



Universidad Nacional  
**SAN LUIS GONZAGA**



## **Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional**

Esta licencia permite a otras combinar, retocar, y crear a partir de su obra de forma no comercial, siempre y cuando den crédito y licencia a nuevas creaciones bajo los mismos términos.

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



UNIVERSIDAD NACIONAL "SAN LUIS GONZAGA"  
FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS Y METALURGIA  
EVALUACIÓN DE ORIGINALIDAD



El que suscribe, deja constancia que se ha realizado el análisis con el software de verificación de similitud de **tesis** cuyo título es:

**"INFLUENCIA DE LA SELECCIÓN DEL COLECTOR EN LA EFICIENCIA DE LA  
RECUPERACION DE COBRE POR FLOTACION"**

Presentado por:

**RODRIGUEZ CALDERON JORGE MIGUEL**

**Estudiante** del nivel PREGRADO de la **Facultad de Ingeniería de Minas y Metalurgia**. El resultado obtenido es 20% por el cual se otorga el calificativo de:

**(APROBADO, Según Reglamento de Evaluación de la Originalidad)**

Se adjunta al presente el reporte de evaluación con el software de verificación de originalidad.

**Observaciones:**

APROBADO OBTUVO EL 20% (MENOR O IGUAL AL 20% REQUERIDO)

Ica, 29 de marzo de 2023

.....  
**DR. VICTOR MANUEL FLORES MARCHAN**  
**DIRECTOR DE UNIDAD DE INVESTIGACION**  
**FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS Y METALURGIA**

**UNIVERSIDAD NACIONAL “SAN LUÍS  
GONZAGA”**

**DE ICA**

Facultad de Ingeniería de Minas y Metalurgia



Tesis:

**“Influencia de la selección del colector en la  
eficiencia de la recuperación de cobre por  
flotación”**

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

Presentado por:

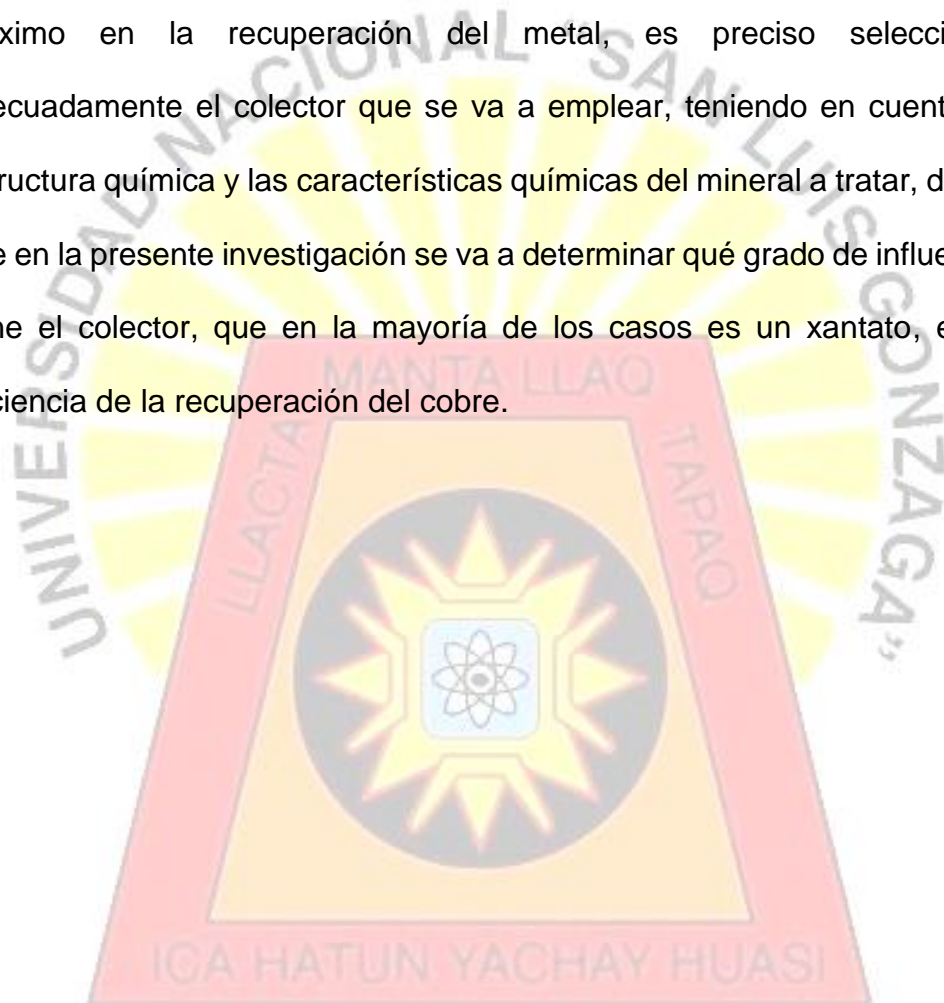
Bach. RODRIGUEZ CALDERÓN, Jorge Miguel

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Metalurgia extractiva de  
metales.

**NASCA – PERÚ  
2023**

## INTRODUCCIÓN

La flotación de minerales sulfurados de cobre es una práctica muy común en la mayoría de las plantas hidrometalúrgicas de la región, ya que este es el mineral más abundante de cobre que actualmente existe. Para lograr un máximo en la recuperación del metal, es preciso seleccionar adecuadamente el colector que se va a emplear, teniendo en cuenta su estructura química y las características químicas del mineral a tratar, de allí que en la presente investigación se va a determinar qué grado de influencia tiene el colector, que en la mayoría de los casos es un xantato, en la eficiencia de la recuperación del cobre.



## INDICE

	Pág.
CARÁTULA	01
INTRODUCCIÓN	02
INDICE	03
CAPÍTULO I: PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN	05
1.1. Situación problemática	05
1.2. Formulación del problema.	05
1.3. Objetivos.	06
1.4. Justificación e importancia.	06
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.	08
2.1. Antecedentes.	08
2.2. Bases teóricas.	08
2.3. Marco conceptual.	37
CAPÍTULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES.	41
3.1. Hipótesis.	41
3.1.1 Hipótesis general.	41
3.1.2. Hipótesis secundarias.	41
3.2. Variables.	41
3.3. Operacionalización de las variables.	42
CAPÍTULO IV: ESTRATEGIA METODOLÓGICA.	43
4.1. Tipo, Nivel y Diseño de la Investigación.	43

4.2.	Población y muestra.	43
4.3.	Técnicas de recolección de información.	43
4.4.	Instrumentos de recolección de información.	44
4.5.	Técnicas de análisis e interpretación de datos.	44
CAPÍTULO V: PARTE EXPERIMENTAL		45
5.1.	Toma de muestras.	45
5.2.	Preparación de las muestras para el análisis.	46
5.3.	Obtención de la muestra representativa	46
5.4.	Técnicas a desarrollar.	47
5.5.	Desarrollo experimental de la flotación.	71
CAPÍTULO VI: RESULTADOS.		73
6.1.	Resultados obtenidos.	73
6.2.	Discusión de resultados.	83
CONCLUSIONES.		84
RECOMENDACIONES.		85
BIBLIOGRAFÍA		86
ANEXOS		88

## **CAPÍTULO I**

### **PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.**

El diseño del proceso de flotación, debe hacerse con mucho cuidado, teniendo cuidado en el estudio de la composición química del mineral, estableciendo que tipo de sulfuros existen en él, y cuál de ellos se quiere recuperar y en función de esto que tipo de colector es el más indicado por su estructura y selectividad, ya que no todos ellos funcionan de la misma manera y permiten una recuperación eficiente. Muchos de los metalurgistas, emplean el xantato que tienen a mano, sin tener en cuenta sus propiedades, lo que influye en la cantidad de cobre en el concentrado obtenido. Debido a esto planteamos hacer el presente estudio para establecer la relación colector- cantidad de cobre recuperado en los procesos de flotación.

#### **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.**

##### **1.2.1. Problema general.**

¿La selección del colector influye en la eficiencia de la recuperación de cobre por flotación?

