1
Tamaños	50%>100 μ	40%>100 μ	50%>100 μ	50%>100 μ	50%>100 μ	30%>100 μ	50%>100 μ	50%>100 μ

Fuente: (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

Figura 53 Análisis de Microscopia M4A



Fuente: (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

Adicionalmente, las inspecciones de Mantenimiento han confirmado que los rotores Float Force, presentan menores desgastes y menos atoro que los rotores Multi Mix,

**Figura 54**

*Float force pasados 4 meses de operación 1*



*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

**Figura 55**

*Float force pasados 4 meses de operación 2*



*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

### ***Conclusiones***

Las evaluaciones realizadas indican que la puesta en operación de los rotores Float Force en la Fila C Rougher de Cobre, ha significado un incremento de 2% de Recuperación Rougher de Cobre, proyectando un incremento en la recuperación global de cobre de 1.0% en minerales M1 y M4A. Además, se observa que en mejora la recuperación de Moly en M1.

### ***Recomendaciones***

- Continuar el monitoreo de las mejoras obtenidas en posteriores campañas de procesamiento de mineral M1 y M4A.
- Adquirir 14 rotores Float Force más y la instalación en las celdas Rougher de las filas A y B de Cobre.
- En vista que se incrementaría el tamaño de partículas y se tendría mixtos del concentrado rougher de cobre, necesitamos posteriormente evaluar el efecto del circuito de remolienda de cobre y el impacto en la calidad en la etapa de limpieza.

## Bibliografía

Minera Antamina. (2005). San Marcos, Huari, Ancash.

Manual de operaciones Antamina

Laboratorio metalúrgico. (2014). San Marcos, Huari, Ancash: Minera Antamina.

Lakefield Research. (2000). Estudio de Factibilidad. Canada.

[www.antamina.com](http://www.antamina.com)

## Glosario

- **Aprom feeder:** Alimentador de placas es equipo de transporte cuyas características son muy similares al de una cinta transportadora, pero normalmente es utilizado para distancias cortas.
- **Blending:** Optimización de la mezcla de minerales en mineral y desmonte.
- **Colector:** Los reactivos colectores favorecen la condición hidrofóbica e hidrofílica de las partículas de sulfuro de los metales a recuperar, de manera que se separan del agua y se adhieren a las burbujas de aire.
- **Dispacht:** Se refiere a la gestión y asignación eficiente de recursos mineros tales como camiones y palas en una operación minera, sobre todo en minería superficial que es donde más se usa.
- **Endoskarn:** Un Skarn es un depósito formado en un ambiente de metamorfismo de contacto con roca de caja de carbonatos (calizas o tal vez margas).
- **Geomembrana:** son láminas geo sintéticas que se utilizan para la contención de líquidos en procesos mineros, medioambientales y agrícolas. Se caracterizan por su resistencia mecánica, permeabilidad y durabilidad en el medio ambiente.
- **HDPE:** Revestimiento interno de polietileno de alta densidad.

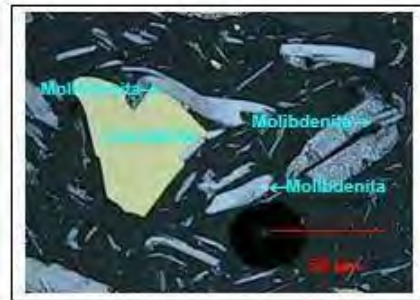
- **LMPs:** Límites Máximos Permisibles.
- **Pebbles:** Trozos o piedras pequeñas que son generadas en el molino SAG
- **Polígonos:** Los polígonos de mineral tienen como finalidad optimizar el control de dilución operacional durante el proceso de carguío de mineral en Tajo de la mina.
- **Pull cord:** El interruptor de parada de emergencia para faja modelo SS-2 es un accesorio de seguridad de la banda transportadora diseñado para enclavarse con los sistemas de apagado de la banda en caso de mantenimiento o emergencia.
- **Taladros:** Los taladros de roca son herramientas usadas para extraer piedra directamente. Perfora barrenos en las formaciones rocosas para colocar explosivos y destruir las rocas para completar la extracción de piedra u otras piedras.
- **Trommel:** Los trómeles de cribado para molinos SAG ofrecen un mecanismo sencillo para la clasificación del mineral.

