

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL



ESTUDIO COMPARATIVO DE OBTENCION DE
CONCENTRADOS DE COBRE A PARTIR DE SULFUROS
PRIMARIOS Y SECUNDARIOS DE COBRE

INFORME DE SUFICIENCIA
PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUIMICO

POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACION DE CONOCIMIENTOS
PRESENTADO POR:

CHRIS LISSET LUIS CHIROQUE

LIMA-PERÚ
2010

RESUMEN

En la Provincia de Nazca, departamento de Ica, a lo largo de la Panamericana Sur camino hacia Arequipa se avista numerosas Plantas Concentradoras de Cobre, las cuales se dedican al procesamiento de minerales de Cobre por flotación o Hidrometalurgia (Vía Húmeda).

En esta zona se ha ubicado una Planta Concentradora de Cobre PC, la cual se presenta como una alternativa frente a las doce que están alrededor.

La Planta Concentradora PC se dedica al procesamiento de minerales cupríferos provenientes de diferentes productores mineros de la zona de Ica, Huancavelica, Ayacucho y Arequipa, para luego ser comercializados en forma de concentrados.

La capacidad instalada y de operación es de 70 TM/día. El sistema de tratamiento que utiliza es por flotación de sulfuros.

La Planta Concentradora opera bajo un sistema convencional de chancado, molienda y flotación; y procesa minerales sulfurados de cobre. Los minerales tratados en esta Planta provienen tanto de la zona sulfuros primarios (de baja ley) como de la zona de sulfuros secundarios (alta ley), con los cuales la Planta previo análisis químico, determinara el tratamiento a realizar.

Como es una Planta que procesa minerales de diferentes productores mineros es de esperarse que la ley de cabeza a tratar sea baja (2-3% Cu) o también alta (>3% Cu); y por lo mismo que es de servicios busca complacer al cliente logrando un concentrado final que satisfaga las necesidades del mismo, tanto en tiempo de entrega como en calidad (ratio de concentración).

La Planta verifica la calidad del concentrado mediante análisis químicos por guardia en la cabeza, concentrado y relave; de modo que pueda se supervisar, corregir y verificar el trabajo en Planta.

En medio del boom de la expansión de la minería en el Perú en los últimos años, se ha producido al mismo tiempo un crecimiento importante de la pequeña minería, muchas veces en forma artesanal e informal.

Entre otros metales, la minería de cobre ha adquirido una gran relevancia en esta zona. Desde hace un año con la subida del precio de los metales no ha dejado de expandirse y pese a ser vista al inicio como una actividad momentánea – mientras se buscaba o intentaba construir otras alternativas económicas – lo cierto es que la minería cuprífera, pequeña y por lo general informal, se ha ido potenciando como fuente de empleo para decenas de hombre y mujeres.

INDICE

Resumen.....	2
CAPITULO I: Introducción.....	7
CAPITULO II: Fundamento Teórico	
II.1. Conceptos Básicos.....	9
II.2. Clasificación de los minerales de cobre.....	10
II.3. Extracción de los minerales de cobre.....	12
II.4. Yacimiento de intemperismo Químico Metálico.....	14
II.5. Cadena Productiva del Cobre.....	16
II.6. Concentración de Minerales de Cobre	
II.6.1. Trituración de Minerales de Cobre.....	19
II.6.2. Molienda.....	20
II.6.3. Clasificación.....	22
II.6.4. Clasificación Húmeda.....	23
II.6.5 Flotación.....	26
II.6.6. Los reactivos de flotación	32
II.6.7 Reactivos usados en la flotación de cobre.....	42
II.7 El aire.....	45
II.8. La agitación-Dispersión.....	47
II.9. Flexibilidad en los circuitos de Flotación.....	47
II.10 Hidrociclón inclinado.....	48
II.11 Efecto Cortocircuito.....	49
II.12 Control de la Recuperación y calidad del mineral.....	50
II.13 Evaluación del Proceso.....	52
CAPITULO III: Estudio comparativo de obtención de concentrados de cobre a partir de sulfuros primarios y secundarios de cobre	
III.1 Descripción del proceso a evaluar.....	55
III.2 Resultados.....	64
CAPITULO IV: Conclusiones.....	67
CAPITULO V: Bibliografía.....	68

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Corte de un yacimiento característico de cobre.....	13
Figura 2: Yacimiento de intemperismo químico metálico.....	14
Figura 3: Falla en la estructura mineralizada.....	15
Figura 4: Cadena productiva del cobre.....	18
Figura 5 : Tipos básicos de amarre.....	21
Figura 6: Vista microscópica del tipo de amarre simple.....	21
Figura 7: Desintegración de una masa de mena durante la molienda.....	22
Figura 8: Mecanismo de clasificación del Hidrociclón.....	24
Figura 9: Esquema integrado de los procesos de chancado, molienda y clasificación.....	25
Figura 10: Comportamiento de minerales hidrofóbicos e hidrofílicos respecto al agua (a).....	26.
Figura 11: Comportamiento de minerales hidrofóbicos e hidrofílicos respecto al agua (b).....	27
Figura 12: Esquema flotación por espuma....	29
Figura 13: Esquema del proceso de flotación.....	30
Figura 14: Sección transversal de un banco de celdas de Flotación.....	31
Figura 15: Clasificación de los reactivos de flotación.....	33
Figura 16: Representación de la acción de un colector frente a una partícula mineral de sulfuro.....	34
Figura 17: Estructura del Xantato.....	35
Figura 18(a): Estructura de una molécula de espumante.....	37
Figura 18(b): Conjunto de moléculas de espumante.....	37
Figura 19: Acción de los depresores.....	39
Figura 20: Acción del reactivador.....	40
Figura 21: Acción del aire en las celdas.....	46
Figura 22: Espuma muy baja ocasionada por la insuficiencia de aire.....	46
Figura 23:Proceso de agitación.....	47
Figura 24: Celda Ws.....	48

Figura 25: Hidrociclón inclinado.....	49
Figura 26: Efecto Cortocircuito.....	50
Figura 27: Platero del Concentrado.....	51
Figura 28: Platero del Relave.....	52
Figura 29: Diagrama de Flujo del Balance Metalúrgico.....	53
Figura 30: Minerales de Cobre.....	56
Figura 31: Diagrama de Flujo del Proceso de Molienda-Flotación Convencional.....	58
Figura 32: Diagrama de Flujo del Proceso de Molienda-Flotación para minerales con alta ley de cabeza.....	60
Figura 33: Diagrama de Flujo del Proceso de Molienda-Flotación para Minerales con baja ley de cabeza.....	62

CAPITULO I

INTRODUCCION

La concentración de minerales es uno de los procesos que se desarrolla en la actividad minera y busca enriquecer las especies mineralógicas útiles de una MENA mediante la eliminación de las especies o materiales sin valor.

El proceso de concentración se divide en tres etapas. Chancado, Molienda y Flotación. La flotación, constituye la principal etapa de la concentración de minerales debido a que esta permite obtener un mineral de valor comercial.

El presente informe refiere un estudio comparativo de la obtención de concentrados de cobre a partir de minerales cupríferos que presentan baja ley (sulfuros primarios) con minerales cupríferos que presentan alta ley (sulfuros secundarios). El interés es mostrar como se puede obtener una mayor recuperación del concentrado cuando se tiene como materia prima minerales cupríferos de baja ley de cabeza (< 3%).

Para el desarrollo se recopiló información desde el mismo tratamiento en la Planta Concentradora: el trabajo se inicia con la caracterización mineralógica del material a tratar en la cancha de Minerales hasta la obtención del Concentrado. Los datos de leyes se tomaron de los reportes de análisis entregados por el Laboratorio en cada guardia durante los días que dura el procesamiento.

De manera complementaria se registro material fotográfico que muestra el trabajo desarrollado en la Planta Concentradora.

La primera parte del presente informe comprende los conceptos fundamentales en los que se basa la metalurgia del Cobre, como son: su mineralogía, yacimientos y tratamiento en Planta hasta la obtención del concentrado. También se incluye las bases del cálculo para determinar la eficiencia de un proceso metalúrgico.

La segunda parte, muestra la parte central del presente informe haciendo una descripción detallada del tratamiento a realizar con cada tipo de mineral de cabeza; caracterización mineralógica, proceso a desarrollar plasmado en un diagrama de procesos, dosificación de reactivos hasta la obtención del concentrado requerido por el cliente.

La tercera parte comprende los resultados traducidos finalmente en una evaluación metalúrgica para cada tipo de mineral tratado.

La cuarta parte muestra las conclusiones y recomendaciones a la que se llegó en el presente informe.

CAPITULO II

FUNDAMENTO TEORICO

II.1.- CONCEPTOS BASICOS

Ley del mineral

Es el parámetro que determina el porcentaje de cobre que se encuentra en una determinada muestra de mineral.

En las rocas mineralizadas de los grandes yacimientos cupríferos la ley de cobre puede fluctuar en promedio entre un 0,5 y 2,0 %.

Mena: Asociación de minerales a partir de la cual se obtienen uno o más metales de forma económicamente favorable y al resto de mineral constituido por las impurezas.

Se habla de mena, cuando el mineral es de contenido metálico comercial y esta constituido por el mineral metálico y ganga.

$$\text{Mena} = \text{Mineral} + \text{Ganga}$$

Ganga: Comprende a los minerales que acompañan a la mena y se hallan principalmente en una matriz silícea, pero que no presentan interés minero en el momento de la explotación.

Mineral o elemento contaminantes: Se denomina así a los minerales portadores de elementos no deseados en los concentrados por ser motivo de castigos económicos en la comercialización y que en algunos casos pueden ser los

causantes de la no explotación del yacimiento. Estos elementos son principalmente Arsénico, Antimonio, Mercurio y Bismuto.

Cabeza: Es el mineral extraído de la mina y que ingresa a la Planta con el propósito de separar la parte valiosa de la estéril.

Concentrado: Contiene alto contenido de la parte valiosa. Es el producto que sale de la Planta Concentradora para ser vendido.

Relave: Son los productos que contiene bajo contenido de la parte valiosa y gran cantidad de la parte estéril o ganga. Sale de la Planta Concentradora para ser almacenado en las canchas de relave.

II.2.- CLASIFICACIÓN DE LOS MINERALES DE COBRE

El cobre se encuentra en la naturaleza en numerosos minerales y en diversas combinaciones con otros elementos. Se conocen cerca de 165 tipos de minerales de cobre, sin embargo, solo alrededor de doce son importantes y 6 son la base del 95% del cobre extraído en el mundo.

- **Cobre nativo:** Es aquel que se encuentra sobre las cortezas terrestres y a niveles explotables por el hombre.

- **Minerales oxidados:** Son aquellos minerales que se encuentran sobre la corteza terrestre o muy cerca de ella, de coloración variada y fácilmente atacados por soluciones ácidas. Se han formado por la acción del oxígeno atmosférico y acciones de tipo química. Algunos de ellos son la cuprita Cu_2O , tenorita CuO , malaquita CuCO_3 .

• **Minerales sulfurados:** Estos minerales se encuentran a una mayor profundidad, en este caso el mineral va combinado con azufre y otros metales. Son denominados insolubles ya que son resistentes al ataque de ácidos pero tienen como característica su capacidad de flotación que es aprovechada para separarlos en los procesos de extracción. Entre estos se encuentra la calcopirita CuFeS_2 , calcosina Cu_2S , y la covelina CuS .

En la Tabla 1 se describe las propiedades físicas más importante de las principales menas de cobre.

Tabla 1: Minerales de cobre y sus características

Mineral	Formula	% Cu	Color	Sp. Gr.	Dureza
NATIVO					
COBRE NATIVO	Cu	100	Rojo	8,8	2,8
OXIDOS					
CUPRITA	Cu_2O	88,8	Rojo	6,0	3,8
TENORITA	CuO	79,8	Gris	6,1	3,5
MALAQUITA	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	57,3	Verde	4,0	3,8
AZURITA	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	55,1	Azul	3,8	3,8
CRISOCOLA	$\text{CuSiO}_3 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	36,0	Verde	2,1	2,2
CALCANTINA	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	25,4	Azul	2,2	2,5
SULFUROS					
CALCOCITA	Cu_2S	79,8	Gris	5,7	2,8
COVELINA	CuS	66,4	Azul	4,6	1,8
BORNITA	Cu_5FeS_4	63,3	Rojo violeta	5,0	3,0
TENANTITA	$\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{As}_2\text{S}_3$	57,5	Gris	4,4	3 a 4,5
ENARGITA	Cu_3AsS_4	48,3	Gris	4,5	3
TETRAHEDRITA	$\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{Sb}_2\text{S}_3$	52,1	Gris	4,8	3 a 4,5
CALCOPIRITA	CuFeS_2	34,5	Amarillo	4,2	3,5 a 4

Fuente: Diapositivas de clase del Ing. Héctor Bueno.

Obsérvese con atención el porcentaje de Cu, en las menas de la Calcosita, Covelita, Bornita y Calcopirita.

II.3.- EXTRACCIÓN DE LOS MINERALES DE COBRE

Yacimiento: Se define al conglomerado o capas formada por menas. Cuando se analiza un yacimiento se debe tener en cuenta cuales son los minerales económicamente explotables y cuales no lo son.

Tipos de Yacimiento: Los yacimientos en general, se pueden clasificar en tres grupos principales:

Vetas: Yacimiento compuesto por un cuerpo mineral de forma alargada, limitado por planos irregulares de rocas denominadas “encajonantes”. Generalmente la veta es vertical. Cuando el cuerpo mineral aparece tendido o echado se le llama “manto”. Las vetas constituyen el tipo de yacimiento más común en nuestro medio.

Diseminado: Se llama así al cuerpo mineral que aparece en forma de hilos que atraviesan la roca en todas direcciones, o bien como puntos o motas de mineral que cubren grandes extensiones. Por ejemplo los yacimientos cupríferos de Toquepala, Cuajone y Cerro Verde que son porfiríticos y contienen sulfuros de cobre y molibdeno.

En los pórfidos, véase Figura 1, pueden distinguirse cuatro grandes zonas claramente diferenciadas:

- **Zona oxidada** con una ley de cobre inferior al 0,5%, además se encuentra presente melanterita, calcantita, los cuales son solubles y bajan hasta la zona de Sulfuros secundarios para formar calcosina y covelina.
- **Zona lixiviada** con una ley de cobre inferior al 0,5%, se encuentra presente lo mismo que en la zona de óxidos pero en menor cantidad.

- **Zona de sulfuros secundarios** con leyes de cobre entre 1-5%, donde se halla la calcosina, covelina, bornita, calcopirita y pirita.
- **Zona de sulfuros primarios** con una ley del 1%, en la cual se halla a la calcopirita, pirita y molibdenita.