##### **1.2.2. Problemas específicos.**

- ¿Cómo influye la estructura del colector en la eficiencia de la recuperación del cobre por flotación?

- ¿Cuál es el nivel de recuperación de cobre durante la flotación de sulfuros empleando xantatos de diferentes estructuras químicas?

### **1.3. OBJETIVOS DEL PROYECTO.**

#### **1.3.1. Objetivo General.**

Determinar la influencia de la selección del colector en la eficiencia de la recuperación de cobre por flotación.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos.**

- Determinar cómo influye la estructura del colector en la eficiencia de la recuperación del cobre por flotación.
- Determinar el nivel de recuperación de cobre durante la flotación de sulfuros empleando xantatos de diferentes estructuras químicas.

### **1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.**

El colector a emplear debe de tener una estructura química adecuada, compatible con la del mineral que se va a flotar por lo que la presente tesis desde el punto de vista técnico tiene una gran importancia ya que permitirá seleccionar el xantato adecuado para cada uno de los procesos de flotación. Desde el punto de vista teórico se formularán los criterios necesarios para conocer que son

los colectores y cómo actúan durante el proceso y que dificultades crean durante la flotación, que no responden a las expectativas de una excelente recuperación del cobre.

Desde el punto de vista económico la selección adecuada del colector permitirá una recuperación óptima de cobre, lo cual influirá en la rentabilidad del proceso.



## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. ANTECEDENTES.**

En el año 2015 Velásquez, R. presentó su tesis titulada “**Uso adecuado de los xantatos y eficiencia en la recuperación del oro**”, a la Universidad Católica de Chile. Estudio cuyo objetivo fue establecer la relación entre el tipo de colector y el nivel de recuperación del oro, y en el que llegó a las siguientes conclusiones: La estructura del colector juega un rol muy importante en el tipo de reacción que se produzca, así como en los resultados finales de su actuación. A medida que se incrementa la cadena hidrocarbonada en longitud su efecto repelente al agua se incrementa enormemente, aun a bajos consumos, pero la acción selectiva es tremendamente reducida. Los resultados obtenidos demuestran que es inadmisibles usar colectores con cadenas hidrocarbonadas largas, ya que los ángulos de contacto no se incrementan grandemente, luego, mucho depende del grado de selectividad que se requiere para la flotación.

#### **2.2. BASES TEÓRICAS.**

##### **2.2.1. Fundamentos de la flotación de minerales.**

De manera sencilla se puede definir la flotación como un proceso de concentración de minerales en el cual se trata de separar

las partículas de mineral finamente molidas del material estéril, conocido como ganga. El proceso de flotación implica el tratamiento químico de la pulpa de mineral a fin de crear condiciones favorables para la adhesión de partículas de mineral a las burbujas de aire. El objetivo principal es la separación de especies minerales finamente divididas, que se encuentran en la pulpa, aprovechando sus propiedades de afinidad (hidrofilico) o repulsión (hidrofóbico) por el agua.

En el proceso de flotación por espumas la concentración de minerales puede adoptar diversas formas: La flotación colectiva (Bulk) en que se produce la separación de varios componentes en dos grupos, la flotación selectiva o diferencial en la cual se realizan la separación de compuestos complejos que contienen no más de una especie individualizada.

El proceso de flotación se basa en las propiedades hidrofóbicas e hidrofílicas de los minerales. El carácter hidrofilico o de afinidad con el agua hace que estas partículas se mojen, permanezcan en suspensión en la pulpa, finalmente hundirse.

El carácter hidrofóbico o de repulsión evita el mojado de las partículas minerales que pueden adherirse a las burbujas y

ascender. Los sulfuros metálicos tienen propiedades fuertemente hidrofóbicas, de manera que junto con los metales nativos, son los minerales más fácilmente flotables. Su flotación, generalmente, no presenta muchas dificultades por cuanto existen buenos colectores selectivos tales como los xantatos, ditiofosfatos y otros sulfhídricos que los separan con gran facilidad y selectividad de sus gangas respectivas.

Algunos minerales tienen estas propiedades en forma natural, pero pueden darse o acentuarse mediante los reactivos de flotación. Los metales nativos, sulfuros o especies como el grafito, carbón bituminoso, talco y otros son poco mojables por el agua y se llaman minerales hidrofóbicos. Por otra parte, los sulfatos, carbonatos, fosfatos, etc. son hidrofílicos o sea mojables por el agua. Se trata fundamentalmente de un fenómeno de comportamiento de sólidos frente al agua.

### **Flotación por espumas**

La flotación por espumas es un proceso físico-químico de concentración de minerales, basado en las propiedades superficiales de los minerales (mojabilidad), que hace que un mineral o varios de ellos se queden en una fase o pasen a otra. las

propiedades superficiales pueden ser modificadas a voluntad con ayuda de reactivos.

Estos reactivos tienen por objeto la separación de especies minerales, finamente divididos a partir de una pulpa acuosa, aprovechando sus propiedades de afinidad (hidrofílico) o repulsión (hidrofóbico) por el agua. las especies valiosas o útiles constituyen una fracción menor del mineral (concentrado), mientras que las especies no valiosas o estériles constituyen la mayor parte (ganga).

#### **Mecanismo de la flotación.**

Para estudiar el mecanismo de la flotación, es necesario conocer detalladamente el comportamiento que tiene una partícula de mineral y una burbuja de aire, cuando ellos forman una unión estable. Con referencia a la partícula de mineral 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 hidrofiliación de las superficies minerales, o mejor dicho a su hidratación. Esto puede no bien suceder, pero en todo caso, hay que considerar la diferencia que

existe entre una red cristalina teórica y una red real con todas sus imperfecciones. Se ha comprobado que las trizaduras y desórdenes iónicos aumentan la hidratación superficial de las partículas minerales. 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 de carácter heteropolar, o sea, una parte de la molécula es un compuesto evidentemente apolar (hidrocarburo) y la otra es un grupo polar con propiedades iónicas.

Para facilitar la adsorción 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. Estos disminuyen el potencial de la capa doble o, a veces cambian su sentido. De este modo se crean condiciones favorables para la adsorción de los colectores: disminución del potencial o, todavía mejor, el punto isoeléctrico (potencial cero).

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. Sobre el mecanismo de adsorción de los colectores, hasta la fecha no hay opinión unánime

de sí se trata de un mecanismo de adsorción física o química. La evidencia experimental ofrece ejemplos de ambos tipos, por lo que cada caso particular tiene que considerarse aparte.

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

- 1) recoger las partículas en la pulpa,
- 2) transportarlas hacia la superficie.

El transporte se efectúa mediante la fuerza de empuje (ley de Arquímedes). Las experiencias con inyección directa de aire en la pulpa generalmente dan resultados negativos si no se emplea un espumante, por cuanto el aire se distribuye en forma dispareja, las burbujas son inestables y se asocian unas con otras. Al agregar el espumante, se estabilizan, se obtiene el tamaño deseado y la dispersión del aire es pareja. Como es fácil comprender, cada burbuja se puede considerar como el contacto de dos fases, líquido y gas, igual que en el caso discutido de un líquido en equilibrio con la atmósfera.

De este modo, por las razones ya explicadas y en cumplimiento de la segunda ley de la termodinámica, los espumantes, que son reactivos tensoactivos, se adsorben selectivamente en la interfase

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, debida a los rotores de las máquinas de flotación, de modo que para realizar su unión son necesarios: 1) su encuentro y 2) condiciones favorables para formar el agregado. El encuentro se realiza por el acondicionamiento y la agitación dentro de la máquina misma.

El contacto permanente entre la partícula y la burbuja de gas es el punto más débil de la teoría de la flotación. Los conceptos de las condiciones que determinan la unión estable entre la partícula y la burbuja son los siguientes: no hay problemas en explicar el acercamiento de la burbuja y la partícula hasta el punto en que la película de agua que las separa queda muy fina. En este momento, la partícula para acercarse más a la burbuja tiene que superar lo que se considera una barrera energética.