## Anexos

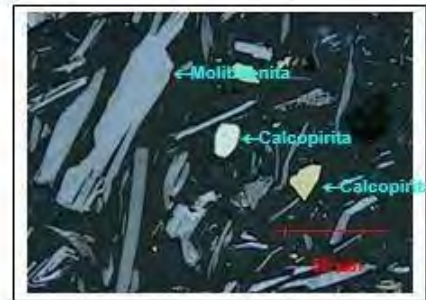
### Microscopia de diferentes minerales de Antamina

#### Anexo A. Minerales en M1 A

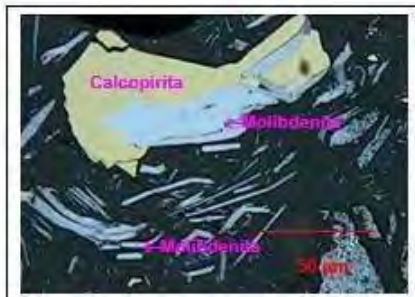
##### Minerales en M1 Concentrado de Mo



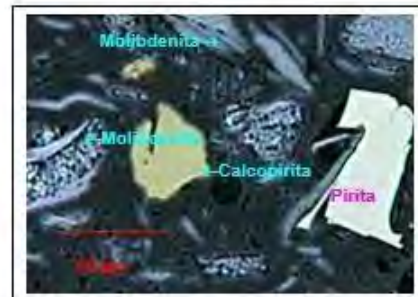
*Partículas libres de molibdenita. Molibdenita en borde de calcopirita.*



*Partículas libres de molibdenita, calcopirita y pirita.*



*Partículas libres de molibdenita. Calcopirita con listones de molibdenita.*

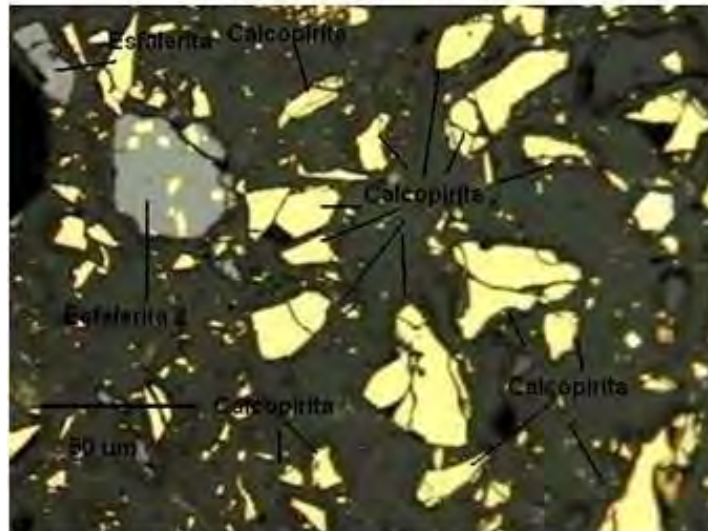


*Partículas libres de molibdenita, calcopirita y pirita.*

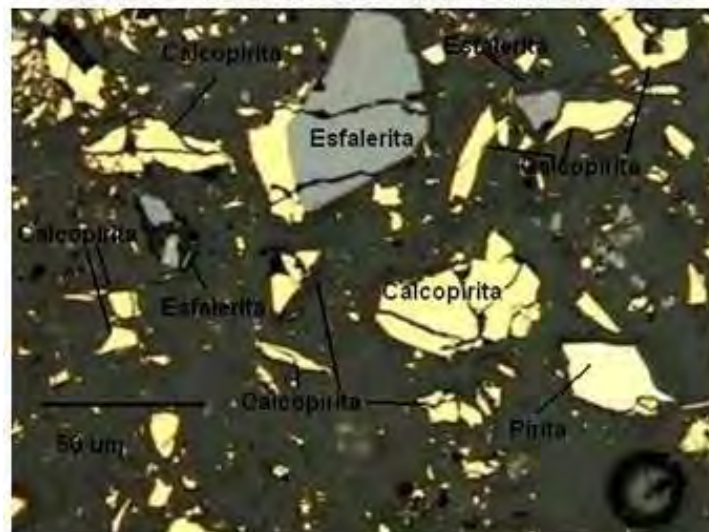
*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)



Concentrado Bulk de Cu



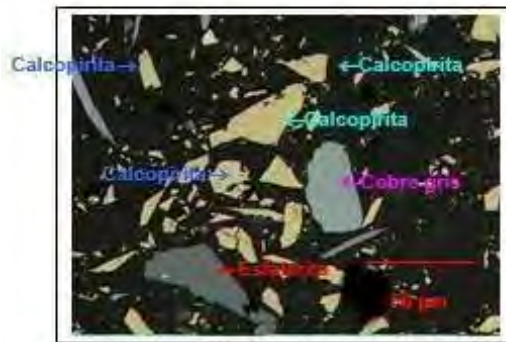
*Partícula libre de calcopirita y esfalerita de tamaños menores a 50 micras. Partícula mixta constituida por pequeñas motas de calcopirita de tamaños menor a 10 micras dentro de esfalerita.*