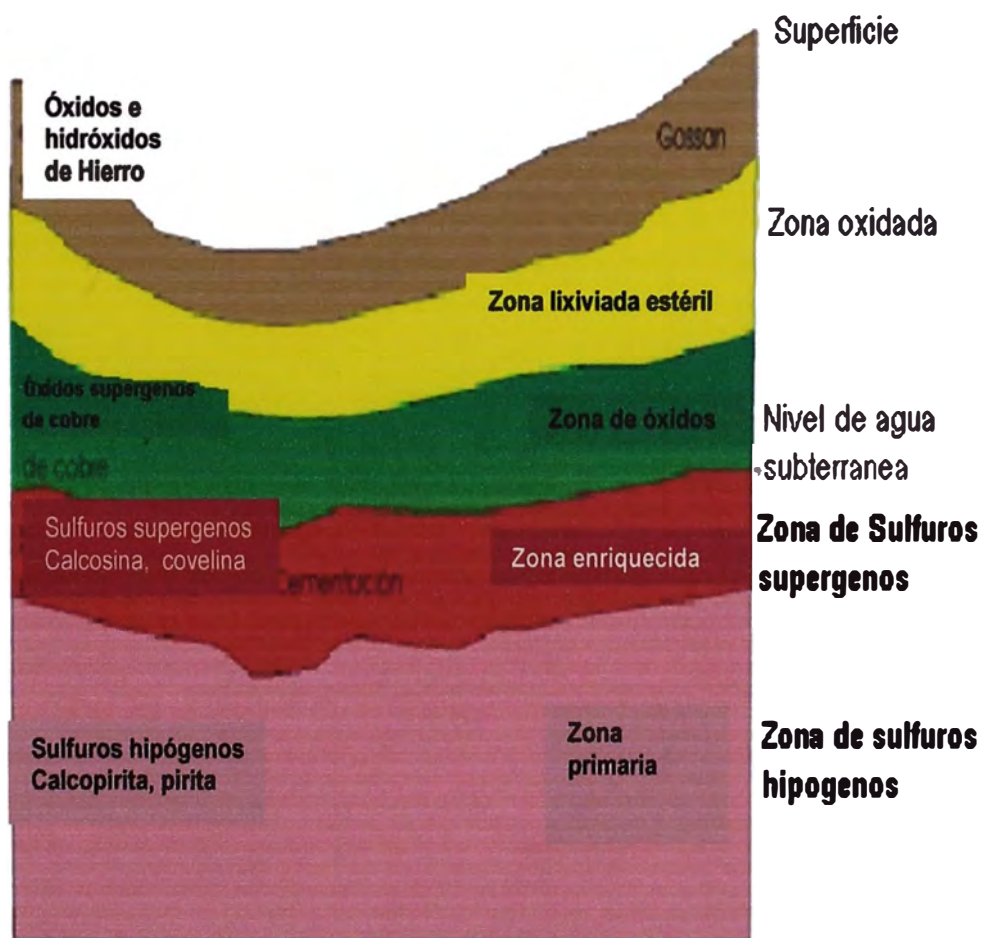


Figura 1: Corte de un yacimiento característico de Cobre

II.4.- YACIMIENTO DE INTEMPERISMO QUIMICO METALICO

Todo yacimiento metálico formado por vetas, por mantos y por cuerpos mineralizados está sometido a un proceso de meteorización o intemperismo físico, conocido como proceso de erosión. Estos mismos yacimientos también están sometidos a un intemperismo químico produciéndose un proceso de lavado lixiviación, un proceso de oxidación y un proceso de enriquecimiento secundario de sulfuros secundarios.

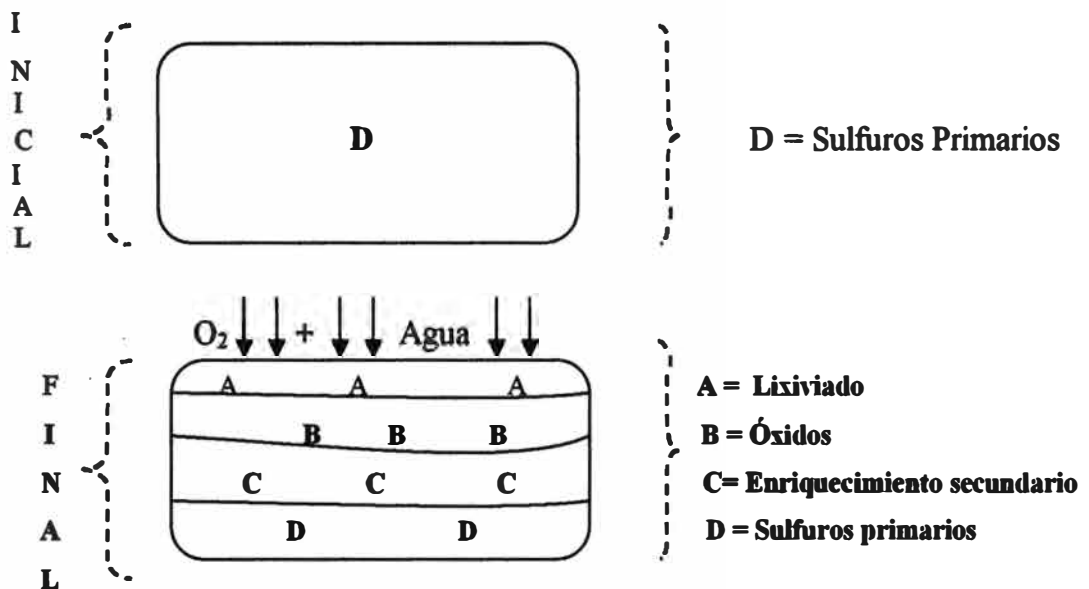


Figura 2: Intemperismo Químico Metálico

Génesis:

Observando la Figura 2, el agua y el óxido intervienen en la estructura mineralizada, cerca de la superficie se produce un lavado conocido como la franja lavada (A). Inicialmente la estructura mineralizada estuvo conformada por sulfuros primarios (D). Debajo de la zona lavada se tiene la zona de óxidos, los sulfuros primarios por acción del oxígeno sufrieron una oxidación (B). La profundidad de la zona lavada (A) mas la zona oxidada (B) en la Cordillera del Perú es de 60 m verticales, en la costa esta profundidad llega de 80 a 100 m, si la

estructura mineralizada estuviera atravesada verticalmente por fallas, fracturas o brechas profundas, la oxidación en estas estructuras puede llegar hasta entre 200 o 250 m, tal como se observa en la Figura 3.

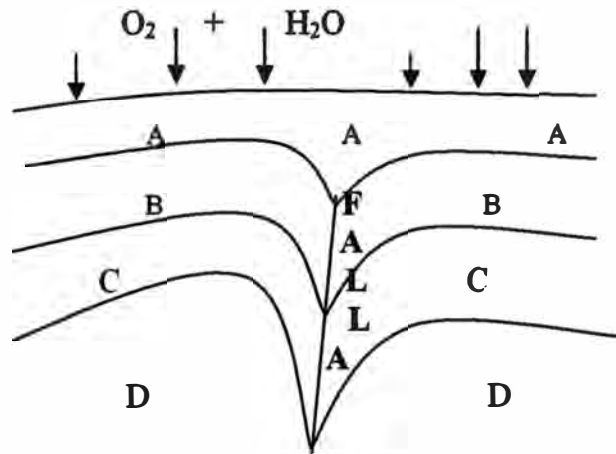


Figura 3: Falla en la estructura mineralizada

El O_2 más H_2O atacan a la pirita y se forma $H_2SO_4 + FeSO_4$. El H_2SO_4 ataca a la calcopirita y se forma la calcantita $CuSO_4 \cdot nH_2O$, esta es muy soluble y baja hasta la napa freática que se ubica en el límite inferior de los óxidos (B). En esta zona inmediatamente debajo de la zona de los óxidos (B) el Cu del sulfato reemplaza al Fe de la pirita y se formara sulfuro de Cu conocido como calcosina y covelina. De esta forma en la zona de enriquecimiento secundario de sulfuros secundarios (C) se tendrá el sulfuro primario de calcopirita más la calcosina y la covelina, incrementándose la ley de cobre.

El proceso descrito se resume con las siguientes reacciones químicas:



II.5.-CADENA PRODUCTIVA DEL COBRE

Para la obtención final del cobre se sigue la siguiente secuencia, véase la Figura 4.

Exploración, se realiza un estudio de la zona para determinar las características geológicas del yacimiento mediante perforaciones a centenares de metros de profundidad, de modo que permitan extraer muestras de materiales para ser analizadas. Realizada la tarea de exploración, se determina la reserva explotable y la reserva potencial.

Explotación, consiste en los trabajos relativos a la extracción del mineral, el cual puede ser a cielo abierto o subterránea. Una vez realizada la extracción se procede a transportarlo hacia la Planta de Beneficio.

El chancado reduce el tamaño hasta milímetros y la molienda hasta micrones (impalpable). Una vez chancados y/o molidos se procede a retirar las especies que contienen el cobre.

- Las especies “sulfuradas” deben molerse para después separarlas en proceso de Flotación para obtener un concentrado. En el Beneficio de Minerales: Chancado, Molienda y separación de la especie mediante Flotación se obtiene un concentrado.

El Concentrado se funde, se convierte y refina para obtener Cobre Refinado – Ánodo o Cu RAF (Refinado a Fuego).

El RAF en la forma de ánodo se electrofina para la obtención de cátodos (99,9 Cu %).

- Los minerales que contienen especies oxidadas y algunos sulfuros (tipo Cu_2S , calcosita), pueden disolverse “fácilmente” al ser atacados por soluciones acuosas con ácido sulfúrico. Estos minerales siguen el procesamiento:
 - Chancado, hasta el orden de mm y posteriormente eventual aglomerización (peletización).
 - Lixiviación, etapa de disolución del Cobre en la que se obtiene solución acuosa con el cobre disuelto, en donde se recupera el orden del 60 % del Cu del mineral.
 - Extracción por solventes, que es la etapa de purificación y concentración de la solución acuosa.
 - Electroobtención del Cobre desde la solución líquida, precipitándola en cátodo, obteniéndose Cobre catódico al 99,9 % Cu.

Obsérvese que con ambas tecnologías de producción se obtiene cátodos de cobre al 99,99 % Cu para su posterior exportación.

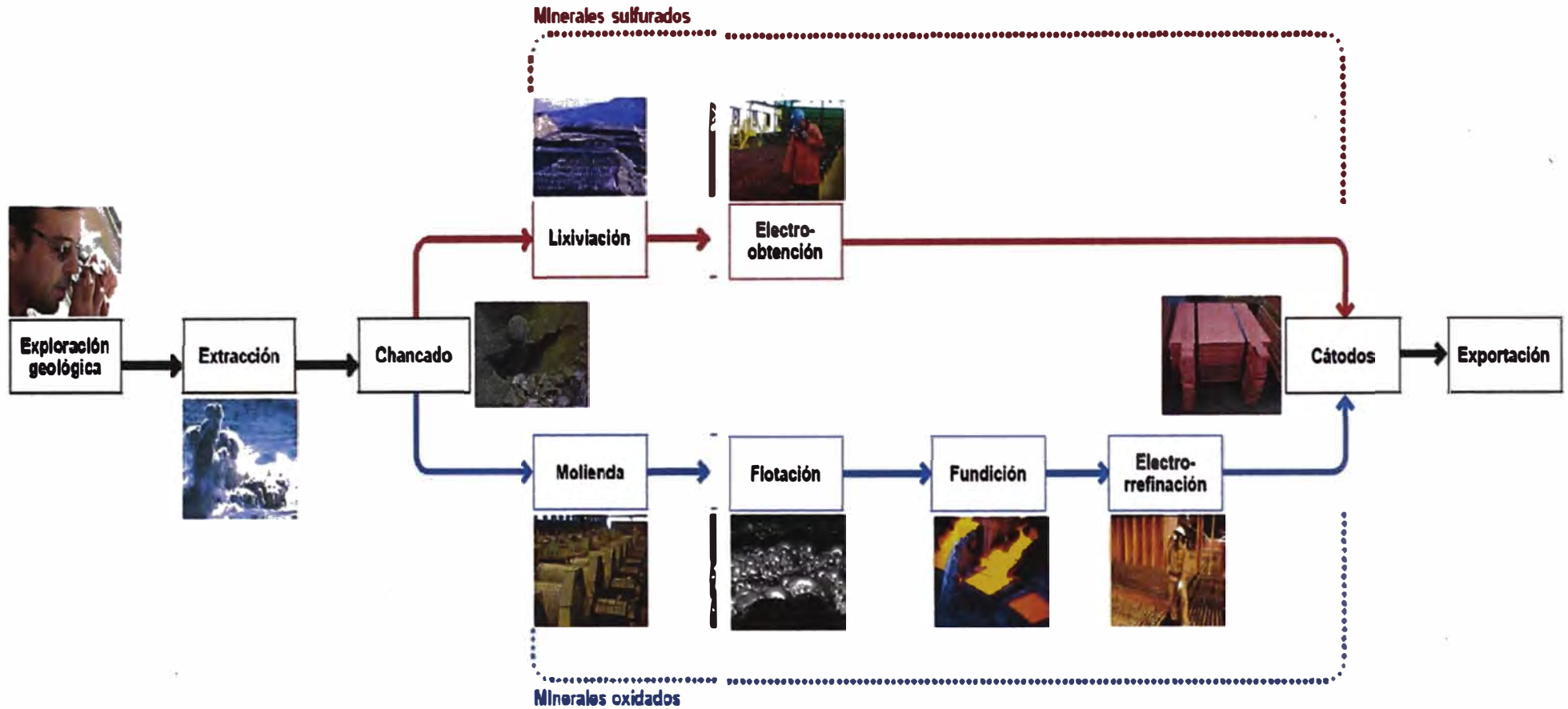


Figura 4: Cadena Productiva del Cobre

II.6.-CONCENTRACION DE MINERALES

La concentración de minerales es necesaria para rentabilizar toda la operación minera y se aplica a ciertos tipos de mineral, logrando disminuir el impacto negativo del flete y del gasto de tratamiento del producto, a pesar del costo adicional y de las pérdidas de recuperación causadas por el proceso de concentración.

II.6.1.-TRITURACIÓN DE MINERALES

Las operaciones de concentración de minerales en ciertos casos requieren de una preparación previa de los minerales, la cual se realiza en equipos especiales de trituración.

Estas operaciones se llevan a cabo cuando se trata de conseguir el tamaño adecuado de mineral con el cual se llevara a cabo la concentración. Sin embargo, dichas operaciones no solamente consistirán en reducir de tamaño la roca mineral, sino que será necesario obtener la granulometría a la cual se logre la liberación de la especie mineral.

Para ello se somete el mineral bruto a la acción de máquinas trituradoras en una serie de etapas, con lo cual se entrega el material a un tamaño adecuado para ser tratado a la molienda, en donde se completará la liberación.

La trituración primaria se realiza en chancadoras giratorias y de mandíbula y comprende la reducción de tamaño desde la voladura hasta un tamaño promedio de 100 mm. La trituración secundaria reduce el material hasta un promedio de 10 mm. El mineral podrá ser reducido aún más de acuerdo a las características del mismo, en una posterior trituración terciaria y hasta cuaternaria, si así lo requiere el proceso metalúrgico.