Para las partículas hidrofílicas, en que la asociación de la partícula con las moléculas de agua es muy firme, esta barrera nunca se supera y las partículas no flotan. Para las partículas hidrofóbicas, la barrera queda repentinamente rota por fuerzas todavía no bien conocidas, permitiendo un contacto trifásico.

En realidad, el mecanismo no es tan simple como parece. En primer lugar, la película de agua nunca se rompe hasta el fin y la partícula queda siempre cubierta por una película de moléculas de agua, de unas 10 moléculas de grosor que participan en las asociaciones posteriores. Esta película de agua tiene propiedades totalmente distintas a las del agua en masa. Por ejemplo, es mecánicamente más firme y más dura que la asociación común de moléculas de agua. Tiene no solo mayor viscosidad, sino que es considerada mecánicamente dura hasta tal punto que se le atribuyen propiedades de un sólido.

De este modo, el contacto real entre la partícula y la burbuja es trifásico, sólo si consideramos esta finísima película de agua como un sólido. Es imposible evitar esta película, porque incluso si se supone que el sólido no la lleva consigo, al acercarse a la burbuja, dentro de ésta existe vapor de agua que se condensa formando sobre la superficie del sólido una finísima película que impide su contacto directo con el aire.

Los conceptos modernos de la dinámica del contacto entre la burbuja y la partícula consideran que el encuentro entre ambas se efectúa del modo como ocurre la colisión entre dos cuerpos elásticos. Esto significa que los cuerpos chocan y rebotan. Se ha

podido observar el hundimiento de la burbuja cuando es chocada por la partícula y el rebote elástico de esta última. La partícula, enseguida, vuelve nuevamente a chocar con las burbujas hasta que se encuentra con la que tiene condiciones energéticas y eléctricas para asociarla. Este mecanismo, entonces, contempla como factores de importancia, el tamaño de la partícula (fuerza dinámica) y su mojabilidad (condiciones eléctricas).

### **2.2.2. Colectores de flotación.**

Los reactivos de flotación se clasifican de acuerdo a su papel en la flotación: colectores, espumantes, activadores, depresores, reguladores del pH y los floculantes. Los colectores son reactivos orgánicos bastante diversos en composición y estructura cuya principal función es la hidrofobización selectiva de la superficie de las partículas de ciertos minerales, para crear condiciones favorables de adherencia mineral-burbuja. Los colectores disminuyen la humectación de las partículas del mineral y aumentan su capacidad de adherencia a las burbujas.

Por su capacidad a la disociación en la pulpa de flotación los colectores se dividen en dos grupos:

1. Los ionógenos que se disocian en iones.
2. Los no ionógenos que actúan en forma molecular.

En dependencia de si la parte de flotación activa de la particular de la molécula, es anión o catión, los colectores ionógenos, se subdividen en aniónicos y catiónicos.

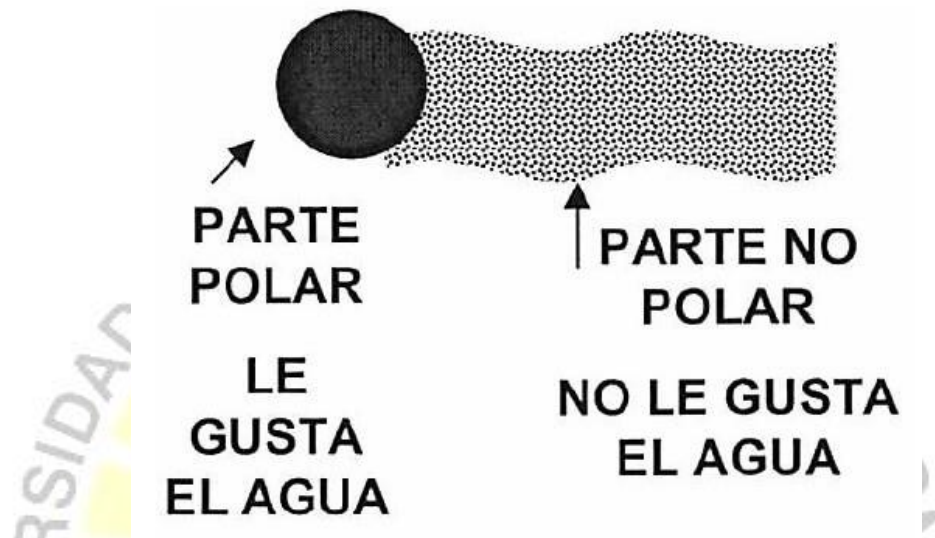
En dependencia de la estructura química los colectores aniónicos se dividen en sulfhídricos para los cuales es característica la existencia en la parte polar del grupo  $-SX$  ( $X = H, Na, K, NH_4$ ), ácidos grasos y sus sales (jabones) alquilsulfatos y alquilsulfonatos los que tienen en su composición  $-SO_3X$  y  $-OSO_3X$  ( $X = H, Na, K$ ).

Los compuestos catiónicos son compuestos orgánicos en los cuales el radical hidrocarburo es el catión el grupo de estos reactivos está representado por aminas sus sales bases amónicas cuaternarias y otras bases nitrogenadas (derivados de guanidina).

Los colectores no-ionógenos también se dividen en los reactivos que contienen azufre, bivalente, aceites hidrocarbonados apolares y los esterres polialquilenglicólicos de los ácidos grasos alcoholes alquilfenoles, etc.

Los colectores polares se componen de una parte polar, la cual tiene carga y puede reaccionar con la superficie de los minerales esta es la responsable de que colectores como el xantato se puedan disolver

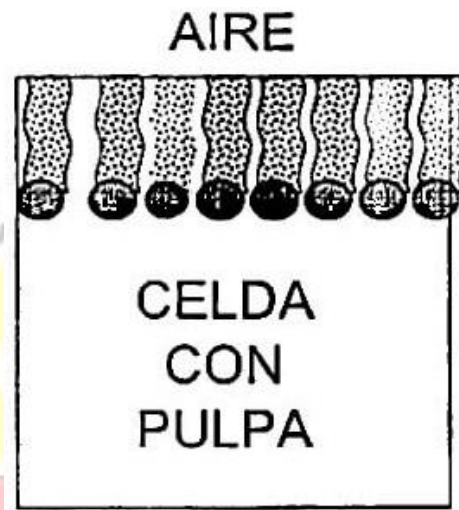
en agua y una parte no polar u orgánica a la cual no le agrada el agua y la cual al estar dentro de una celda tiende a orientarse hacia donde existe aire.



Quando se alimenta el colector en la celda se deberá tener cuidado de que la dosificación no sea excesiva para evitar formar micelas como se observa en la siguiente figura.

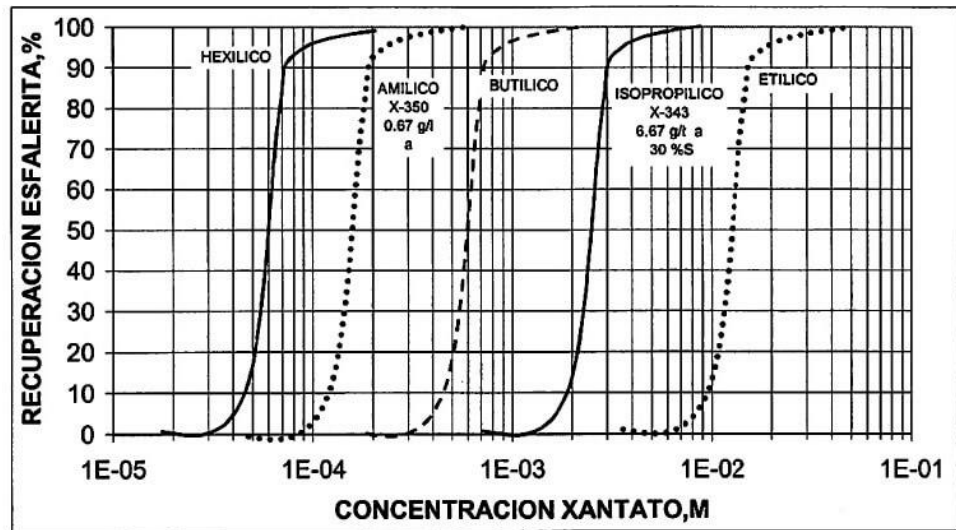


Las moléculas de xantato que se agrupan de tal forma que la parte a la que no le cuelga evita estar en contacto con el líquido, aglomerándose incluso en la superficie.