*Partícula libre de calcopirita, pirita y esfalerita de tamaños menores a 50 micras. Partícula mixta constituida por playa de calcopirita en borde de esfalerita.*

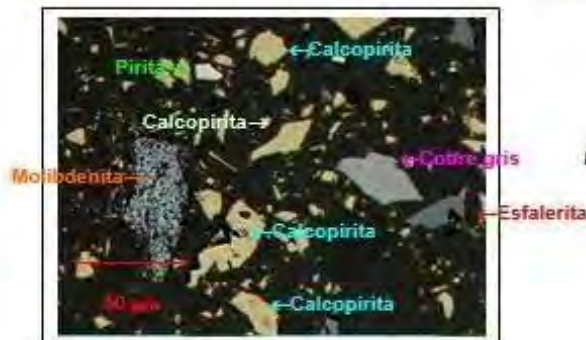
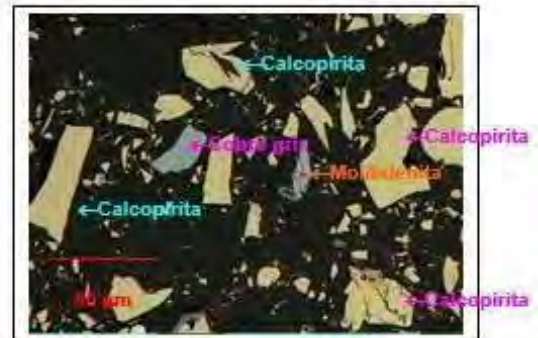
*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

### Concentrado Bulk de Cu con alto As



Partículas libres de calcopirita, esfalerita y cobre gris.

Partículas libres de calcopirita, cobre gris y molibdenita.

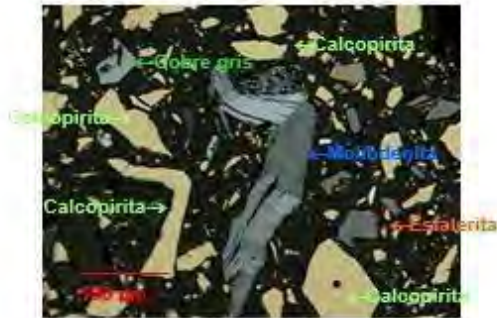


Partículas libres de calcopirita, cobre gris, molibdenita y pirita.

Fuente: (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

Anexo B. Minerales en M2 B

Minerales en M2  
Concentrado Bulk de Cu

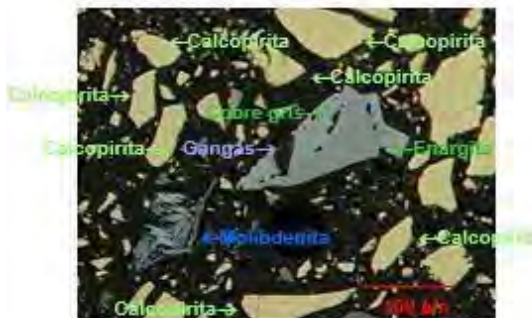


Partículas libres de calcopirita, esfalerita, molibdenita y cobre gris.

Partículas libres de calcopirita y esfalerita. Calcopirita con bordes de molibdenita.



Partículas libres de calcopirita y molibdenita. Cobre gris en crecimiento de geometría simple con enargita y con motas de gangas.



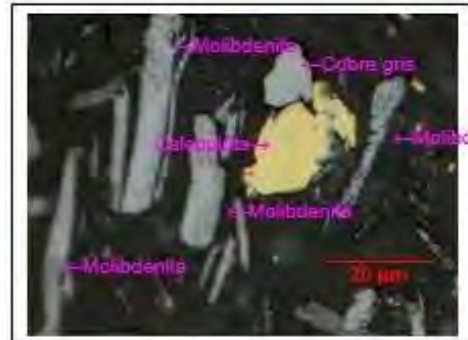
Fuente: (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