II.6.2.-MOLIENDA

Las operaciones de concentración de minerales se llevan a cabo bajo un determinado tamaño de partícula, con la cual se conseguirá llegar al grado de liberación adecuado. En la molienda se conseguirá completar el grado de liberación necesario para la etapa de concentración.

La molienda es una operación que permite la reducción del tamaño de la materia hasta tener una granulometría final deseada, mediante los diversos equipos que trabajan por choques, aplastamiento o desgaste.

En esta operación de molienda, es donde se realiza la verdadera liberación de los minerales valiosos y se encuentra en condiciones de ser separados de sus acompañantes no valiosos.

Por lo general, la molienda está precedida de una sección de trituración y por lo tanto, la granulometría de los minerales que entran a la sección molienda es casi uniforme.

Entre minerales pobres o entre minerales valiosos se pueden encontrar los siguientes amarres, véase la Figura 5:

- a) **Amarre simple:** Parte valiosa amarrada con la ganga, sulfuros valiosos amarrado entre ellos.
- b) **Amarre pelicular:** Sulfuro valioso recubre la ganga, un sulfuro valioso recubre a otro sulfuro.
- c) **Amarre en dispersiones:** Sulfuro valioso incrustado firmemente en la ganga, la ganga incrustada firmemente en el sulfuro valioso.

- d) Amarre en vetas: Sulfuro valioso amarrado con la ganga, sulfuros valiosos amarrado entre ellos.

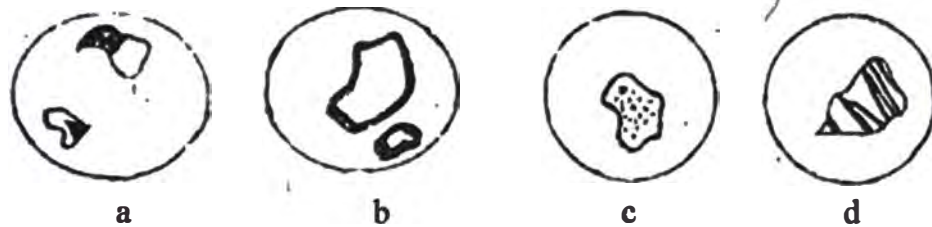


Figura 5: Tipos Básicos de amarres

Mirando detenidamente los minerales bajo el microscopio se pueden observar los diferentes tipos de amarres, véase Figura 6, se observa una vista microscópica del tipo de amarre simple

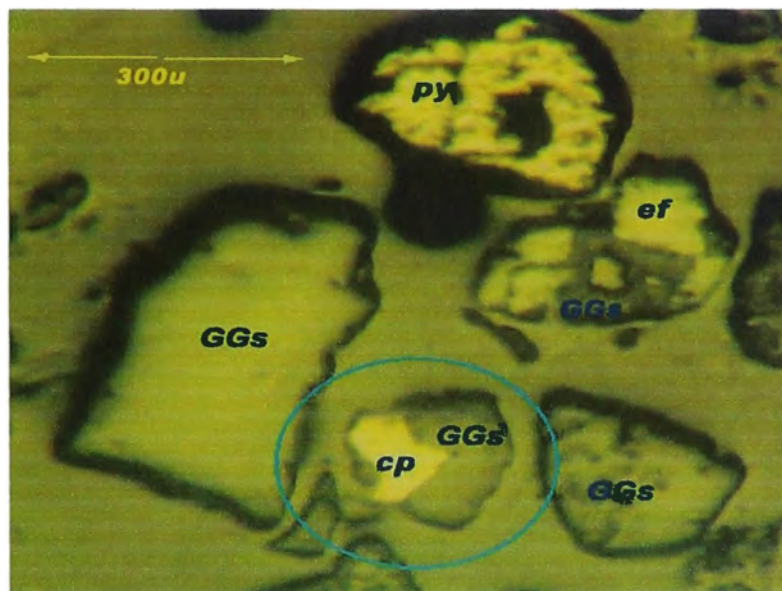


Figura 6: Vista microscópica del tipo de amarre simple

En la Figura 7 se describe mediante los esquemas la desintegración de una masa de mena de un mineral ocurrido antes (A) y después (B) de la molienda.

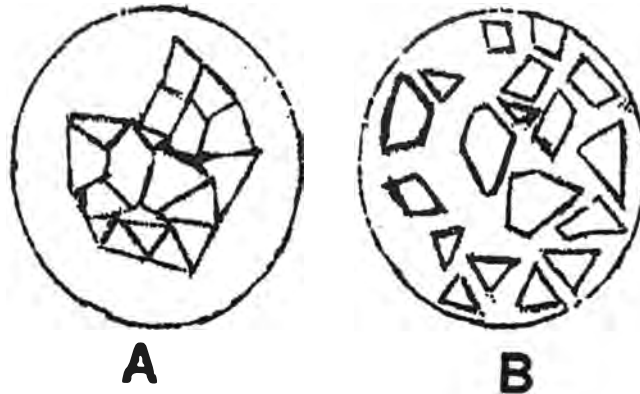


Figura 7: Desintegración de una masa de mena durante la molienda

11.6.3.- CLASIFICACIÓN

En los circuitos de conminución en los que se incluye trituración y molienda se realizan una previa clasificación de los minerales antes de que ingresen a la etapa de reducción de tamaño.

La clasificación previa de tamaños contribuye a dosificar la alimentación a los equipos de reducción, evitando de que ingrese material cuyo tamaño es inferior al setting de la máquina de trituración, o separando material que ya ha cumplido con los márgenes de tamaño deseado.

Resulta pues importante la inclusión de clasificadores en los circuitos de conminución a fin de optimizar su rendimiento.

Clasificación en la Molienda

En la Molienda, la clasificación de las partículas se basa en la separación de las mismas según la rapidez de asentamiento del agua.

Objetivos de la Clasificación:

Separación de las partículas por tamaños.

También influyen en la clasificación, el peso de las partículas.

- En la práctica, la clasificación puede concebirse como una operación de selección más que de clasificación por tamaños.

Tipos de Clasificadores:

Clasificadores mecánicos: Helicoidal y de rastrillos.

Conos clasificadores (Hidrociclones)

II.6.4.-CLASIFICACIÓN HÚMEDA

La clasificación húmeda es un método de separación de mezclas de minerales en 2 o más productos teniendo como base la velocidad con que caen las partículas a través de un medio fluido. En el procesamiento de minerales, generalmente este medio es el agua y la clasificación en húmedo se aplica a partículas lo suficientemente finas para ser separadas eficientemente por cribado.

La clasificación interviene en varias fases de la preparación de los minerales y particularmente en la sección de molienda. En efecto, en la descarga del molino todas las partículas no son del mismo tamaño, hay partículas gruesas que no pasan la malla de liberación y entonces estas deben ser remolidas. En este caso los clasificadores tienen la finalidad de separar las partículas suficientemente finas para ser separadas de las partículas demasiado gruesas que deben ser remolidas y, además, éstos últimos no deben retornar al molino con una demasiada cantidad de agua si la molienda es por vía húmeda.

Los Hidrociclones

Los clasificadores, producen una separación por la aceleración centrífuga ejercida por la trayectoria circular de la pulpa, bombeando bajo presión al aparato dentro de éste.

Su principio de clasificación, véase Figura 8, consiste en alimentar la pulpa a clasificar en forma tangencial a la altura de la parte cilíndrica originando un torbellino a lo largo de la superficie interior, que arrastrará partículas gruesas a la descarga (underflow) situada en la parte inferior del vértice cónico (APEX). El líquido contenido en los finos es forzado a evacuado el ciclón por la parte superior que se comunica con la tubería del rebose (VORTEX) formando un torbellino interno.

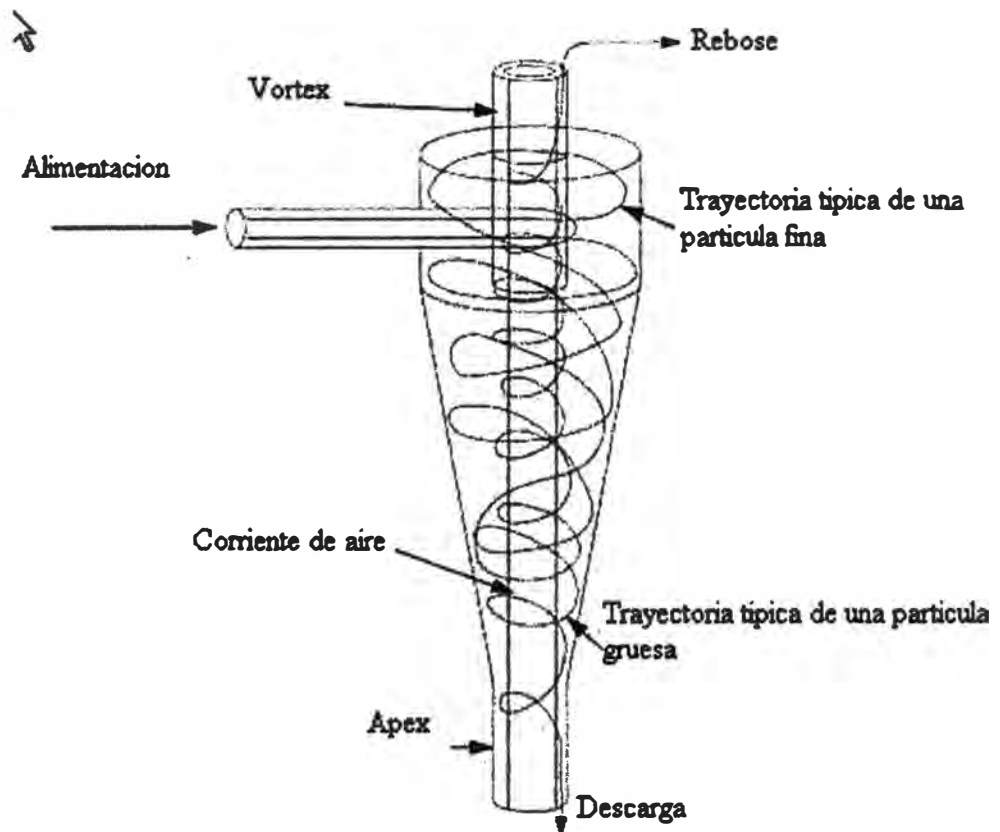


Figura 8: Mecanismo de Clasificación del Hidrociclón

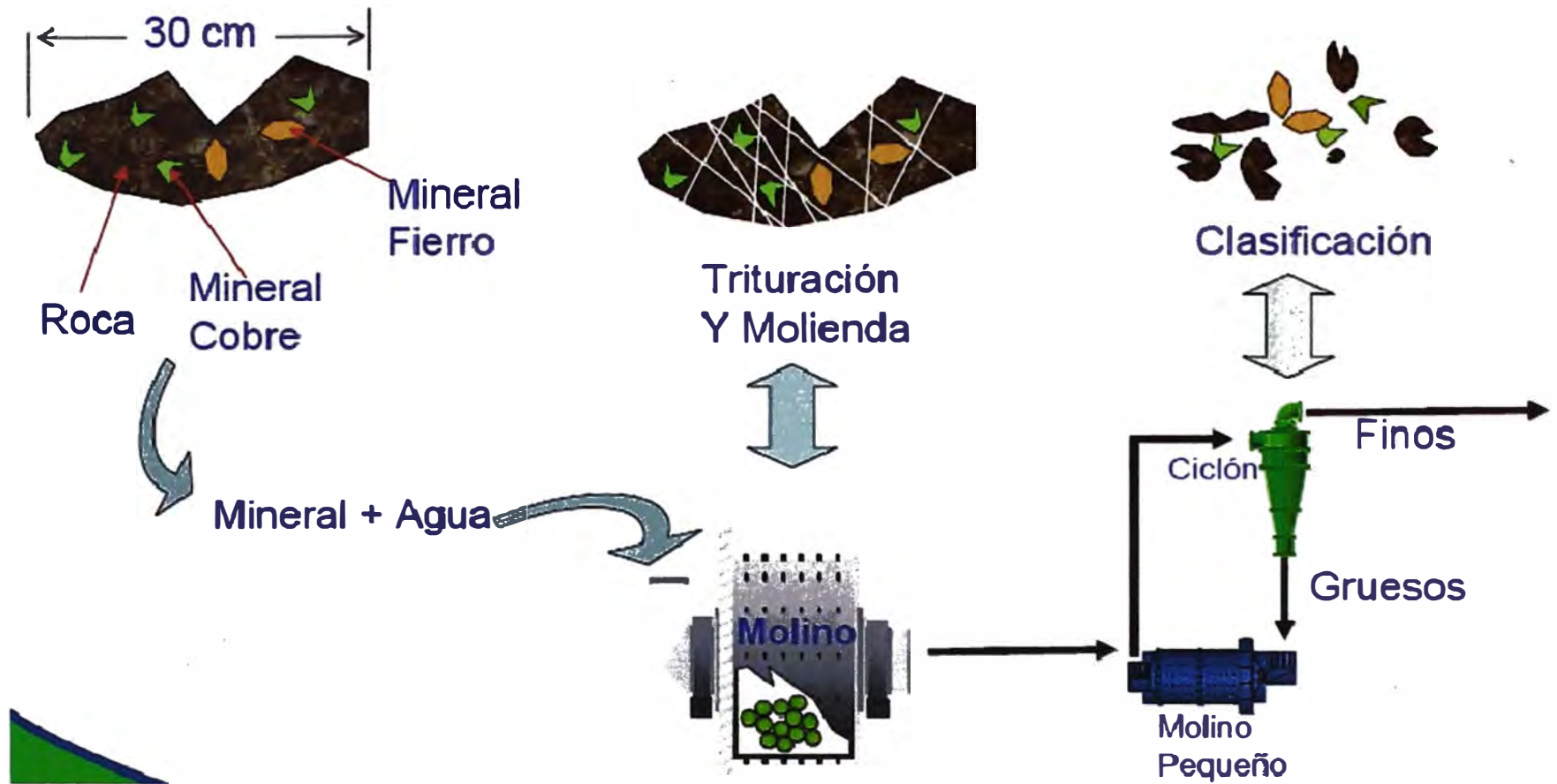


Figura 9: Esquema integrado de los procesos de Chancado, Molienda y clasificación

II.6.5.- FLOTACION

La flotación de los minerales es un proceso fisicoquímico de concentración de minerales, en la cual se procura separar las partículas valiosas de materiales estériles o gangas mediante un movimiento que modifica su tensión superficial para lograr que burbujas de aire finamente divididos se adhieran a las primeras y las enriquezcan en una espuma mineralizada.

Mecanismo de la Flotación

Observemos que sucede para que una partícula de mineral y una burbuja de aire formen una unión estable, véase la Figura 10 y la Figura 11.

Con respecto a las partículas de minerales, es sabido que pocas de ellas tienen propiedades hidrofóbicas suficientemente fuertes como para que puedan flotar. En primer lugar, en la gran mayoría de los casos hay que romper enlaces químicos (covalentes e iónicos principalmente) para efectuar la liberación del mineral. Esto inmediatamente lleva a la hidratación de la superficie del mineral.