Los colectores son el corazón de la flotación, para la recuperación de sulfuros se usa los xantatos por ser los más económicos y relativamente de buena selectividad, dos de las variables que mayor impacto tienen sobre la capacidad de colector se recuperación.

Dosificación de colector. El incremento en la dosificación de colector aumenta la recuperación de sulfuros, pero a su vez se obtienen una menor selectividad. En la figura siguiente se observa el efecto que tiene la dosificación de xantato, así como el tipo de colector sobre la recuperación de esfalerita.



La dosificación de colector en conjunto con el pH, juegan un papel crucial sobre la flotación de impurezas como la pirita en la flotación de sulfuros de cobre, plomo y zinc.

Si se desea no flotar pirita existe poca flotabilidad a bajas concentraciones de xantato y pH de 6 a 10,5 arriba de 11 también existe una alta depresión de pirita, desafortunadamente casi todos los sulfuros no son recuperados a pH arriba de 11, por lo que la mejor estrategia para no flotar exceso de pirita radicara en la menor dosificación de colector.

## TIPOS DE COLECTORES

### Colectores oxhidrilo

Estos colectores (oxhidrilo) son el grupo más grande de colectores aniónicos, a pesar de que sólo un número limitado de ellos han

encontrado aplicación en la práctica industrial. Últimamente se ha desarrollado un número considerable de nuevos compuestos, siendo algunos colectores muy importantes para la flotación de minerales de tantalita, niobio y titanio y pertenecen a un grupo de éter sulfatos de alcoholes grasos y diversos ésteres de ácido fosfórico. Sobre la base de la composición y orientación del grupo solidofílico, los colectores de oxhidrilo se pueden dividir en ocho subgrupos

#### Grupo 1. Carboxilatos

Estos son colectores oxhidrilos, generalmente utilizados en la práctica industrial a pesar de que la selectividad de estos colectores hacia los minerales de ganga es baja. Los ácidos grasos y los aceites de resina son ampliamente utilizados para la flotación de fosfatos, minerales de litio (espodumena), silicatos y minerales de tierras raras (es decir, bastnasita, monacita) donde la separación por gravedad no es posible debido al pequeño tamaño de los minerales. Estos colectores se forman bien en minerales con composiciones de ganga simple y libre de arcilla y lodos.

#### Grupo 2. Sulfatos de alquilo

Los compuestos sulfatos de alquilo son derivados del ácido sulfúrico en los cuales un átomo de hidrógeno ha sido sustituido por un radical hidrocarbonado. La modificación más reciente del mismo grupo de

colectores es alcano sulfonato. Los sulfatos de alquilo son adecuados para la flotación de barita ( $\text{BaSO}_4$ ) y otros minerales que contienen azufre, incluyendo celestita ( $\text{SrSO}_4$ ), kainita ( $\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ).

### Grupo 3. Sulfonatos

Los sulfonatos son colectores que tienen un grupo solidofílico similar a los alquilsulfatos, con la diferencia de que el radical hidrocarburo está directamente conectado al azufre y no a través del puente de oxígeno. Los reactivos más ampliamente utilizados de tipo sulfonato son los promotores de la serie Cytec 800.

### Grupo 4. Hidroxamatos

Estos colectores en su estructura química contienen carbono y nitrógeno. Aunque se ha llevado a cabo un extenso trabajo de investigación sobre la aplicación de hidroxamatos como colectores de flotación para la malaquita, bastnasita y para la flotación de titanatos y pirocloro, la única aplicación comercial de hidroxamato se ha logrado con el Hidroxamato Ruso IM50 y compuestos similares producidos en China.

### Grupo 5. Sulfosuccinatos y sulfosuccimatos

Los colectores pertenecientes a los sulfosuccinatos se derivan de

carboxilatos y ácidos succínicos y generalmente se encuentran en forma de sales de sodio. Estos colectores han encontrado un amplio uso comercial para la flotación de casiterita. Además, estos colectores también han encontrado aplicación para la flotación de arena de minerales pesados y monacita cuando se mezclan con ácidos grasos.

#### Grupo 6. Fosfonatos o ácidos fosfónicos

Estas sustancias colectoras fueron desarrolladas recientemente y se utilizaron principalmente como colector específico para casiterita de minerales con composición compleja de ganga.

#### Grupo 7. Esteres de ácido fosfórico

Estos colectores químicamente están catalogados como fuertes y se pueden usar en medio alcalino (flotación de apatita y scheelita) o en un medio ácido para la flotación de minerales de titanio (ilmenita, rutilo y perovskita). Un grupo similar de colectores llamado "fosfoteno" y consiste en un 25% de fósforo pentavalente y un 75% de ácido nafténico. El producto de reacción resultante es un polvo con un peso específico de 0,9 g / cm<sup>3</sup>. Es soluble en alcohol, pero no en agua. Se usa para flotar circón, casiterita y pirocloro a pH de 4- 10.5.

## Grupo 8. Colectores sulfhídricos o sulfhidrilo

Estos colectores sulfhídricos son los tioles, compuestos que contienen el grupo -SH combinado con un radical orgánico. Si el sulfhidruro está conectado al átomo de carbono que también forma parte de la cadena de hidrocarburos, el tiol generalmente se denomina mercaptano. Este grupo de colectores son los más ampliamente utilizados en la industria metalúrgica, para la flotación de minerales metálicos.

### **Colectores sulfhídricos**

Son aquellos que están basados químicamente en azufre bivalente entre ellos destacan:

#### **XANTATOS**

Estos reactivos de flotación, colectores, son Productos sólidos usados en la flotación de minerales sulfurados y metálicos. Los componentes básicos son: El Bisulfuro de Carbono, la Soda o Potasa Cáustica y un determinado Alcohol; el cual, le otorga las propiedades colectoras en el circuito de Flotación para los minerales metálicos y polimetálicos. Todos los Xantatos son solubles en agua, usualmente se alimentan como soluciones en concentraciones del 5 al 20% en peso. Los xantatos son sustancialmente no espumantes y por lo tanto pueden emplearse en cualquier cantidad necesaria, sin peligro de producir espumación excesiva.

Esto hace posible que, mediante el uso de agentes espumantes no colectores en combinación con los xantatos, se logre un control altamente flexible y separado de la acción colectora so y espumante, lo cual es una gran ventaja para mantener las condiciones adecuadas de flotación durante los cambios de mineral. Estos reactivos son ampliamente usados para todos los minerales sulfurados, con una tendencia fuerte a flotar sulfuros de hierro, salvo que se usen depresores. No son empleados en circuitos muy ácidos, porque tienden a descomponerse.

En metalurgia los xantatos son de uso muy generalizado en la flotación de sulfuros. Los más conocidos son los siguientes:

#### XANTATO ETILICO DE POTASIO

Es el Reactivo de mayor selectividad por su corta cadena carbonada. Usado generalmente en menas complejas de Ag/PB o Zinc.

#### XANTATO ISOPROPILICO DE SODIO (Z 11)

Parecido al primero por su cadena carbonada. Es el reactivo más usado en el PERÚ en la flotación de minerales de sulfuro, elementos metálicos tales como cobre, plata, oro, cinc y bastantes minerales oxidados de plomo y cobre, también para el tratamiento de minerales polimetálico.

Este xantato debido a su elevado poder colector es empleado en la flotación de minerales complejos de plomo-zinc y cobre-hierro en los cuales los principales minerales sulfurados son calcopirita, calcocita, energita, galena, escalerita, marmatita, pirita y pirrotita. Otra de sus aplicaciones incluye la concentración de cobre nativo, plata, oro y los sulfuros de hierro que contienen cobalto o níquel, así como la recuperación de piritas de hierro.