**Concentrado de Mo**

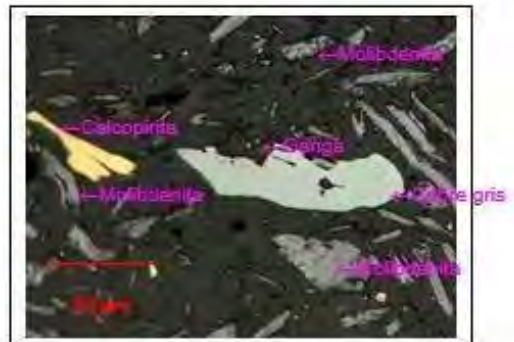


*Partículas libres de molibdenita. Calcopirita asociada con cobre gris, enargita y cristales listonados de molibdenita.*

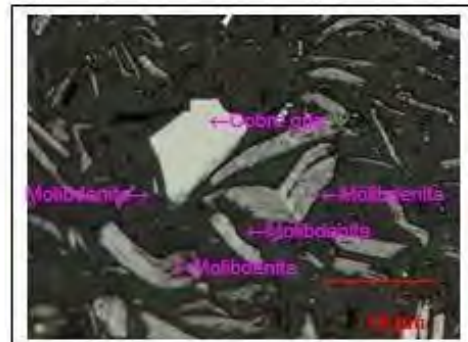
*Partículas libres de molibdenita. Calcopirita asociada cobre gris.*



*Partículas libres de molibdenita y calcopirita. Cobre gris, con mota de ganga.*



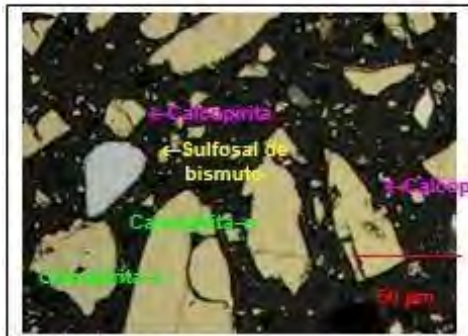
*Partículas libres de molibdenita y calcopirita. Cobre gris, con fino borde de molibdenita.*



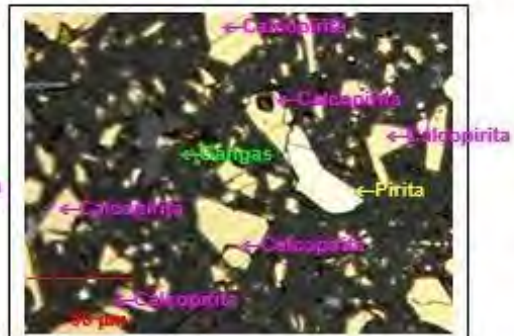
*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

## Anexo C. Minerales en M2A C

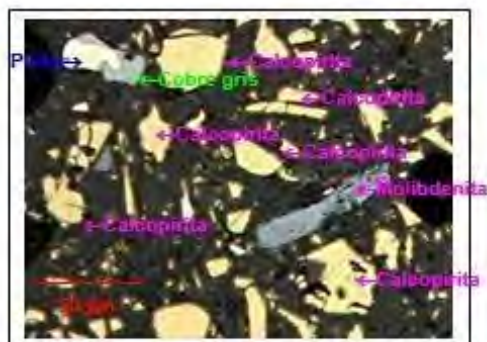
**Minerales en M2A  
Concentrado Bulk de Cu**



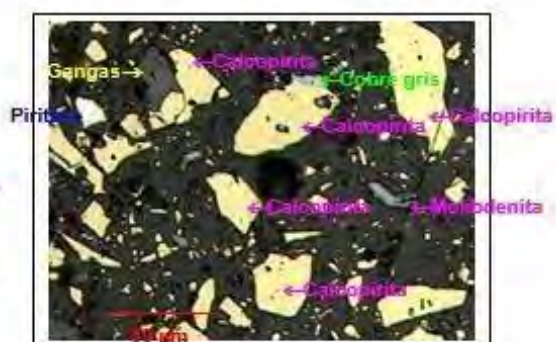
*Partículas libres de calcopirita y sulfosal de bismuto (galenobismutinita).*



*Partículas libres de calcopirita. Calcopirita en crecimiento de geometría simple con piritita. Mota de calcopirita en gangas.*



*Partículas libres de calcopirita y molibdenita. Cobre gris como playas en bordes de piritita.*