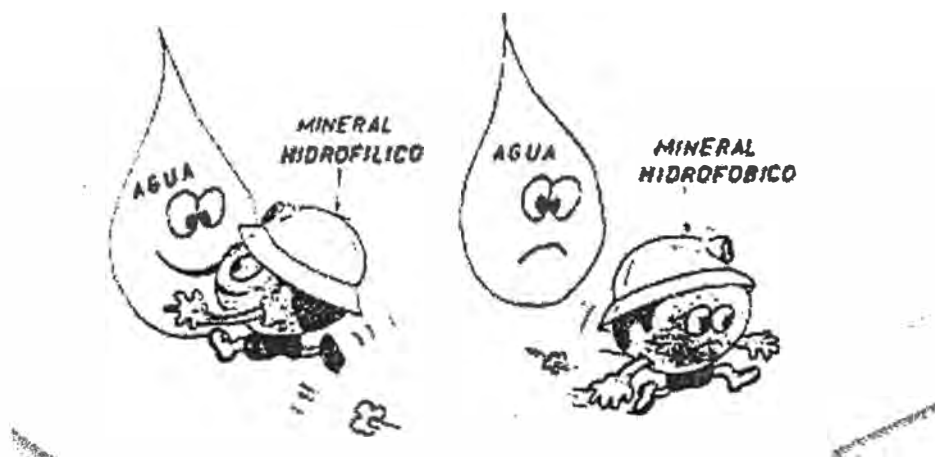


Figura 10: Comportamiento de minerales hidrofóbicos e hidrofílicos respecto al agua (a)

En resumen, es necesario hidrofobizar las partículas minerales en la pulpa para hacerlas flotables. Esto se efectúa con los reactivos llamados colectores, que son generalmente compuestos orgánicos heteropolar, o sea, una parte de la molécula es un compuesto evidentemente apolar (hidrocarburo) y la otra es un grupo polar con propiedades iónica = propiedades eléctricas.

Para facilitar la absorción de estos reactivos sobre la superficie de las partículas minerales hay que crear condiciones favorables en la capa doble de cargas eléctricas, lo que se hace con los reactivos llamados modificadores.

La partícula mineral queda cubierta por el colector que se afirma en su red cristalina por medio de su parte polar, proporcionándole con la parte apolar propiedades hidrofóbicas (propiedades no mojables), véase Figura 11.

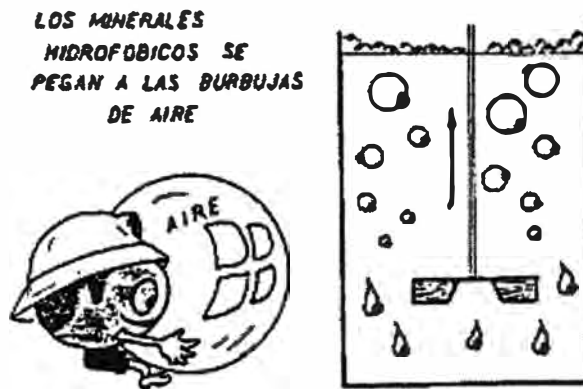


Figura 11: Comportamiento de minerales hidrofóbicos e hidrofílicos respecto al agua (b)

El otro componente del futuro agregado partícula - burbuja es la burbuja de aire. Esta es necesaria para:

- Recoger las partículas en la pulpa,
- Transportarlas hacia la superficie.

Los espumantes, que son reactivos tensoactivos, se absorben selectivamente en las interfaces gas-líquido. Las partes polares de estos compuestos tensoactivos se orientan hacia el agua y la parte apolar hacia la burbuja misma.

Las partículas y burbujas están en una constante agitación, debido a los rotores de las máquinas de flotación, de modo que para realizar su unión son necesarios:

- Su encuentro.
- Condiciones favorables para formar el agregado.

El encuentro se realiza por el acondicionamiento y la agitación dentro de la máquina misma.

Etapas de la Flotación

El mecanismo esencial de la flotación comprende la anexión de partículas minerales a las burbujas de aire, de tal modo que dichas partículas son llevadas a la superficie de la pulpa mineral, donde pueden ser removidas, véase Figura 12 y Figura 13. Este proceso abarca las siguientes etapas:

1. El mineral es molido húmedo hasta aproximadamente 48 mallas (297 micrones).
2. La pulpa que se forma, es diluida con agua hasta alcanzar un porcentaje de sólidos en peso entre 25% y 45%.
3. Se adiciona pequeñas cantidades de reactivos, que modifican la superficie de determinados minerales.
4. Otro reactivo, específicamente seleccionado, se agrega para que actúe sobre el mineral que se desea separar por flotación. Este reactivo cubre la superficie del mineral haciéndola aerofílica e hidrofóbica.
5. Luego se adiciona otro reactivo, que ayuda a establecer una espuma estable.

6. La pulpa químicamente tratada en un depósito apropiado, entra en contacto con aire introducido por agitación o por la adición directa de aire a baja presión.
7. El mineral aerofílico, como parte de la espuma, sube a la superficie de donde es extraído. La pulpa empobrecida, pasa a través de una serie de tanques o celdas, con el objetivo de proveer tiempo y oportunidad a las partículas de mineral para contactar burbujas de aire y pueden ser recuperadas en la espuma.

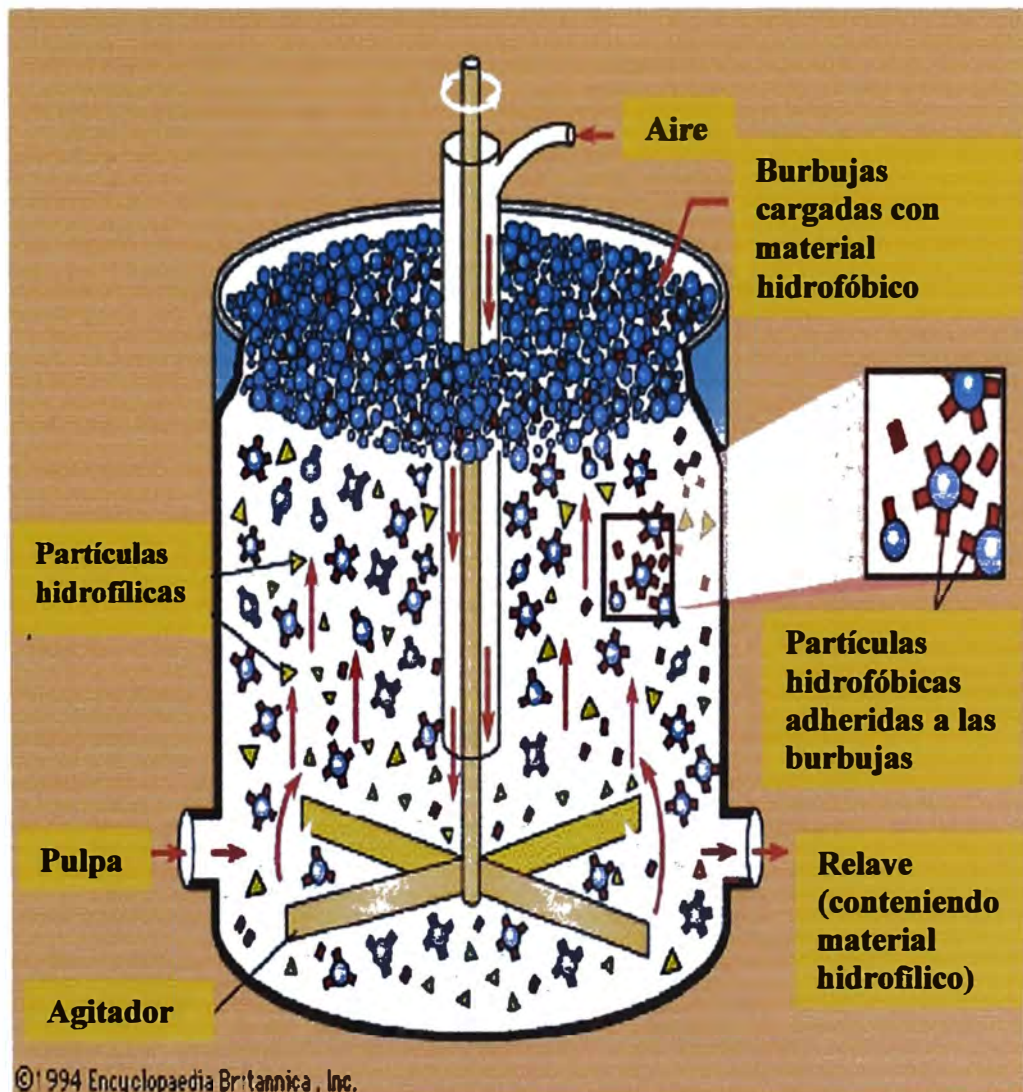


Figura 12: Esquema flotación por espuma

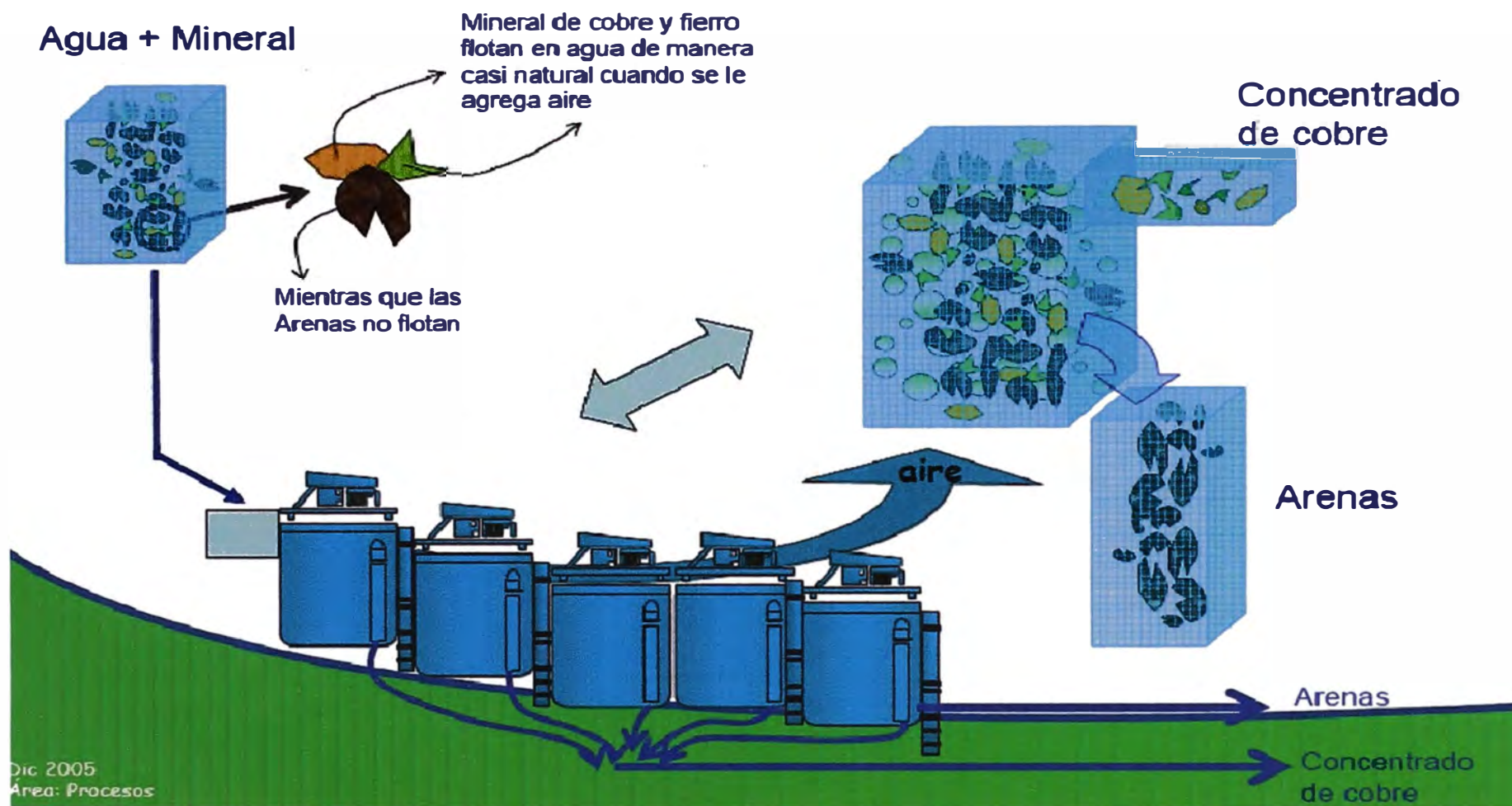


Figura 13: Esquema del proceso de flotación

Variables Operacionales

Las variables operacionales más importantes en la flotación de los minerales y que influyen sobre el grado del proceso son:

- Granulometría
- Tipo de reactivo
- Dosis de reactivo
- Densidad de pulpa
- Aireación
- Regulación del pH
- Tiempo de residencia
- Calidad del agua

La flotación se realiza en equipos denominados celdas de flotación, cuyo objetivo es separar en forma satisfactoria el concentrado. La función de las celdas será entre otros mantener en suspensión las partículas de la pulpa evitando la segregación de las partículas, véase Figura 14.

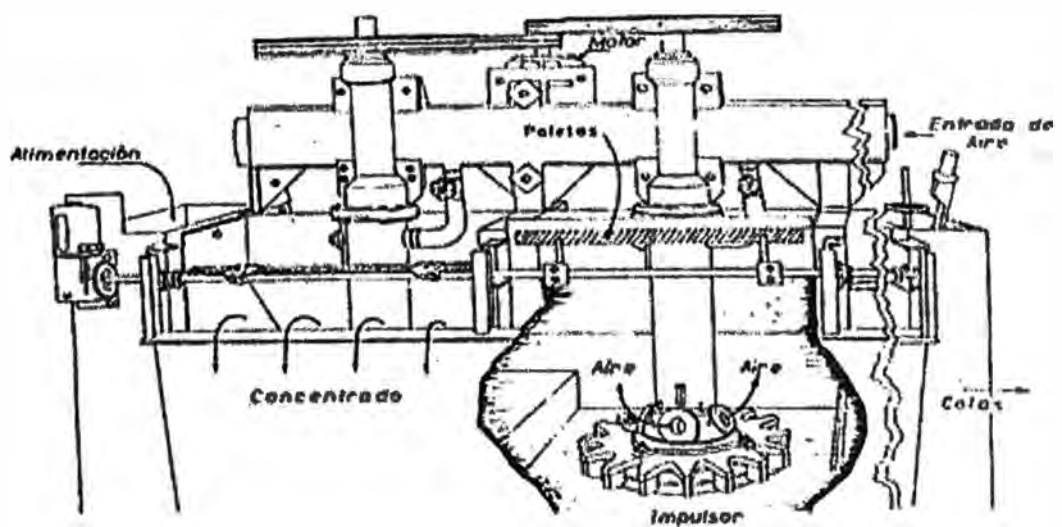


Figura 14: Sección transversal de un banco de celdas de flotación.