Se obtiene por la reacción del alcohol isopropílico con el bisulfuro de carbono e hidróxido de sodio. Este xantato ha llegado a ser el más ampliamente usado de todos los xantatos debido a su bajo costo y su elevado poder colector)

#### XANTATO ISOBUTILICO DE SODIO

Colector ampliamente usado para flotar sulfuros de plomo, plata y zinc, también es usado en los circuitos de flotación de cobre con buenos resultados metalúrgicos. Puede sustituir en algunos casos al Xantato Amílico de potasio)

#### XANTATO SEC-BUTILICO DE SODIO

Colector de acción similar al Xantato Isobutílico de Sodio, usado en circuitos de Pb o Zinc.

## XANTATO AMILICO DE POTASIO (Z-6)

Este es el más potente de los xantatos Cyanamid. Es útil en las operaciones que requieren un promotor potente y no selectivo para los minerales sulfurosos. Con frecuencia se usa como promotor en la flotación agotativa que sigue a una celda bulk, donde se utiliza un promotor más selectivo. Usado generalmente en circuitos de acción rápida y sobre todo en el tratamiento de minerales de Zinc marmatíticos. Es usado también en circuitos de flotación con una acidez moderada.

## DITIOFOSFATOS

Estos colectores son líquidos y se venden en solución, diferenciándose uno del otro, porque un grupo presenta ácido cresílico y los otros un determinado alcohol. Estos reactivos se usan generalmente para flotar minerales sulfurados conteniendo Plata, así como para otros tipos de minerales en circuitos alcalinos. Todos los ditiofosfatos se usan en soluciones cuya concentración es evaluada en el laboratorio, con excepción de los Ditiofosfatos AR-125 y AR-131, los que son insolubles en agua.

### **Dosificación de colector.**

El incremento en la dosificación de colector aumenta la recuperación de sulfuros, pero a su vez se obtienen una menor selectividad. En la figura siguiente se observa el efecto que tiene la dosificación de xantato así como el tipo de colector sobre la recuperación de esfalerita.

La dosificación de colector en conjunto con el pH juega un papel crucial sobre la flotación de impurezas como la pirita en la flotación de sulfuros de cobre, plomo y zinc.

Si se desea no flotar pirita existe poca flotabilidad a bajas concentraciones de xantato y pH de 6 a 10.5 arriba de 11 también existe una alta depresión de pirita, desafortunadamente casi todos los sulfuros no son recuperados a pH arriba de 11, por lo que la mejor estrategia para no flotar exceso de pirita radicara en la menor dosificación de colector.

### **Peso molecular del colector.**

Cuanto mayor es el peso molecular del xantato mayor es la capacidad de colección, es decir que se requiere una menor cantidad para obtener la misma recuperación, pero conforme mayor es el peso molecular menor es la selectividad.

La galena es un mineral de gran importancia y al igual que el resto de los sulfuros tienden a aumentar su recuperación conforme se aumenta la dosificación del colector o bien el peso molecular del mismo.

Cuando mayor es el peso molecular del colector menor es la dosificación que se requiere para obtener una misma recuperación como se denota en la figura 8, desafortunadamente la selectividad del colector a en forma inversa con el aumento del peso molecular.

### **Variables del proceso de flotación**

Las variables que más afectan la flotación de los minerales son las siguientes:

- Granulometría de la mena
- Tipo y dosificación de reactivos de flotación.
- Densidad de la pulpa o porcentaje de sólidos.
- Tiempo de residencia.
- pH.
- Aireación y acondicionamiento de la pulpa.
- Temperatura de la pulpa.
- Calidad del agua utilizada.

### **Granulometría de la Mena.**

Existe un tamaño de partícula que presenta una mayor recuperación metalúrgica, observándose, en general, una disminución de ésta para tamaños más gruesos y más finos de la mena. La recuperación disminuye para tamaños pequeños, lo cual se relaciona con la dificultad de adhesión partícula/burbuja, debido a que éstas no adquieren la energía cinética suficiente para producir un agregado partícula/burbuja estable. Por otra parte, las partículas pequeñas son arrastradas más fácilmente a la espuma, ya que el drenaje a la pulpa se favorece con el incremento de la velocidad de sedimentación.

Es importante destacar que, en la etapa de flotación primaria (etapa rougher) la flotación se realiza con una granulometría de mena en la cual no es necesaria la liberación de la partícula, sin embargo, en la etapa de limpieza donde es necesaria la selectividad de las partículas útiles, es fundamental realizar una remolienda del concentrado de la etapa rougher para la liberación de las especies útiles de la mena.

De esta manera, el tamaño de partícula es la variable sobre la cual debe ponerse más énfasis en su control, debido a su efecto en la recuperación metalúrgica y en la selectividad del concentrado final,

así como, por la alta incidencia que tiene en los costos de operación del proceso global de concentración.

### **Tipo y Dosificación de los Reactivos de Flotación.**

La función del colector es hacer hidrofóbica la superficie del mineral deseado, por lo cual, es el reactivo químico más importante utilizado en la flotación. La amplia experiencia existente en la flotación de minerales permite usar con eficiencia determinados tipos de colectores dependiendo de los tipos de minerales y asociaciones mineralógicas presentes.

Por otro lado, la elección de un espumante determina las características de la espuma, que contribuye a la selectividad de la operación. La altura de la espuma y el flujo de aire a la celda afectan el tiempo de retención de las partículas en la espuma. La estabilidad de la espuma depende principalmente de la dosificación del espumante.

Se debe tener en cuenta, que los reactivos de flotación requieren de un cierto tiempo de acondicionamiento para estar en contacto con la pulpa y de esa forma poder actuar en forma eficiente sobre las especies útiles de la mena. Así, la etapa de acondicionamiento adquiere mucha importancia, ya que algunos reactivos se deben

adicionar en la etapa de molienda para tener mayor contacto con la mena, mientras que otros, se adicionan directamente al cajón de descarga de los molinos de bolas o al acondicionador.

### **Densidad de Pulpa o Porcentaje de Sólidos**

La densidad de la pulpa o porcentaje de sólidos en la flotación de minerales viene determinada desde la etapa de molienda/clasificación. Es raro que la pulpa se ajuste en su porcentaje de sólidos antes de entrar a la etapa de flotación, sin embargo, es un factor importante, ya que la flotación de los minerales ocurre en forma eficiente cuando la pulpa presenta un valor adecuado de porcentaje de sólidos.

La densidad de pulpa afecta el tiempo de residencia del mineral en las etapas de flotación, y de esta forma en la capacidad del circuito. En general, la etapa de flotación rougher de las plantas concentradoras de cobre operan con un porcentaje de sólidos comprendido entre 30% y 45%, mientras que, las etapas de limpieza (cleaner y recleaner) trabajan con un porcentaje de sólidos menor.

### **Tiempo de Residencia**

El tiempo de flotación depende de las características del material que se va a flotar, y de la conjugación de todos los demás factores que inciden en el proceso. Para la optimización de los circuitos de

flotación el tiempo óptimo de cada etapa se determina aplicando los criterios de Agar et al. a través de pruebas cinéticas de flotación.

## **pH**

El pH es la variable de control más utilizada en el proceso de flotación, ya que resulta fundamental en la recuperación y selectividad, así como, en la depresión de minerales. El proceso de flotación es sumamente sensible al pH, especialmente cuando se trata de flotación selectiva. Los reactivos de flotación, principalmente los colectores, operan mejor en ciertos rangos de pH. La regulación del pH en la flotación de cobre se realiza con cal. Este reactivo es importante, ya que, además de actuar como modificador de pH, es un depresor de pirita en la flotación selectiva de minerales de cobre en la etapa de limpieza.

## **Aireación y Acondicionamiento de la Pulpa**

El acondicionamiento es una etapa clave ya que proporciona el tiempo necesario para que actúen en forma eficiente los reactivos de flotación. Algunos colectores y modificadores presentan cinética de adsorción en los minerales bastante lenta por lo cual deben incorporarse al molino de bolas, mientras que otros reactivos se incorporan directamente al estanque acondicionador de la pulpa.