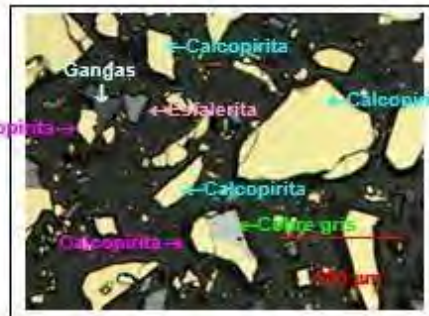
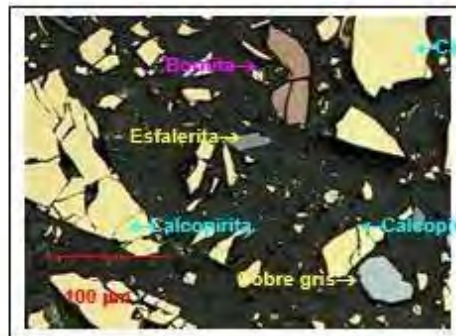


*Partículas libres de calcopirita, piritita y molibdenita. Cobre gris como mota en borde de calcopirita. Calcopirita con playa de ganga.*

## Anexo D. Minerales en M4 D

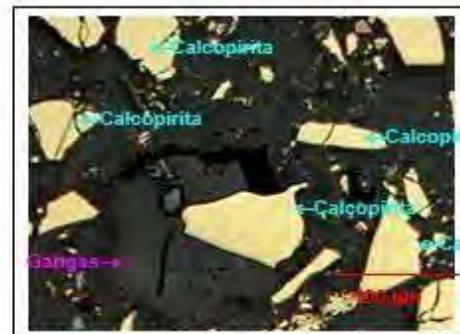
### Minerales en M4 Concentrado Bulk de Cu

*Partículas libres de calcopirita, esfalerita, bornita y cobre gris.*



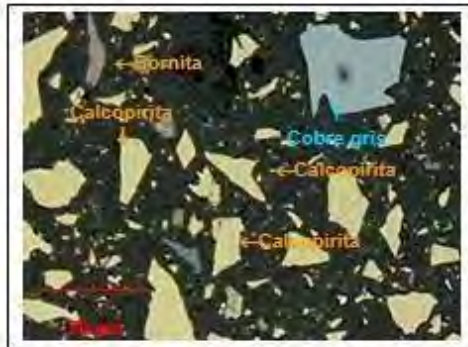
*Partículas libres de calcopirita y esfalerita. Calcopirita en crecimiento de geometría simple con cobre gris y gangas.*

*Partículas libres de calcopirita y esfalerita. Playa de calcopirita en ganga.*

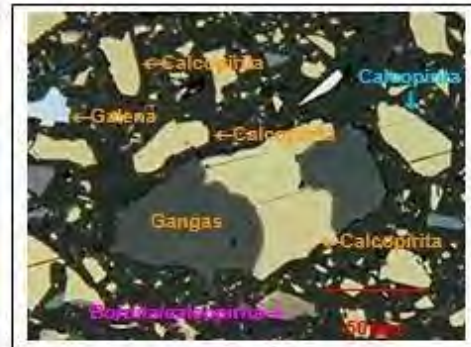


*Fuente: (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)*

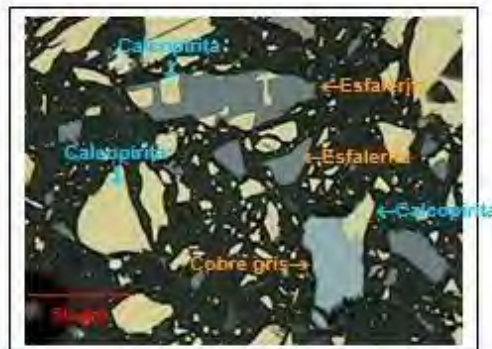
**Concentrado Bulk de Cu  
con alto As**



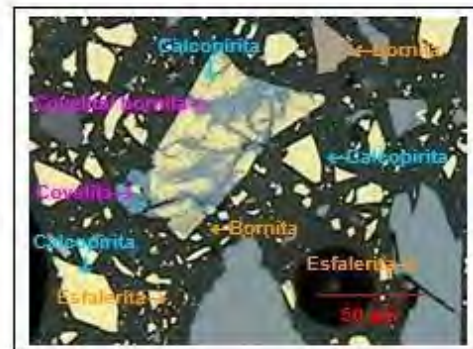
*Partículas libres de calcopirita, bornita y cobre gris.*



*Partículas libres de calcopirita y galena. Playa de calcopirita en gangas. Bornita en proceso de desmezcla con calcopirita.*



*Partículas libres de calcopirita y esfalerita. Motas de calcopirita en esfalerita. Crecimiento de geometría simple de calcopirita/cobre gris.*