II.6.6.- LOS REACTIVOS DE FLOTACION

Los reactivos de flotación corresponden a sustancias orgánicas que promueven, intensifican y modifican las condiciones óptimas del mecanismo fisico-químico del proceso.

Los reactivos de flotación, son el componente y la variable más importante del proceso de flotación, debido a que no puede efectuarse ésta sin la participación de los reactivos.

Siendo estos reactivos sustancias muy importantes para la flotación de minerales, ya que influyen en el proceso con una gran sensibilidad. No sólo por el tipo de reactivo que se agrega, sino que también influye toda la combinación de reactivos, su dosificación, así como los puntos y medios en los que se alimentan en los circuitos.

Los efectos que pueden producir otras variables como la molienda, la aireación, la densidad de pulpa, etc., no superan en importancia a los efectos que produce una dosificación de reactivos.

La selección de los mejores reactivos de flotación es una etapa muy compleja, la absorción de los reactivos se basa en el equilibrio de iones de la pulpa que determina el potencial cinético, el potencial electroquímico y la hidratación de las partículas de mineral. Este equilibrio es difícil de controlar o prever, ya que aparte de los reactivos, en la pulpa existe una cantidad considerable de iones provenientes de las impurezas que trae el mineral y las aguas utilizadas.

Los reactivos de flotación, son productos químicos naturales o artificiales, que aseguran que la flotación de minerales sea selectiva y eficiente y produce condiciones óptimas para mejorar este método de concentración de minerales. Son

generalmente surfactantes o modificadores de la superficie de los minerales. En la Figura 15 se muestra una clasificación de los reactivos de flotación en tres categorías.

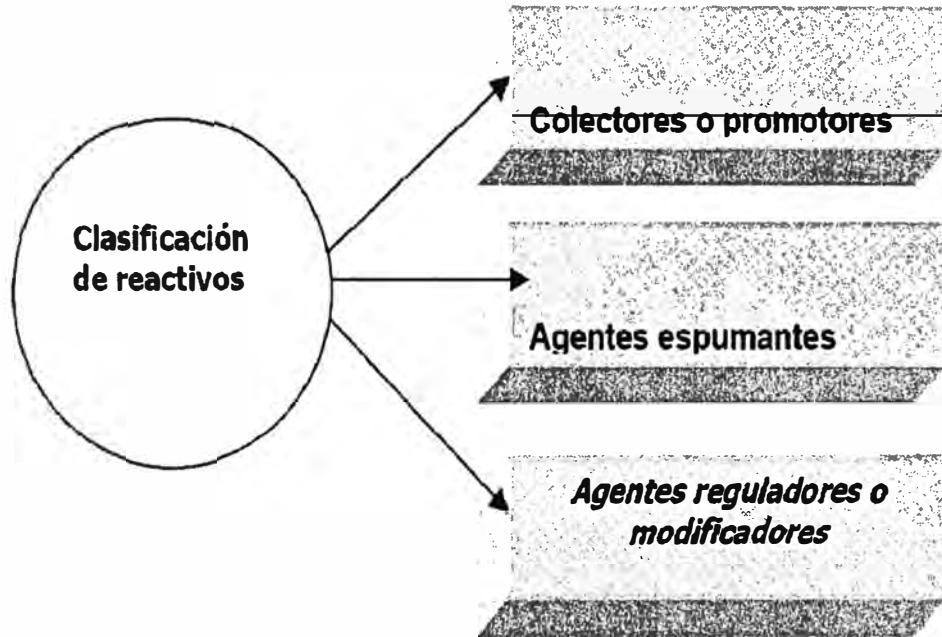


Figura 15: Clasificación de los reactivos de flotación

LOS COLECTORES O PROMOTORES

Son sustancias orgánicas que se adsorben en la superficie del mineral, confiriéndole características de repelencia al agua (Hidrofobicidad)

Son compuestos químicos orgánicos que actúan selectivamente en la superficie de ciertos minerales, haciéndolos repelentes al agua o aerofílicos y asegurando la acción de las burbujas de aire.

El Colector constituye el corazón del proceso de flotación puesto que es el reactivo que produce la película hidrofílica sobre la superficie del mineral.

La gran mayoría de los colectores comerciales son moléculas complejas, estructuralmente asimétricas, compuestas de una parte polar y de una no polar, con propiedades diferentes. El extremo no polar se orienta hacia el agua, debido a que difícilmente reacciona con los dipolos del agua y por consiguiente tiene propiedades fuertes para repeler al agua y el extremo polar hacia el mineral, debido a la superficie del mineral que presenta una respuesta frente a esta parte de los colectores. Esto hace que la superficie de mineral cubierta por las moléculas de los colectores se haga hidrofóbica.

En la figura 16, se puede observar la reacción de un colector sobre una partícula de mineral de sulfuro.



Figura 16: Representación esquemática de la reacción de un colector sobre una partícula mineral de sulfuro.

Entre los colectores más usados se pueden citar los siguientes:

- Los Xantatos son colectores fuertes, menos selectivos y de acción rápida.
- Los ditiofosfatos o aerofloats son más selectivos, menos fuertes y de acción relativamente lenta.

Xantatos

Los xantatos se denominan por su radical alcohólico (R) y el metal alcalino (K o Na), véase Figura 17, o por el nombre comercial de sus fabricantes originales más importantes como la Dow Chemical Co. Cytec.

Los xantatos disponibles en el mercado y que corresponden a los principales productores como American Cyanamid, Dow Chemical, Minerec y en el caso peruano, Reactivos Nacionales S.A. (RENASA), son los siguientes:

- Xantato etílico de potasio (Z – 3)
- Xantato etílico de sodio (Z – 4)
- Xantato isopropílico de sodio (Z – 11)
- Xantato isobutílico de sodio (Z – 14)
- Xantato butílico secundario de sodio (Z – 12)
- Xantato amílico de potasio (Z – 6)

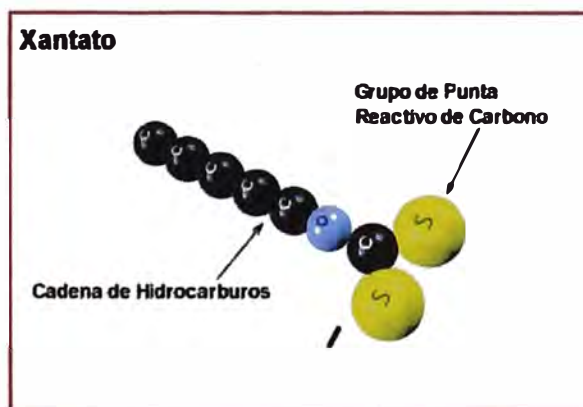


Figura 17: Estructura del Xantato

Ditiofosfatos

Fueron desarrollados originalmente por la firma American Cyanamid Co. con el nombre de "Aerofloat". Se fabrican a partir del pentasulfuro de fósforo y del ácido

cresílico (Aerofloat 25). Los ditiofosfatos se diferencian de los xantatos por la presencia (en algunos de ellos) del espumante, ácido cresílico y por tener en su fórmula estructural una cadena con doble grupo alifático.

LOS ESPUMANTES

Son sustancias orgánicas de superficies activas heteropolares, que se concentran por absorción en las interfases aire – agua, ayudando a mantenerse a las burbujas de aire dispersas y evitando su coalescencia.

Son agentes tenso activos que se adicionan con la finalidad de:

Estabilizar la espuma.

Disminuir la tensión superficial del agua.

Mejorar la cinética de interacción burbuja-partícula.

Disminuir el fenómeno de unión de dos o mas burbujas (coalescencia)

Si se agrega una pequeña cantidad de espumante al agua, se forma una espuma estable como resultado de la agitación o la introducción de aire en forma dispersa. Los espumantes son usados en dosificaciones que usualmente son menores a 20 g/TM.

Los espumantes más conocidos:

- Aceite de Pino
- Aceite Cresílico
- Metil – isobutil – Carbinol (MIBC)
- Dowfroth 200 ó 250
- Aerofroth 65 ó 70

En las Figuras 18 (a) y (b), respectivamente; se observa la estructura de una molécula de espumante, así como un conjunto de espumas durante el proceso de flotación.

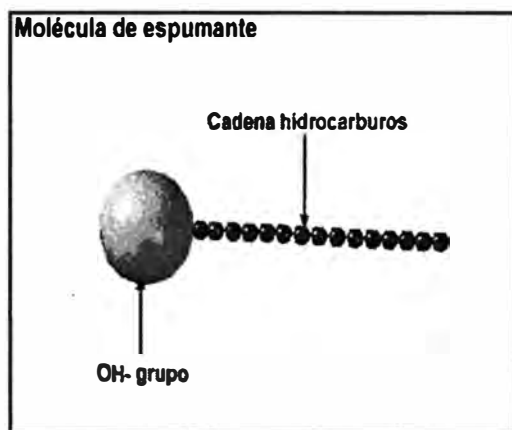


Figura18 (a): Estructura de una molécula de espumante

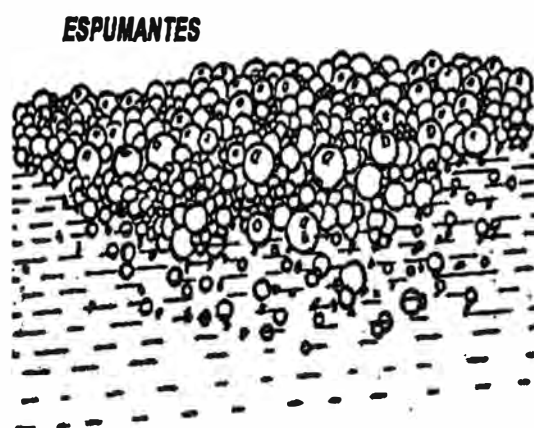


Figura 18 (b): Conjunto de moléculas de espumante

Metodología de evaluación y selección de espumantes

Los colectores y espumantes se emplean generalmente en los rangos de de 0,5-1000 g/Ton. químicamente son surfactantes, es decir, molécula de carácter doble, que consiste de un grupo polar y uno no polar.

El grupo polar posee un momento dipolo permanente y representa la parte hidrofílica de la molécula. El grupo no polar no posee dipolo permanente y representa la parte hidrofóbica de la molécula.

Los surfactantes desempeñan dos funciones en la flotación.

- 1) Se adsorben en la interfase solido/liquido tornando hidrofóbica la superficie del mineral, actuando como colectores.

- 2) Influye en la cinética de la adhesión burbuja/mineral, en este caso actúan como espumantes.

Los surfactante más importante son:

- a) Tio compuestos, que actúan como colectores de sulfuros metálicos.
- b) Compuestos ionizables no-tio, que pueden actuar como colectores o espumantes y sirven para flotar minerales no sulfuros.
- c) Compuestos no iónicos, que actúan como espumantes principalmente.

MODIFICADORES O REGULADORES

Son reactivos que se usan para intensificar o reducir la acción de los colectores sobre la superficie del material, tales como activadores, depresores o modificadores de pH. Estos reactivos son todos inorgánicos y se emplean en dosificaciones sustancialmente más altas que los reactivos orgánicos.

Hay modificadores que cambian la superficie de la ganga: forman una capa alrededor de los granos de roca e impiden que estas partículas entren en contacto con los colectores a fin de que no se vuelvan flotables.

También hay modificadores que cambian las superficies de algunos sulfuros valiosos y no de otros: esta modificación no permite que floten ciertos sulfuros valiosos y en otros casos permite que floten otros sulfuros valiosos.

Los modificadores se clasifican en:

- Reguladores de pH (cal, Na_2CO_3 , NaOH, H_2SO_4)
- Depresores (NaCN, ZnSO_4 , NaHSO₃, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, NaHS)
- Activadores (CuSO_4 , $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$)
- Dispersantes (Na_2SiO_3)
- Sulfurantes (Na_2S , NaHS)

Los modificadores son empleados en cantidades que varían entre 20-1000 g/Ton.

MODIFICADOR-DEPRESOR

Son reactivos que impiden la flotación de algunos sulfuros, mientras se hace flotar a otros sulfuros valiosos.

Los depresores impiden que los colectores se acerquen y se peguen a ciertos sulfuros. Hacen que se mojen más las superficies del mineral y se hundan. Despegan los colectores de la superficie del mineral.

En la Figura 19 se puede observar la acción de los depresores en un mineral de sulfuro de cobre.

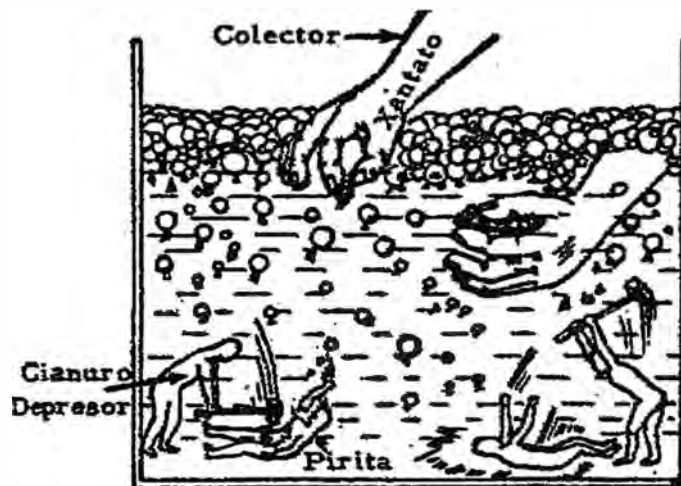


Figura 19: Acción de los depresores

Los depresores más usados y su acción sobre los minerales son:

Cianuro de sodio: Fuerte depresor de pirita, pirrotita, marcasita y arsenopirita. Tiene menor efecto depresor en calcopirita y otros minerales sulfuros.

Sulfato de zinc: Se usa conjuntamente con el cianuro o solo, para deprimir esfalerita mientras se flotan minerales de cobre.

Bisulfito de sodio: También deprime a la esfalerita y a la pirita.

Si no se alimenta a la flotación los depresores:

- Flotarían todos los sulfuros y no se podrían separar.
- En la flotación de la galena, también flotarían la esfalerita y la pirita.

ACTIVADORES-REACTIVADORES.

Activadores: Son reactivos que aumentan la flotabilidad de ciertos sulfuros.

Reactivadores: Restablecen la flotabilidad de un sulfuro que ha sido deprimido.

Los activadores – reactivadores modifican la superficie del mineral para que los colectores se peguen a él, modifican la superficie del mineral para que aumente la cantidad de colector que se pegan a él. En la Figura 20 se muestra una representación de la acción del reactivador sulfato de cobre sobre un mineral de zinc.



Figura 20: Acción del reactivador

Los reactivadores más usados en las Plantas Concentradoras son:

Sulfato de cobre. Reactiva la esfalerita. La esfalerita es deprimida en el circuito de plomo y debe ser reactivada para que flote en el circuito de zinc.