La aireación de la pulpa en la celda es una variable importante que normalmente es controlada por el operador de la planta, la cual permite la aceleración o retardación de la flotación en beneficio de la recuperación metalúrgica o de la ley del elemento útil.

### **Calidad del Agua**

Dada la gran cantidad de interacciones que se producen entre las variables del proceso, las cuales acondicionan el ambiente fisico-químico de la flotación, un aspecto interesante de analizar es la calidad del agua que se utiliza en el proceso. Es común en las plantas concentradoras, que parte importante del agua utilizada sea agua de proceso, recuperada desde las etapas de separación sólido/líquido (espesadores, filtros, etc.), la cual contiene reactivos químicos residuales. Esta utilización de agua de proceso produce un ahorro en el consumo de agua y en el consumo de espumante, pero se puede producir un aumento de algunos iones en solución cuyo efecto en la flotación de los minerales debe ser evaluado, a fin de evitar que éstos superen los niveles críticos para la flotación.

### **Sulfuros de cobre. Chalcopirita.**

La calcopirita, con fórmula química  $\text{CuFeS}_2$ , es un mineral sulfurado de cobre y hierro con una composición másica de 34,63% de Cobre, 30,43% de Hierro y 34,94% de azufre.

La calcopirita es el mineral de cobre más abundante en la naturaleza conteniendo alrededor del 70% de las reservas en el mundo y es el principal mineral de cobre en los depósitos de pórfidos de cobre. Este sulfuro de cobre primario se encuentra, generalmente, asociado a otros tipos de minerales tales como: pirita ( $\text{FeS}_2$ ), sulfuro de zinc ( $\text{ZnS}$ ), galena ( $\text{PbS}$ ), pentlandita ( $(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8$ ), cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), fluorita ( $\text{CaF}_2$ ), sulfato de bario ( $\text{BaSO}_4$ ), dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) u otros sulfuros de cobre como calcosina ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), covelina ( $\text{CuS}$ ) y bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ).

El mineral de calcopirita es de color dorado, tiene una densidad medida promedio de 4,1 a 4,3  $\text{kg/m}^3$  y una densidad calculada de 4,18  $\text{kg/m}^3$ , y posee una dureza de entre 3,5 a 4 en la escala de Mohr. Se trata de un semiconductor tipo n cuya resistividad a temperatura ambiente varía entre  $2 \cdot 10^{-4}$  y  $9 \cdot 10^{-3}$  ohmios. Su punto de fusión es aproximadamente  $880^\circ\text{C}$  (Gautier, 2009).

La estructura cristalina de la calcopirita es principalmente tetragonal con parámetros de celda  $a = 5.289\text{\AA}$ . y  $c = 10.423\text{\AA}$ , sin embargo, en la literatura se reportan tres tipos (fases) de calcopirita (Ferreira et al., 1975): En primer lugar, se encuentra la a-calcopirita, que es de estructura tetragonal y que se encuentra en la naturaleza en estado

natural, cuya fórmula molecular es  $\text{CuFeS}_2$ . En segundo lugar está la b-calcopirita, que posee una estructura cúbica y cuya fórmula molecular es  $\text{CuFeS}_{1,82}$ , y en último lugar se encuentra la g-calcopirita, con fórmula molecular es  $\text{CuFeS}_{2x}$ , en donde x puede tomar un amplio rango de valores.

Otro aspecto interesante de mencionar son los estados de oxidación de los cationes de la calcopirita los cuales han sido objeto de bastante controversia. Para algunos autores los estados son:  $\text{Cu}^{+}\text{Fe}^{3+}(\text{S}^{2-})_2$  (Y.L. Mikhlin et al, 2004; Kimball et al., 2010) y para otros son:  $\text{Cu}^{2+}\text{Fe}^{2+}(\text{S}^{2-})_2$  (L.V. Yévenes, 2009).

La calcopirita puede ser sintetizada a partir de sus elementos constituyentes. Para esto se mezclan completamente cantidades estequiométricas de cobre, hierro y azufre, para luego calentar durante un cierto periodo de tiempo. Otra forma es de sintetizar calcopirita es mezclando cantidades equimolares de sulfuro cúprico y sulfuro ferroso, calentadas en ausencia de oxígeno. Una tercera forma es mezclar óxido cuproso y óxido férrico, calentada a una temperatura moderada en una atmósfera sulfhídrica (Gautier, 2009).

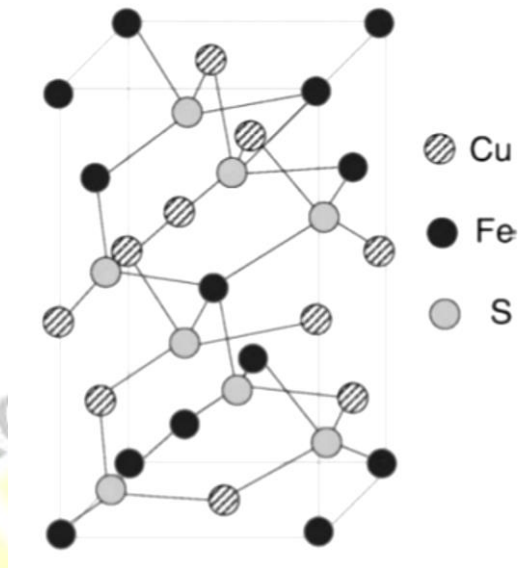


Figura 2.1: Red cristalina de la calcopirita (Córdoba et al., 2008a).

### 2.3. MARCO CONCEPTUAL.

#### **Celdas de flotación (Flotation cells):**

son espacios cerrados donde se realiza la concentración del cobre mediante el burbujeo de aire en una solución. Las partículas de cobre que son hidrofóbicas se adhieren a las burbujas de aire y suben a la superficie desde donde rebasan a canaletas que se encuentran a los costados.

#### **Colectores (Collectors):**

Son reactivos de formulación compleja que se agrega a la pulpa de mineral (mezcla de mineral molido y agua) y que tiene por objeto recubrir las partículas de minerales sulfurados y provocar una adherencia a las burbujas de aire, lo cual permite finalmente

colectarlas en forma selectiva en la parte superficial de las celdas que contienen la pulpa.

**Depresantes (Depressors):**

Son reactivos de formulación compleja que se agrega a la pulpa de mineral (mezcla de mineral molido y agua), que actúa en forma selectiva con el objeto de impedir que ciertos minerales sulfurados que no se consideran útiles (como la pirita, que es un sulfuro de hierro) sean colectados en el proceso de flotación.

**Efecto hidrófobo (Hydrophobic effect):**

El efecto hidrófobo o la hidrofobia es el rechazo al agua. Esta es una característica natural de ciertas moléculas como es el caso de algunas grasas, la que puede ser utilizada como parte de un proceso de separación de mezclas.

**Espumante (Frother):**

Es un reactivo que se agrega a la pulpa de mineral (mezcla de mineral molido y agua) en el proceso de flotación, con el objeto de producir burbujas que permitan captar las partículas de minerales sulfurados. El más conocido de éstos es el aceite de pino.

**Flotación (Flotation):**

Es un procedimiento que permite concentrar el cobre de la pulpa de material mineralizado que viene del proceso de molienda. En las celdas de flotación se hace burbujear oxígeno desde el fondo de manera que las partículas de cobre presentes en la pulpa se adhieren a las burbujas de aire y así suben con ellas y se acumulan en una espuma. La espuma rebasa hacia canaletas que bordean las celdas y que lo llevan al proceso de decantación.

**Ganga (Gangue):**

Es la parte de los minerales sin valor económico y que acompañan a los que contienen los elementos metálicos que se recuperan en el proceso industrial. Son los minerales, generalmente silicatos, que forman la roca y su alteración (cuarzo, feldespatos, micas, arcillas, etc.), los que ocupan entre el 90 y 95% del volumen total de la roca.