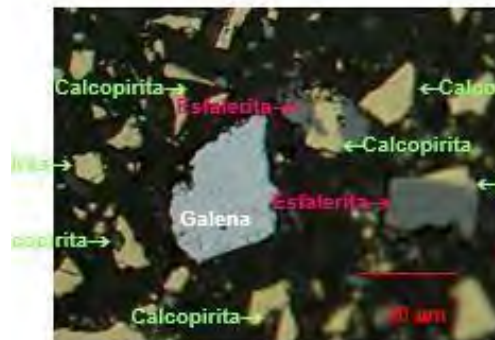


*Partículas libres de calcopirita, bornita y esfalerita. Venillas de covelita y covelita/bornita en calcopirita.*

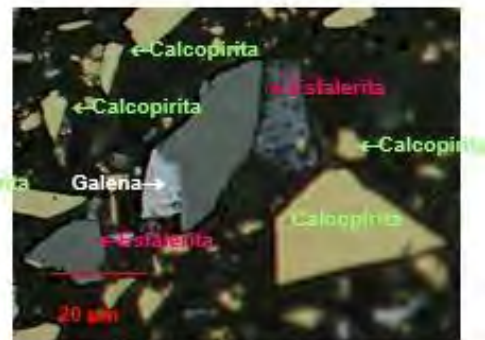
*Fuente: (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)*

## Anexo E. Minerales en M4A E

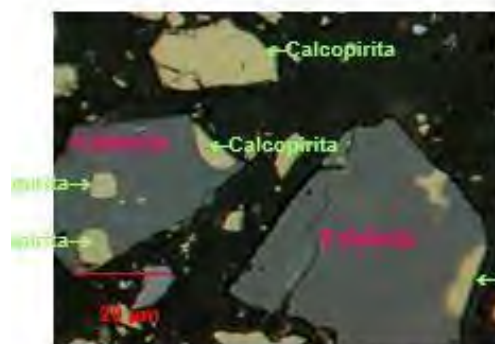
### Minerales en M4A Concentrado Bulk de Cu



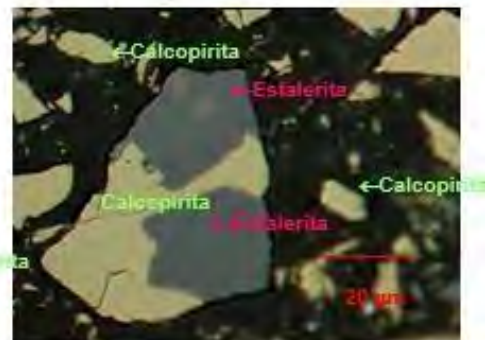
*Partículas libres de calcopirita y galena.  
Playas de calcopirita asociada con  
esfalerita.*



*Partículas libres de calcopirita y  
esfalerita. Mota de galena en borde de  
esfalerita.*



*Partículas libres de calcopirita .Motas  
de calcopirita dentro de esfalerita.*



*Partículas libres de calcopirita .Motas  
esfalerita dentro de calcopirita.*

*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

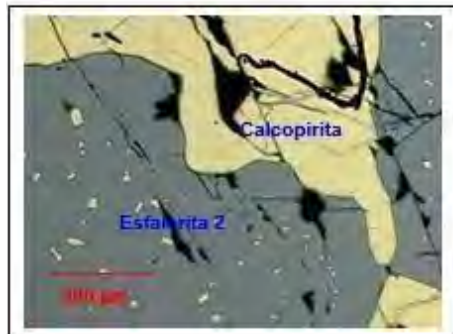


## Anexo F. Minerales en M6 F

### Minerales en M6

#### Zona transición de M2A a M6

##### Zona Oxidada



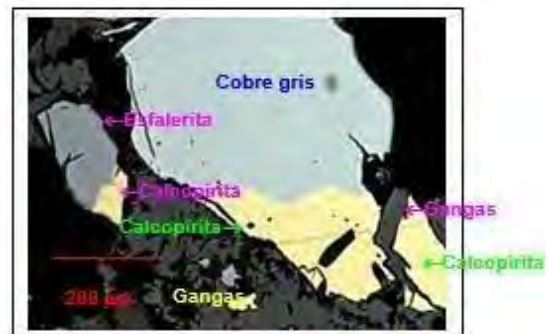
Playa de calcopirita en cavidad de esfalerita 2.



Esfalerita 2 asociada con calcopirita, mota de calcopirita en esfalerita y cobre gris con venilla de calcopirita, rellenando fracturas en gangas.