También reactiva a la calcopirita, pirita, arsenopirita, pirrotita y cuarzo (ganga).

Sulfuro de sodio. Activador de los minerales oxidados.

Oxígeno. Activador de sulfuros y algunos óxidos

DISPERSANTES

Son reactivos que dispersan las partículas lamosas estériles y valiosas que se producen por sobremolienda en los molinos. Así, las partículas dispersadas pueden mejorar su agitación, su mezclada con los reactivos y también su depresión o flotación.

Entre los dispersantes mas usados, se citan:

- Silicato de Sodio. Se emplea para dispersar las lamas silicosas y oxido de hierro
- Fosfato monosódico

REGULADORES DE pH.

Son reactivos que controlan la acidez o alcalinidad de la pulpa. Proporcionan a la pulpa el pH necesario (0 – 14) para que cada sulfuro pueda flotar mejor.

La alcalinidad favorece a la flotación porque:

- Permite la estabilidad de reactivos
- Purifica la pulpa, precipitando algunos minerales.
- Deprime a la pirita (FeS_2)
- Protege de la corrosión al equipo de flotación.

Para cada combinación de mineral-reactivo existe un pH óptimo, mediante el cual un mineral flota mayor facilidad siempre y cuando se aplique el modificador apropiado. Por ejemplo, en la Tabla 2, se muestra el tipo de mineral y el pH más adecuado.

Tabla 2: Rangos de pH para la flotación de minerales

Mineral	pH flotación
Calcopirita	10 - 11
Esfalerita	10 - 11
Galena	7 - 8
Pirita	6 - 6.5

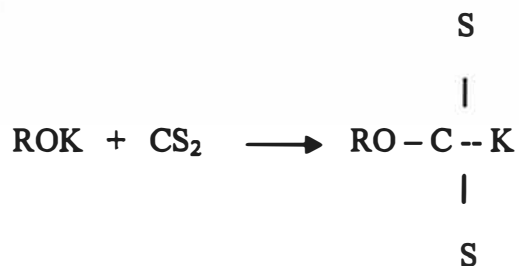
II.6.7 REACTIVOS USADOS EN LA FLOTACION DE COBRE

Los reactivos para la flotación de cobre, desde minerales de cobre.

COLECTORES:

- XANTATO AMILICO DE POTASIO Z-6

Es una sal de ácido Xántico que se produce al reaccionar un alcohol (Alcoholato de potasio) con bisulfuro de Carbono. Es de bajo costo, fuertes propiedades colectoras y buena selectividad.

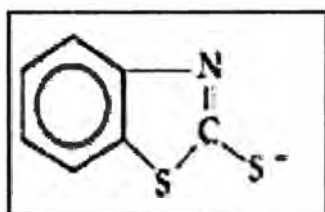


Para la flotación es necesario usar xantato y no ácido xántico porque los últimos son inestables en agua y se hidrolizan con desprendimiento de carbono sulfurado. Por ello con el xantato es necesario hacer la flotación en circuito alcalino o por lo menos neutro, pues en circuito ácido empieza una fuerte hidrólisis.

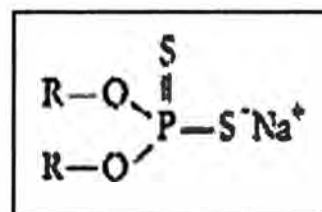
Se usa en cantidades que varia entre 5 y 100 gr/ton y se agregan en forma de soluciones acuosas al 10 %.

- AERO 404 PROMOTER

Usado para la flotación de minerales de cobre cubierto con Pb y Zn y minerales de cobre secundario en circuitos alcalinos.



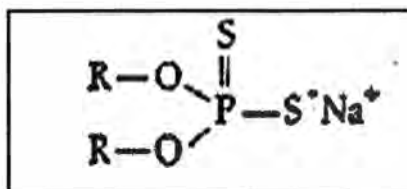
Mercaptobenzoatiasol



Ditioposfato de Sodio

- AEROFLOAT 208 PROMOTER y AEROFLOAT 3408 PROMOTER

Colectores selectivos para minerales de cobre. Excelente colector para oro nativo, plata y Cobre.



Ditioposfato de Dialquil

ESPUMANTES:

- o DOWFROTH – 250: $\text{CH}_3\text{-(O-C}_3\text{H}_6\text{)}_n\text{-OH}$

Es un éter glicólico de polipropileno, espumante extremadamente selectivo, y además es también efectivo a la mitad o cuarta parte de la concentración requerida de otro espumante.

Es un compuesto orgánico heteropolar. El radical orgánico no polar, como el de la molécula colectora de la flotación, repele al agua mientras que la porción polar las atrae. La porción no polar de la molécula de D-250 es única en el sentido de que además de los usuales átomos de carbono e hidrógeno, contiene átomos hidrofílicos de oxígeno. El número y situación de los átomos de oxígeno, es tal, que ayuda a solubilizar esta porción no polar de la molécula. Este concepto contempla que muchas de las moléculas se encuentran en una posición horizontal, más que perpendicular, en una interfaz aire-líquido, y explica las bajas concentraciones requeridas para producir una espuma estable. La extensión de esta idea de átomos hidrofílicos de oxígeno en la porción no polar de las moléculas espumantes, explicaría la aumentada selectividad debido a una menor interacción con las moléculas colectoras polares y con la superficie real de los minerales.

La cantidad de espumante requerida en la flotación es generalmente inferior a 0.15 lb/ton de mineral.

DEPRESORES:

- CIANURO DE SODIO, NaCN
Depresor de sulfuros de Hierro, como la pirita, pirrotita y arsenopirita

- **MEZCLA OXIDANTE (SULFATO DE ZINC Y CIANURO DE SODIO)**
Depresor del Fierro.

REGULADOR de pH:

- CAL, CaO

La cal hace aumenta el pH de la flotación y cambia la polaridad de las soluciones. Esto hace que algunos minerales sean más flotables, pero también que otros minerales floten menos. La Pirita es menos flotable que el cobre con la adición de cal. Esto nos permite aumentar la pureza de los productos. Debido a su bajo costo, la cal se usa en casi todos los circuitos de flotación.

La mayoría de las Plantas de flotación que tratan minerales sulfurados, operan con una pulpa alcalina con objeto de obtener óptimos resultados metalúrgicos, así como evitar la corrosión del equipo que es de metal.

II.7 EL AIRE

El aire en la celda de flotación de minerales cumple dos funciones:

- Ayuda en la agitación de la pulpa.
Forma las burbujas que rodeadas del espumante transportan los sulfuros valiosos hasta la superficie de la pulpa formando las espumas.

La dosificación de aire en las celdas de flotación provoca las siguientes situaciones:

1.- Cuando se usa mucho aire

- El fuerte movimiento producido por el aire, revienta las burbujas ya formadas y por lo tanto no hay buena espumación.

- La pulpa rebalsa las celdas junto con las espumas, pasando ganga o mucho insoluble a los concentrados.

En la Figura 21 se muestra la acción del aire en las celdas de flotación.

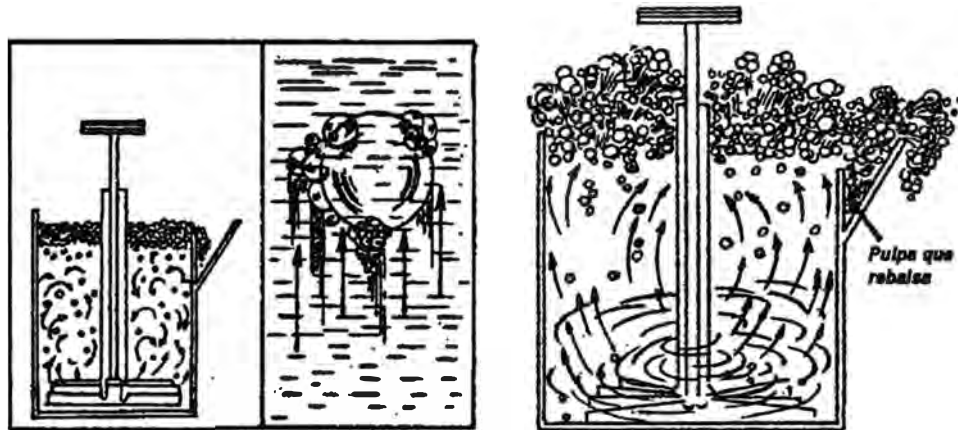


Figura 21: Acción del aire en las celdas

2.- Cuando se usa poco aire

La columna de espumas sería muy baja y los sulfuros valiosos se pasarían a los relaves, con las consecuencias correspondientes, generalmente, la pérdida del material valioso, véase la Figura 22.

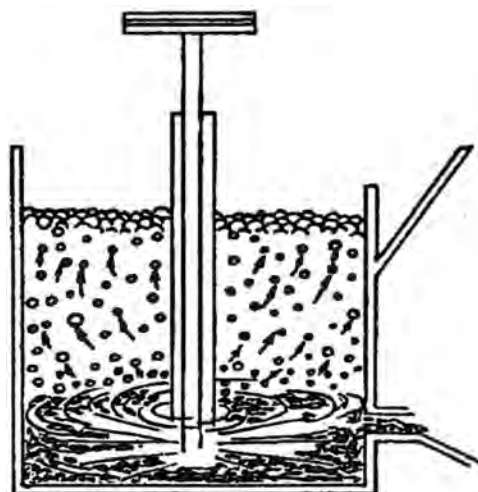


Figura 22: Espuma muy baja ocasionado por la insuficiencia del aire

II.8 LA AGITACIÓN – DISPERSIÓN

La agitación es poner en movimiento las partículas de mineral para mantenerlas suspendidas y que estas no se asienten.

En la Figura 23 se puede observar un proceso de agitación de las partículas de mineral.

La dispersión es separar las partículas de mineral que están reunidas en la pulpa.

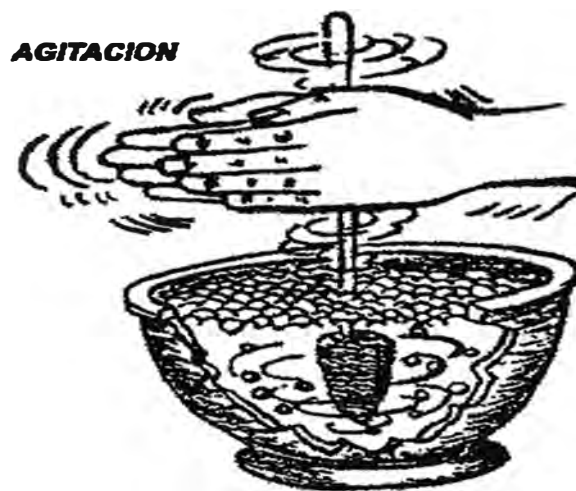


Figura 23: Proceso de agitación.

II.9 FLEXIBILIDAD DE LOS CIRCUITOS DE FLOTACION

Teniendo ya un diseño determinado de un circuito de flotación, es necesario prever variaciones en el flujo de alimentación a la Planta, ya sean más bajos o más altos, así como considerar fluctuaciones en las leyes de los minerales.

Una de las acciones de mitigar fluctuaciones de la ley y proporcionar un flujo uniforme a la Planta es colocando un tanque acondicionador entre la sección de molienda y la Planta de flotación.

Cualquier variación en ley o tonelaje puede ser mitigada por el tanque, de donde el material es bombeado en una proporción controlada a la Planta de flotación. Es ahí también donde los reactivos son acondicionados antes de ingresar a la Planta de flotación. (Véase Figura 24).



Figura 24: Celdas Ws

II.10 HIDROCICLON INCLINADO

El ciclón inclinado se ha implementado, el cual se comporta como un ciclón plano y puede manejar bien los gruesos, aliviar la carga circulante y donde la carga estática es menor.

Los ciclones se inclinan generalmente cuando se desea disminuir los finos en el Under Flow. La inclinación generalmente es de 15-18° con la finalidad de disminuir el contenido de finos en el Under Flow, es decir disminuir el cortocircuito (Véase Figura 25).



Figura 25: Hidrociclón inclinado usado en la Planta.

VENTAJAS DE USO:

- Densidad de pulpa mas alta en el U/F
- Disminución de finos en el U/F
- Disminución de la carga circulante
- Menos costo de mantenimiento del ciclón

II.11 EFECTO CORTOCIRCUITO:

En la practica la clasificación no es perfecta, parte de las partículas finas se unen con la descarga del ciclón y parte de las partículas gruesas salen por el rebalse. La clasificación empeora, es decir, mas partículas finas salen por la descarga y mas

partículas gruesas salen por el rebalse entonces, decimos que el grado de separación disminuye.

Si el grado de separación corresponde a la pendiente $y=x$; entonces:

- En un clasificador perfecto esta línea es vertical.
- Cuando el grado de separación es pobre esta línea se aproxima a la horizontal.

La curva que describe la forma en que un clasificador separa las partículas se denomina Curva de Separación, véase Figura 26.

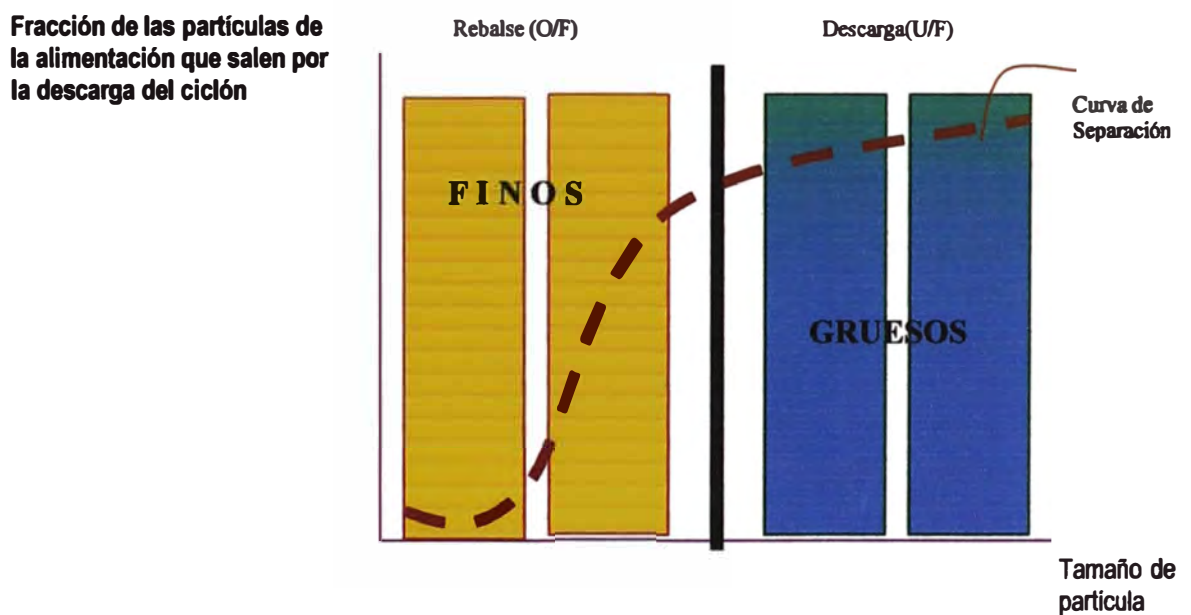


Figura 26: Efecto cortocircuito

II.12 CONTROL DE LA RECUPERACION Y CALIDAD DEL MINERAL

El control de la recuperación y calidad del proceso del mineral en la planta concentradora en forma inmediata, pero no precisa se hace mediante:

1.- Plateo, acción por el cual se lava el mineral con un instrumento denominado plato, véase Figuras 27 y 28.