**Mineral (Mineral, ore):**

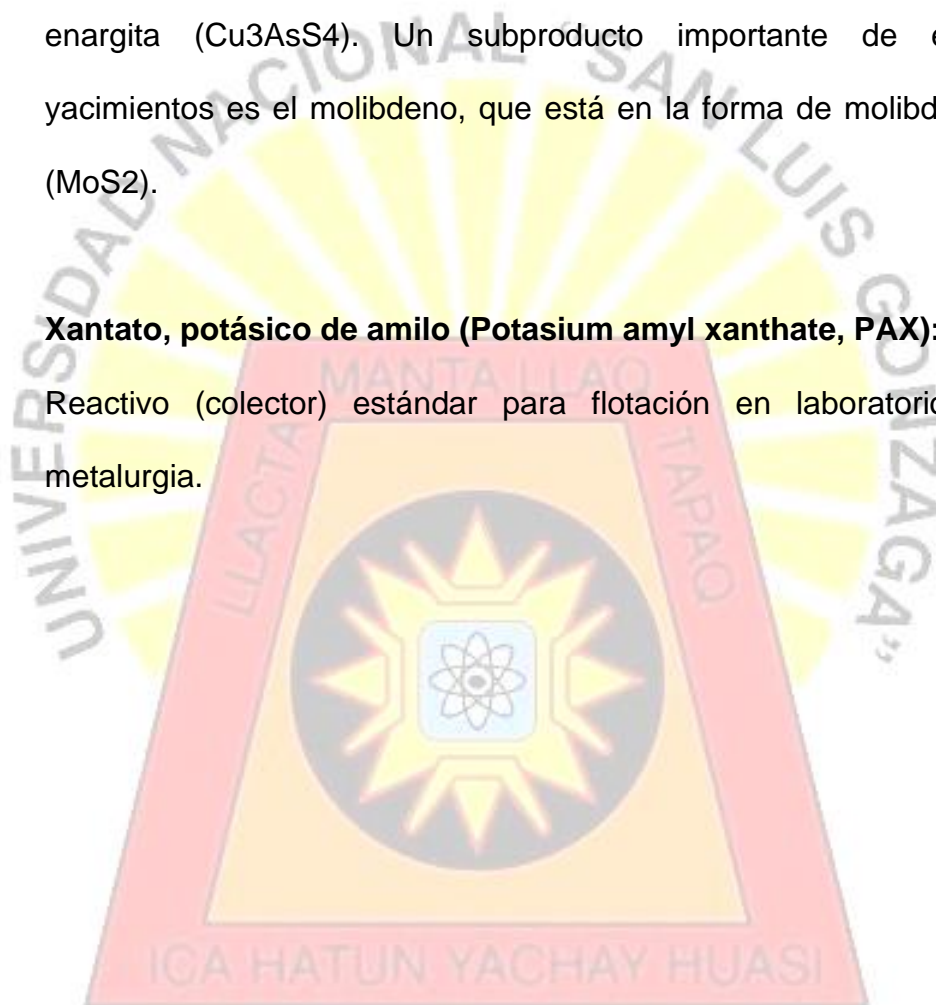
Un mineral es un compuesto químico inorgánico, de origen natural, que posee una estructura interna y composición química característica, formado como resultado de procesos geológicos. Un mineral puede estar constituido por un solo elemento (nativos, como, por ejemplo: oro, plata, cobre) o, más comúnmente, por una asociación de distintos elementos (sulfuros, carbonatos, óxidos, etc)

### **Sulfuros (Sulfides):**

Son los minerales constituidos por el enlace entre el azufre y elementos metálicos, tales como el cobre, hierro, plomo, zinc, etc. Los minerales sulfurados de cobre más comunes son calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ , bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) calcosina ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), covelina ( $\text{CuS}$ ) y enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ). Un subproducto importante de estos yacimientos es el molibdeno, que está en la forma de molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ).

### **Xantato, potásico de amilo (Potassium amyl xanthate, PAX):**

Reactivo (colector) estándar para flotación en laboratorio de metalurgia.



## CAPÍTULO III

### HIPÓTESIS Y VARIABLES

#### 3.1. HIPÓTESIS GENERAL.

La selección del colector influye directamente en la eficiencia de la recuperación de cobre por flotación.

#### 3.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS.

- La estructura del colector influye significativamente en la eficiencia de la recuperación del cobre por flotación.
- El nivel de recuperación de cobre durante la flotación de sulfuros empleando xantatos de diferentes estructuras químicas, es variada.

#### 3.3. VARIABLES.

**Variable Independiente:**

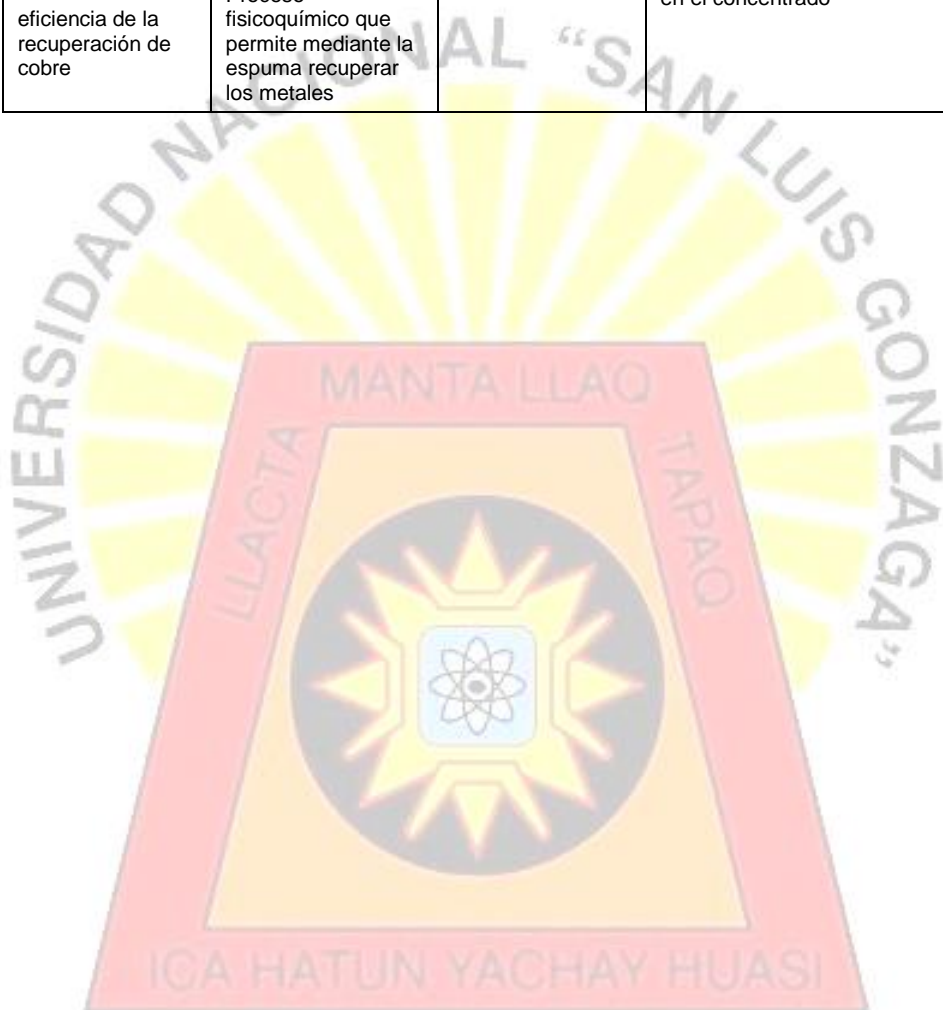
Selección del colector.

**Variable Dependiente.**

Eficiencia de la recuperación de cobre.

### 3.4. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES.

VARIABLES	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
<b>V. Independiente.</b> Selección del colector	Designación del colector más adecuado	1. Física  2. Química	1.1. Tipo de cadena 1.2. Cantidad de reactivo.  2.1. No reacciona con el metal.
<b>V. Dependiente:</b> eficiencia de la recuperación de cobre	Proceso fisicoquímico que permite mediante la espuma recuperar los metales	1. Cuantitativa	1.1. Menor o mayor cantidad de metal en el concentrado



## **CAPÍTULO IV**

### **ESTRATEGIA METODOLOGICA**

#### **4.1. TIPO, NIVEL Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.**

Tipo de investigación: Aplicada

Nivel: Explicativa.