Cobre gris con venillas o motas de calcopirita y calcopirita, rellenando fracturas en gangas.

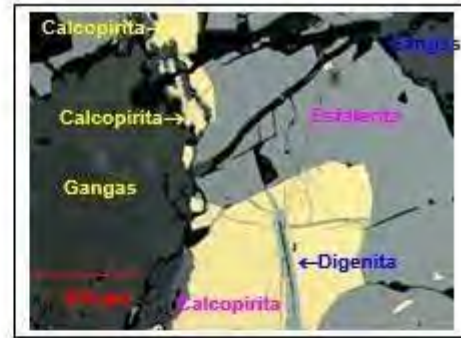


Calcopirita en crecimiento de geometría simple con cobre gris y esfalerita, rellenando fracturas en gangas.

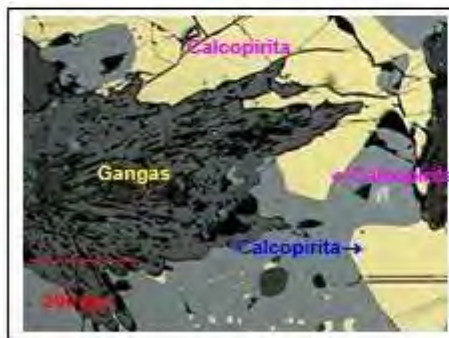
Fuente: (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)



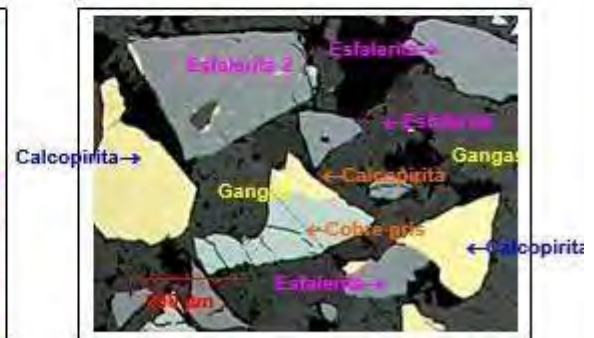
*Calcopirita asociada con bornita y esfalerita relleno de cavidad en gangas. Calcopirita y bornita con borde de calcosita.*



*Esfalerita con playas de calcopirita. Calcopirita con venillas de digenita.*



*Calcopirita asociada con esfalerita y gangas (wollastonita?).*



*Playas de calcopirita, calcopirita/esfalerita, calcopirita/cobre gris, esfalerita 2 y esfalerita, relleno de cavidades en gangas.*

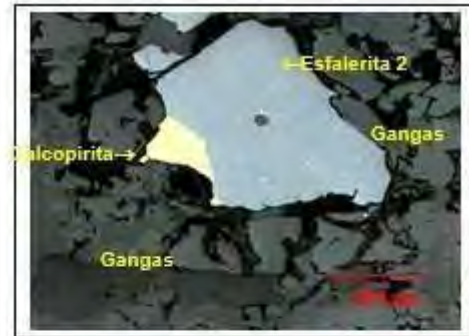
*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

## Anexo G. Zona no oxidada G

### Zona no oxidada



*Bornita asociada con calcopirita y esfalerita en gangas.*



*Esfalerita 2 (con finas diseminaciones de calcopirita) con mota de calcopirita, ambas relleno de cavidad en gangas.*



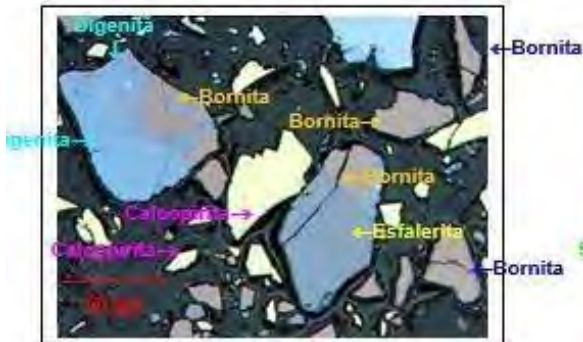
*Bornita con motas de calcopirita relleno de cavidad en gangas.*



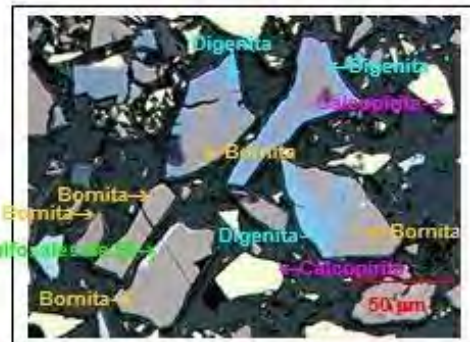
*Bornita en crecimientos de geometría simple con calcopirita y bornita con mota de calcopirita y asociada con esfalerita, relleno de cavidad en gangas.*