- Al lavar las espumas de las celdas limpiadoras se realiza el control de la calidad del concentrado.
- Al lavar las espumas de las celdas rougher se realiza el control de la recuperación.
- Al lavar las espumas de la última celda scavenger se realiza el control de la recuperación.
- Al lavar los relaves se realiza el control de la recuperación.

El tiempo de lavado es de cada media hora aproximadamente o cuando se observe que cambian las espumas. Si no se lava con el plato, no habría forma de controlar la flotación.

2.- En el laboratorio químico mediante el análisis químico.



Figura 27: Plateo en el Concentrado



Figura 28: Plateo en el Relave

II.3.- EVALUACION DEL PROCESO

Los índices que se utilizan para evaluar una operación de concentración son:

$$1) \text{ RECUPERACION (R) } = \frac{\text{Contenido Metálico del Concentrado} \times 100}{\text{Contenido Metálico de la alimentación}}$$

$$2) \text{ RAZON DE CONCENTRACION (Rc) } = \frac{\text{Masa de alimentación}}{\text{Masa de Concentrado}}$$

En términos prácticos, se refiere a las toneladas de mineral necesarias de beneficiar para obtener una tonelada de concentrado.

En la figura 29 se muestra un Diagrama de Flujo utilizado para realizar la Evaluación del proceso de flotación.

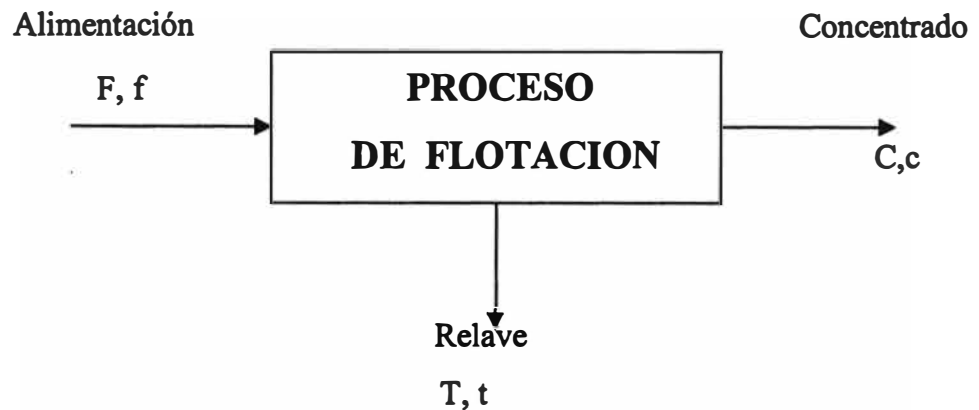


Figura 29: Diagrama de Flujo del Balance Metalúrgico.

$$\text{Recuperación Metalúrgica: } R = \frac{C \cdot c}{F \cdot f} * 100 = \frac{c * (f - t) * 100}{f * (c - t)}$$

$$\text{Razón de Concentración: } R_c = \frac{F}{C} = \frac{c - f}{f - t}$$

Donde:

F, C, T: Flujos Másicos de alimentación, concentrado y relave.

F, c, t: Leyes de alimentación, concentrado y relave.

A) Por Balance de Masa:

$$\text{ENTRADA} = \text{SALIDA}$$

$$F = T + R \dots \dots \dots (1)$$

$$F \times f = T \times t + R \times r \dots \dots \dots (2)$$

Hallando el Peso del Concentrado:

$$F x f = T x t + R x r$$

Reemplazando (2) en (1) :

$$F x f = T x t + (F - T) x r$$

$$F x f = T x t + F x r - T x r$$

$$F x (f - r) = T x (t - r)$$

$$T = F x \frac{(t - r)}{(f - r)} \dots\dots\dots (3)$$

CAPITULO III

ESTUDIO COMPARATIVO DE OBTENCION DE CONCENTRADOS DE COBRE A PARTIR DE SULFUROS PRIMARIOS Y SECUNDARIOS DE COBRE

III.1 DESCRIPCION DEL PROCESO A EVALUAR

Inicialmente desde la cancha de gruesos se realiza una inspección física al mineral de cabeza, y así poder determinar cualitativamente su contenido mineralógico y ley.

a) De la Caracterización Física del mineral

Para el tratamiento de un mineral se procede primero a la caracterización física del mismo, se determina que tipos de minerales contiene.

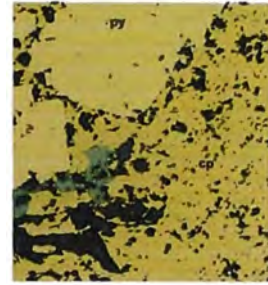
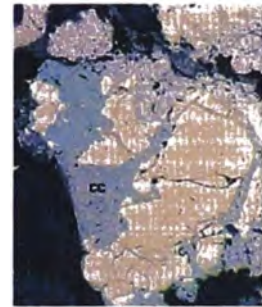
Si dicho mineral de cabeza proviene de la zona de sulfuros hipógenos (zona de baja ley), entonces contendrá en su mayoría Calcopirita. (Véase Figura 30).

Si por el contrario el mineral de cabeza proviene de la zona de sulfuros supergenos (zona de alta ley), contendrá además de calcopirita, en su mayoría Calcosina, Covelina y Bornita. (Véase Figura 30).

Hay que tener en cuenta que aparte de las mencionadas menas de Cobre también contiene minerales de Hierro, como son: pirita (FeS_2), pirrotita ($\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}_2$), hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4), etc.

b) De la Trituración y Molienda

Luego se envía el mineral hacia la Tolva de Gruesos, donde se realiza la primera reducción en una Chancadora Primaria, hasta un tamaño de 100 mm; si el material así lo requiere se procede a una segunda trituración en la Chancadora Secundaria,

**Calcopirita****Covelina****Calcosina****Bornita****Figura 30: Minerales de Cobre**

hasta un tamaño de 10 mm. Posteriormente mediante una faja transportadora el material es conducido hacia la Tolva de Finos, para luego ser trasladado por una faja alimentadora hacia el Molino 5'x 6', con el que se conseguirá llegar al grado de liberación adecuado, hasta 100 μ m, y se completara el grado de liberación necesario para la etapa de concentración.

Un proceso Convencional utilizado en la mayoría de la Plantas Concentradoras se muestra en la Fig. 31, obsérvese la posición del Hidrociclón (Vertical) y el arreglo del circuito de Flotación.

c) De la Flotación

i.- Flotación de Minerales de la zona de sulfuros supergenos, si el mineral procede de la zona de sulfuros supergenos, entonces se dice que tiene Ley de Cabeza Alta. En este caso se procede al tratamiento del mineral aplicando el diagrama de Proceso descrito en la Figura 32.

Para este estudio se procesó el mineral del Productor AGROMIN, obsérvese la leve inclinación del hidrociclón, de aproximadamente 18° con respecto a la horizontal; la dosificación de reactivos para este tratamiento, ver Tabla 3; el arreglo en el circuito de flotación con la inclusión de las celdas Ws, no solo como acondicionadores, sino también como celdas en los cuales ya se obtendrán concentrados recuperables.

En cada guardia de doce horas se procede a realizar el análisis de contenido de cobre tanto en la cabeza, concentrado y relave, respectivamente, como se muestra en la Tabla 4.

El análisis químico promedio para 405,14 TMH se muestra en la Tabla 5.

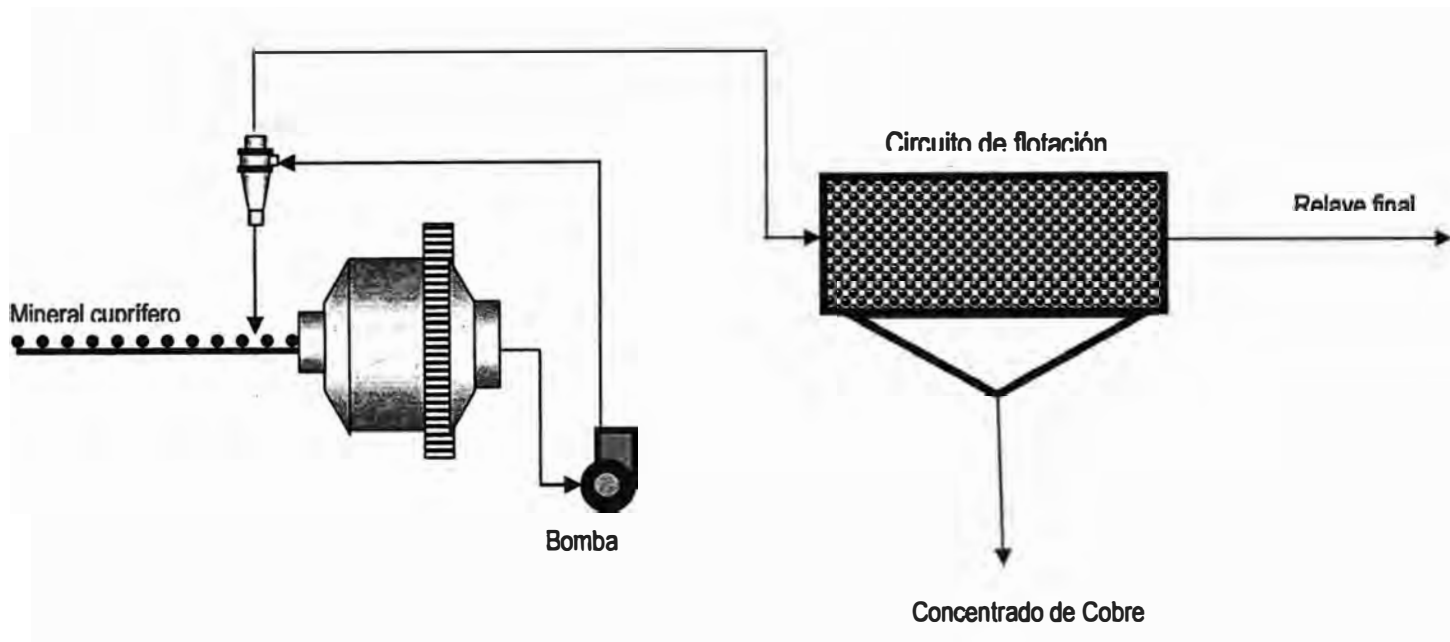


Figura 31: Diagrama de Flujo del Proceso de Molienda-Flotación Convencional

Tabla 3: Dosificación de reactivos

Reactivo	Dosificación, Kg
Xantato Z-6	4,00
Aerofloat 404	33,00
Aerofloat 208	6,00
Cianuro de Sodio	10,00
Sulfato de Zinc	10,00
Cal Apagada	1755,00
Dowfroth-250	33,00
TMH Tratadas: 405,14	

Tabla 4: Contenido de cobre en la cabeza, concentrado y relave

PRUEBA	FECHA	PRODUCTOR	TURNO	CABEZA	Ccu	RELAVE
052	13/07/2009	AGROMIN	Día	5,38	38,49	0,42
053	13/07/2009	AGROMIN	Noche	5,60	42,64	0,53
054	14/07/2009	AGROMIN	Día	4,89	40,48	0,43
055	14/07/2009	AGROMIN	Noche	7,19	43,28	0,57
056	15/07/2009	AGROMIN	Día	5,93	42,33	0,59
057	15/07/2009	AGROMIN	Noche	6,44	44,47	0,53
058	16/07/2009	AGROMIN	Día	5,92	38,39	0,48
059	16/07/2009	AGROMIN	Noche	7,30	44,10	0,59
060	17/07/2009	AGROMIN	Día	6,11	40,56	0,47

Fuente: Reportes de Laboratorio de la Planta Concentradora PC

Tabla 5: Análisis químico promedio de todo el proceso

PRODUCTOR	CABEZA	CCu	RELAVE
AGROMIN	6,08	41,64	0,51

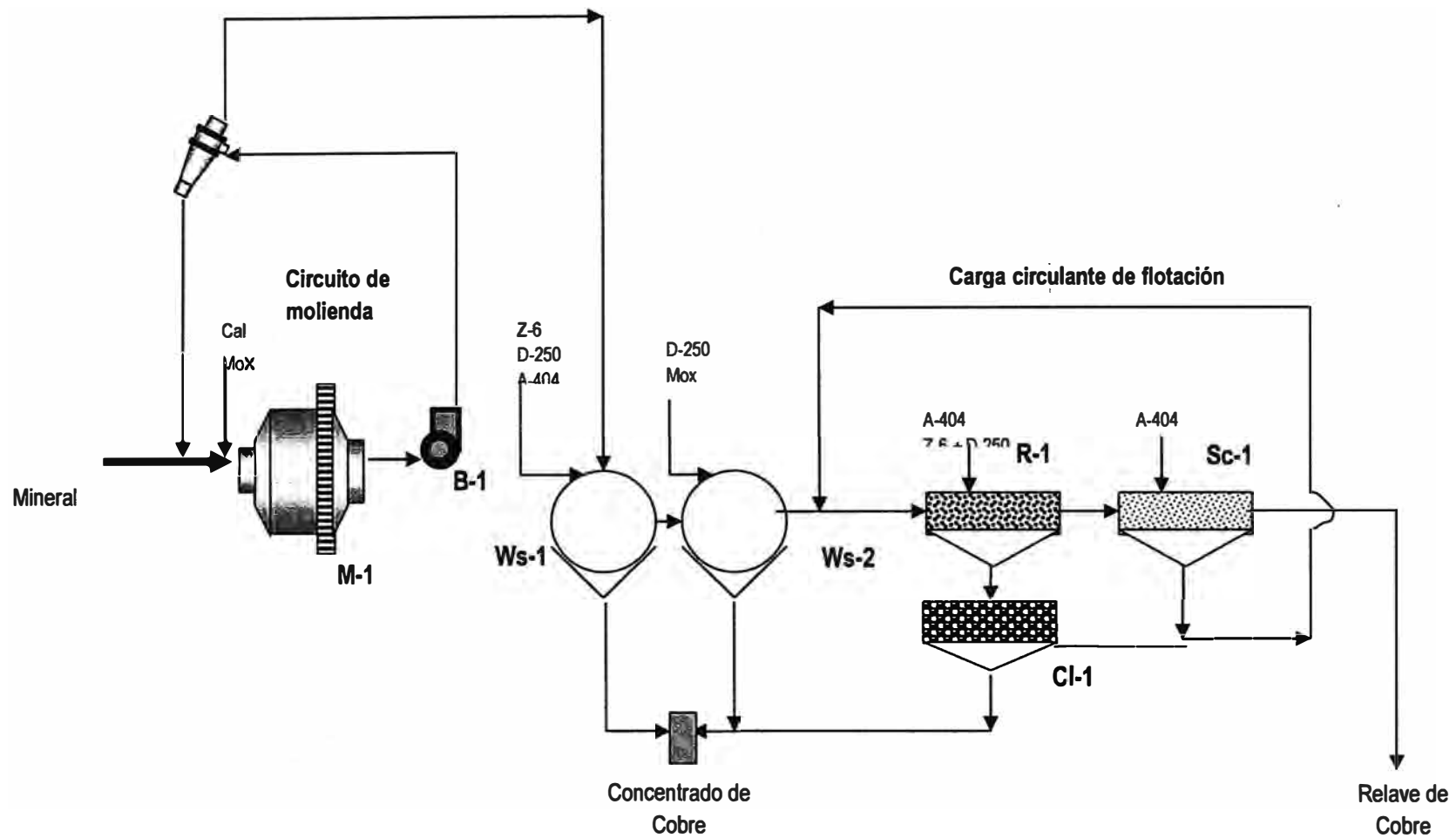


Figura 32: Diagrama de Flujo del Proceso de Molienda-Flotación para minerales con alta ley de cabeza

ii.- **Flotación de Minerales de la zona de sulfuros hipógenos**, si el mineral procede de la zona de sulfuros hipógenos, entonces se dice que tiene Ley de Cabeza Baja.