*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)

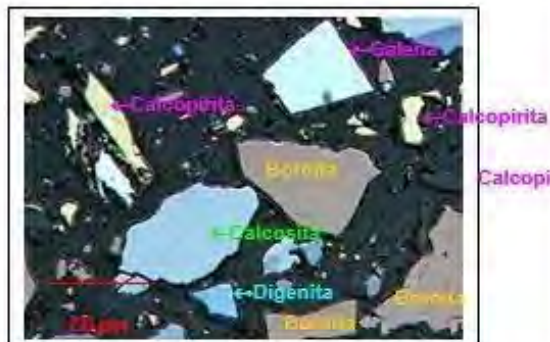
**Concentrado Bulk de Cu**



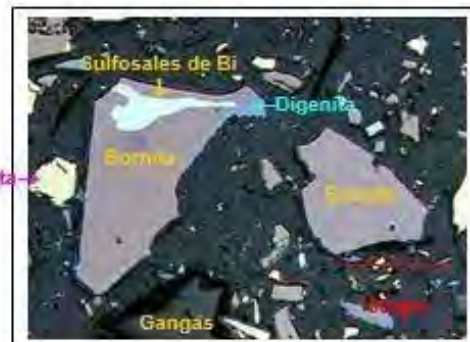
*Partículas libres de calcopirita y bornita. Digenita con motas de bornita. Esfalerita en crecimiento de geometría simple con bornita.*



*Partículas libres de calcopirita y bornita. Digenita en bordes y venillas de bornita. Sulfosales de Bi en borde de bornita.*



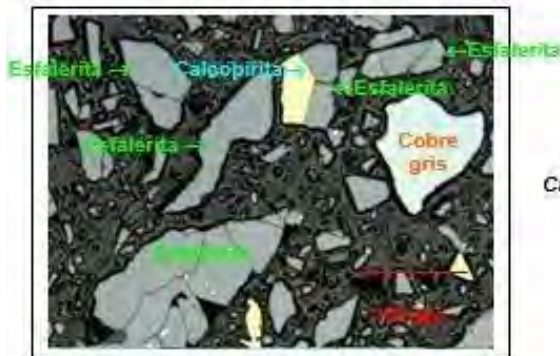
*Partículas libres de calcopirita, bornita, galena digenita y calcosita.*



*Partículas libres de calcopirita y bornita Bornita con playa de wittichenita y borde de digenita.*

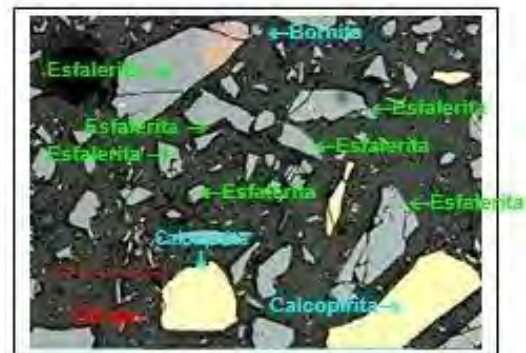
*Fuente: (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)*

### Concentrado Final de Zn

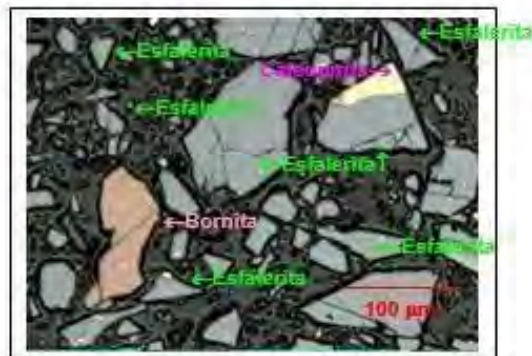


*Partículas libres de esfalerita y cobre gris.  
Calcopirita en crecimiento de geometría simple  
con esfalerita.*

*Partículas libres de esfalerita y calcopirita.  
Esfalerita en crecimiento de geometría simple  
con bornita.*



*Partículas libres de esfalerita y bornita.  
Esfalerita en crecimiento de geometría simple  
con calcopirita.*



*Fuente:* (Laboratorio metalúrgico, 2014 – Minera Antamina)