Para este estudio se procesó el mineral del Productor TANTA, entonces procedemos el tratamiento según lo mostrado en la Figura 31. Para la primera guardia, se verifica las leyes correspondientes como se ve en la Tabla 6.

Tabla 6: Leyes de cabeza concentrado y relave para la primera guardia

PRODUCTOR	CABEZA	CCu	RELAVE
TANTA	2,69	22,34	0,12

Se observa que para un mineral de baja ley de cabeza se obtiene como ley de Concentrado 22,34 % de Cu, pero el requerimiento del cliente es de 25,00 % de Cu, por lo cual se opta por hacer un nuevo análisis, en el que también se debe tener en cuenta la ley de Cu que presenta el Tanque 1 (Ws), reportando las leyes que se indican en la Tabla 7.

Tabla 7: Leyes de cabeza, concentrado y en el Ws

PRODUCTOR	CABEZA	Ws	CCu	RELAVE
TANTA	1,83	24,9	21,4	0,18

Se observa que la ley de Cu del Ws es 24,90 %, por lo que se opta por limpiar mas el concentrado del Tanque 2, modificando el flujo del concentrado de dicho tanque hacia la celda Cleaner, véase Diagrama de Procesos de la Figura 33; así como también modificar la dosificación de reactivos, véase la Tabla 8.

Para cada guardia de doce horas hay que proceder a realizar el análisis de contenido de cobre tanto en la cabeza, concentrado y relave, véase Tabla 9.

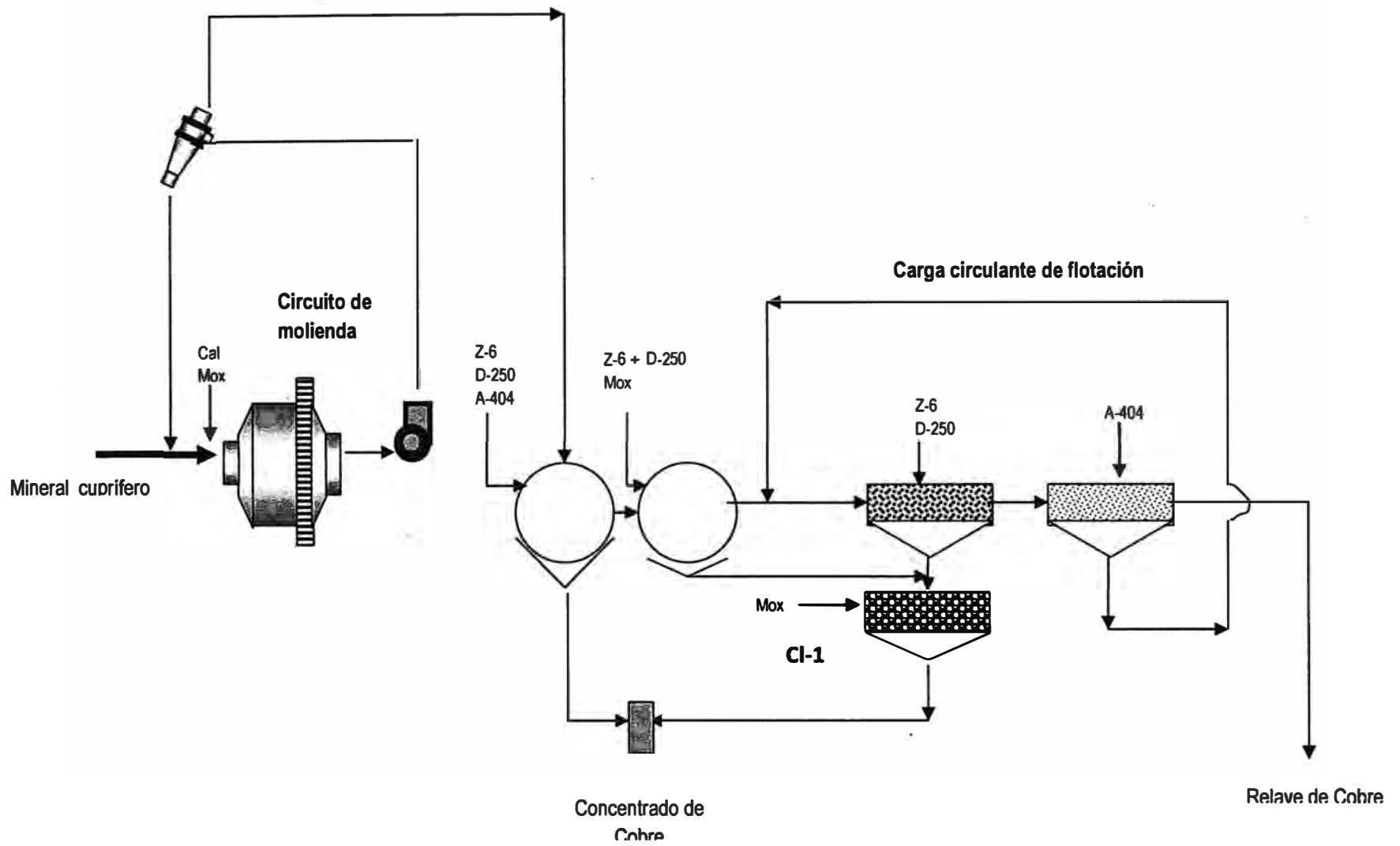


Figura 33: Diagrama de Flujo del Proceso de Molienda-Flotación para minerales con baja ley de cabeza

Tabla 8: Dosificación de Reactivos

Reactivo	Dosificación (Kg)
Xantato Z-6	4,00
Aerofloat 404	18,00
Aerofloat 208	
Cianuro de Sodio	10,00
Sulfato de Zinc	10,00
Cal Apagada	2150,00
Dowfroth-250	18,00
TMH Tratadas	219,29

Tabla 9: Contenido de cobre en la cabeza, concentrado y relave para cada guardia de doce horas

PRODUCTOR	CABEZA	Ws	Ccu	RELAVE
TANTA	1,83	24,9	21,40	0,18
TANTA	2,56		26,07	0,18
TANTA	2,79		25,91	0,18
TANTA	2,44		27,68	0,18
TANTA	3,05		24,67	0,12

Fuente: Reportes de Laboratorio de la Planta Concentradora PC

El análisis químico promedio para 219,29 TMH, véase Tabla 10.

Tabla 10: Análisis químico promedio de todo el proceso

PRODUCTOR	CABEZA	CCu	RELAVE
TANTA	2,45	25,25	0,15

III.2 RESULTADOS

a) CONSUMO DE REACTIVOS

En base a los tratamientos ya efectuados en ambas campañas, se presenta una comparación con respecto al consumo de Reactivos: AGROMIN (Alta ley de Cu) y TANTA (Baja ley de Cu) en g. o Kg. por TM tratada, véase la Tabla 11.

Tabla 11: Consumo de reactivos por campaña

Reactivo	AGROMIN		TANTA	
	Dosif. Kg.	Kg/ TM	Dosif. Kg.	Kg/ TM
Xantato Z-6	4,00	9,87	4,00	18,24
Aerofloat 404	33,00	81,45	18,00	82,08
Aerofloat 208	6,00	14,80	0,00	0,00
Cianuro de Sodio	10,00	24,68	10,00	45,60
Sulfato de Zinc	10,00	24,68	10,00	45,60
Cal Apagada	1755,00	4,33	2150,00	9,80
Dowfroth-250	33,00	81,45	18,00	82,08
TMH Tratadas	405,14		219,29	

b) EVALUACION METALURGICA: AGROMIN

En la Tabla 12 se presenta la evaluación metalúrgica para la Campaña AGROMIN (alta ley de Cu).

- Se obtiene 58,04 TM de Concentrado de Cu con una ley de 41,54%.
- Se observa que para este mineral se consigue una recuperación del 97,89%.
- El ratio de Concentración nos indica que por cada 6.98 TM de mineral se obtiene 1TM de concentrado.

Tabla 12: Evaluación Metalúrgica según producción calculada

Propietario:	AGROMIN					
PRODUCTO	TM	LEY	CONTENIDO	RECUPERACION	RATIO	
		% Cu	Cu (TM)	% Cu		
Cabeza	405,14	6,08	24,63	100,00		
Conc Cu	58,04	41,54	24,11	97,89	6,98	:1
Relave Gral.	347,10	0,15	0,52	2,11		
Cabeza Calc.	405,14		24,63	100,00		

c) EVALUACION METALURGICA: TANTA según el arreglo de la Figura 32
 En la Tabla 13 se presenta la evaluación metalúrgica para la Campaña TANTA (baja ley de Cu), para el caso de que no se hubiese hechos las modificaciones recomendadas.

Tabla 13: Evaluación Metalúrgica según producción calculada

Propietario:	TANTA					
PRODUCTO	TM	LEY	CONTENIDO	RECUPERACION	RATIO	
		% Cu	Cu (TM)	% Cu		
Cabeza	219,29	2,26	4,96	100,00		
Conc Cu	21,30	21,87	4,66	94,01	10,29	:1
Relave Gral.	197,99	0,15	0,30	5,99		
Cabeza Calc.	219,29		4,96	100,00		

- o Se obtiene 21,30 TM de Concentrado de Cu con una ley de 21,87 %.
- o Se observa que para este mineral se consigue una recuperación del 94,01 %.
- o El ratio de Concentración nos indica que por cada 10,29 TM de mineral se obtiene 1TM de concentrado.

d) EVALUACION METALURGICA: TANTA según el arreglo de la Figura 33
 En la Tabla 14 se presenta la evaluación metalúrgica para la Campaña TANTA (baja ley de Cu), en el caso de realizar las modificaciones recomendadas.

Tabla 14: Evaluación Metalúrgica según producción calculada

Propietario:	TANTA					
PRODUCTO	TM	LEY	CONTENIDO	RECUPERACION	RATIO	
		% Cu	Cu (TM)	% Cu		
Cabeza	219,29	2,71	5,94	100,00		
Conc Cu	21,53	26,08	5,62	94,51	10,18	:1
Relave Gral	197,76	0,165	0,33	5,49		
Cabeza Calc.	219,29		5,94	100,00		

- o Se obtiene 21,53 TM de Concentrado de Cu con una ley de 26,08 %.
- o Se observa que para este mineral se consigue una recuperación del 94,51 %.
- o El ratio de Concentración nos indica que por cada 10,18 TM de mineral se obtiene 1TM de concentrado.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES

1.- Una Planta que se dedica al servicio de Tratamiento de Minerales, que tiene como objetivo satisfacer las necesidades de un cliente y de diferentes clientes ha de esperar recibir muchos tipos de minerales, por lo que antes que nada debe realizar una inspección física para determinar las **CARACTERISTICAS MINERALOGICAS** y determinar alternativas de tratamiento a realizar de modo que pueda cumplir con el objetivo trazado, que es el de satisfacer al cliente.

2.- Contar con un Laboratorio Químico en una Planta es muy importante, ya que reporta leyes a tiempo a fin de poder verificar o modificar el tratamiento realizado. Otro servicio también importante es el contar con un Laboratorio Microscópico, ya que también se conocería a tiempo y con certeza de que minerales, el tipo de amarre y el grado de liberación que debería tener el material a tratar de modo de obtener un buen concentrado.

3.- Es de esperarse que aquellos minerales que provienen de la zona de sulfuros hipógenos no tendrán un alto contenido de Cobre en sus concentrados en comparación con los minerales que provienen de la zona de sulfuros supérgenos; ya que en los primeros el Hierro se encuentra en la naturaleza mayoritariamente como Calcopirita (FeCuS_2), haciendo de esta manera que su concentración de Cobre sea menor. (Véase Tabla 1)

4.- Comparando las Tablas 12 y 13 los ratios de concentración obtenidos en ambos casos son casi iguales; pero la diferencia se va a dar en el valor económico, el cual va a ser mayor en el que tenga mayor concentrado, para este caso en el que se hizo la modificación, cuyo valor de la ley del concentrado de cobre fue de 26,08 %

CAPITULO V

BIBLIOGRAFIA

1. Bueno Héctor, Mineralurgia del cobre
2. CETEMIN, Flotación de minerales polimetálicos, Año 2008
3. CETEMIN, Manual de Procesamiento de Minerales: Flotación 1, Año 2008
4. CETEMIN, Manual de Procesamiento de Minerales: Flotación 2, Año 2008
5. CETEMIN, Manual de Procesamiento de Minerales: Molienda 1, año 2008
6. CETEMIN, Manual de Procesamiento de Minerales: Molienda 2, Año 2008
7. CYTEC, Mining Chemical Handbook, Año 2002
8. Dan Marshall, C. D. Anglin and Hamid Mumin, Geological Association of Canadá, Ore Mineral Atlas , Año 2004
9. TECSUP, Clasificación seca y húmeda, Año 2008
10. TECSUP, La flotación de minerales, Año 2008
11. TECSUP, Molienda, Año 2008
12. TECSUP, Trituración de minerales, Año 2008
13. Tumialán P. H., Compendio de yacimientos Minerales del Perú, INGEMMET, Año 2003
14. <http://search.conduit.com/Results.aspx?q=reactivos+de+flotacion&hl=en&Search=1&SearchSourceOrigin=10&ctid=CT1351364>
15. <http://www.alipso.com/monografias/flotacion/>
16. <http://www.ex-alumnos.uda.cl/metalurgia/401/concentracion>
17. <http://www.monografias.com/trabajos-pdf2/preparacion-activos>
18. Proceso de minado y recuperación de minerales de cobre que será adoptado por Conga, Diciembre del 2005, Área: Procesos