Diseño: Experimental.

#### **4.2. POBLACIÓN Y MUESTRA.**

##### **4.2.1. Población.**

Estuvo constituida por las plantas hidrometalúrgicas dedicadas a la flotación de sulfuros de cobre.

##### **4.2.2. Muestra:**

La muestra estuvo conformada el mineral flotado en la planta hidrometalúrgica Cerro Verde de Arequipa.

#### **4.3. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.**

Las técnicas empleadas fueron: las marchas analíticas para verificar la funcionalidad del colector.

#### **4.4. INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.**

Los instrumentos fueron los análisis de laboratorio y las corridas experimentales para verificar los parámetros en los cuales se deben de llevar los procesos experimentalmente.

#### **4.5. TÉCNICAS DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS.**

Los datos obtenidos se seleccionaron, se tabularon, interpretaron y discutieron en función a los objetivos trazados en la tesis.



## **CAPÍTULO V**

### **PARTE EXPERIMENTAL**

#### **5.1. TOMA DE MUESTRAS.**

Las muestras de minerales sulfurados de cobre, empleadas para realizar la parte experimental de la tesis, se tomaron de la cancha de recepción de minerales de la planta Cerro verde, situada en la región Arequipa.

El mineral muestreado corresponde a sulfuros de cobre con oro y plata, todos ellos contienen además diversas especies mineralógicas y compuestos inorgánicos, en las que resaltan el color amarillo metálico de la calcopirita y el de la pirita, matizado con los colores verde de malaquita o el azul de la azurita. La muestra total peso 10 Kg.

El método de muestreo empleado fue el Grab Sampling: por este método las muestras se obtienen mediante una pala, de acuerdo a un esquema fijo o aleatorio, desde la superficie del mineral apilado a granel en las canchas de recepción, luego se mezclan las muestras tomadas para conformar una sola. Este método es de uso común en las plantas concentradoras de minerales.

## **5.2. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS PARA EL ANÁLISIS.**

Las muestras obtenidas se llevaron al laboratorio de la planta, en donde se procedió a reducir su tamaño, primero mediante un chancado secundario en el que se obtuvieron partículas de hasta 1/2" para luego con ayuda de una pulverizadora obtener un polvo fino cuyo diámetro mínimo fue de: – 200 micras. Este se considera un tamaño de partículas ideal para proceder al análisis. Se pudo notar que durante estas operaciones el material obtenido tiene diferente granulometría que va desde un polvo finísimo hasta partículas con diámetro mayor a 100 micras y que por ello quedan retenidas sobre la malla del tamiz empleado (malla 100, de acuerdo con la escala de tamices normalizado de Tyler.

Así mismo se pudo observar que el color del mineral pulverizado cambia totalmente para dar un color verdoso oscuro con inclusiones verdes y azules, que al microscopio mineralógico permite observar los cristales de los minerales oxidados del cobre, en lo que constituye el llamado análisis mineralógico de los minerales.

## **5.3. OBTENCIÓN DE LA MUESTRA REPRESENTATIVA.**

Una vez pulverizado el mineral, se procedió a seleccionar la muestra representativa, mediante el método del cono y cuarteo. Para ello se procedió de la siguiente manera:

El material se mezcla para posteriormente apilarlo a la forma de un cono. Este se aplasta y se divide con una pala o espátula en forma de cruz (4 partes iguales). Se retiran 2 cuartos opuestos y los otros 2 restantes, que forman la nueva muestra, se vuelven a mezclar y el proceso se repite varias veces hasta obtener el tamaño apropiado de muestra.

Para ello se tomó una muestra de 400 g, se forma un cono, el que se divide en 4 partes, después de aplastarlo; De las 4 partes, se descartan 2 opuestas, y las otras 2 pasan a constituir la base de la nueva muestra. Con la nueva muestra, se forma otro cono, y se repite el procedimiento hasta obtener una muestra de 53 g

#### **5.4. TÉCNICAS A DESARROLLAR.**

##### **CHANCADO DEL MINERAL**

###### **OBJETIVO**

Reducir el tamaño de los trozos del mineral hasta llegar a una malla #10 (100%).

###### **MATERIALES:**

- (1) Sacos de polietileno
- (2) Chancadora de quijada 21/4x31/2
- (3) Baldes plásticos de 20 lts.
- (4) Malla # 10 0.50x0.50m

- (5) Tapón de oídos
- (6) Mascara de silicona c/ filtros contra polvos.
- (7) Plumón indeleble
- (8) Balanza 8 Kg.

#### PROCEDIMIENTO:

Se hace el pesaje respectivo de cada muestra de mineral recepcionado y se apunta los pesos en la cartilla pesos, se traslada el mineral a los sacos de polietileno y se los rotula.

Se procede a hacer el chancado, se debe tener cuidado que la chancadora este limpia ya que podría contaminar a la muestra, se usa la brocha para limpiar todos los finos de mineral que se haya tratado anteriormente.

La chancadora de quijadas de 21/4x31/2, esta acepta minerales de 3"-2" y da un producto de aproximadamente 1/8" (3.175mm) este tamaño de malla no es el adecuado se tiene que llegar a malla #10 (1.65mm), aproximadamente a 1/16", para esto se tiene que pasar por malla 10 y separar las partículas que pasan las malla 10, el resto se vuelve a pasar por la chancadora y así sucesivamente hasta llegar a 100% malla 10 haciendo el tamizado cada vez que se obtenga un nuevo producto de la chancadora.

Para la recepción del mineral de la chancadora se usara los baldes

de 20 lts de plástico ya que son los más adecuados para evitar cualquier tipo de contaminación del mineral. En esta etapa es muy importante usar la máscara de silicona y los tapones de oído ya que los finos de plomo son muy dañinos. Para hacer el tamizado previo a cada etapa de chancado se debe poner la malla #10 en la boca del balde y hacer pasar el mineral.

El producto de cada etapa de chancado se junta y pasa a la zona de cuarteo.

**Nota:** para evitar que la chancadora se malogre (evitar rotura del eje) el mineral mayor a 3" se debe chancar antes de alimentarlo a la chancadora. Esto se puede hacer golpeándolo manualmente u otro método, pero siempre teniendo cuidado de no contaminar al mineral. Por ejemplo, se puede poner un saco de polietileno encima antes de golpearlo.

## **CUARTEO DEL MINERAL**

**OBJETIVO:** obtener una porción de muestra pequeña, representativa del total de la muestra inicial.

#### MATERIALES:

Regla de cuarteo

Manta de cuarteo

Cuchara para cuarteo

Bolsas de plástico de 2kg

Balanza de 8 Kg.

#### PROCEDIMIENTO:

El mineral chancado a malla #10 se debe poner encima de la manta de cuarteo la cual debe ser de cuerina de 0.50 x 0.50 m ó más grande dependiendo del volumen del mineral para evitar pérdidas de la muestra. Luego esta se debe homogenizar haciendo un roleo hasta que todo el material éste debidamente homogenizado.

Si el mineral es mayor a 3 Kg. este se debe hacer entre 2 personas que sujetan la manta y mover el mineral de una esquina a la otra durante varios minutos. Se apila de forma cónica a través de una pala, haciendo caer cada palada exactamente en la punta del cono, esta operación se repite 2 o 3 veces con el propósito de dar a las partículas una distribución homogénea.

Es un requisito muy importante que el mineral este bien homogenizado antes de realizar el cuarteo.

Para el cuarteo de mineral de menos de 3 kilos el mineral se debe extender sobre una superficie plana en este caso la mesa ya que es fácil de limpiar. Luego se hace un nuevo roleo y se forma primero un cono para luego formar una torta circular plana (cono truncado) que finalmente se dividirá en 4 partes iguales (es muy importante que se respete la simetría) esto con la regla de cuarteo a lo largo de 2 diagonales perpendiculares entre sí. Dos cuartos opuestos se separan como muestra y los otros dos cuartos se rechazan.

Este proceso se repite hasta obtener el peso deseado el cual se calculará de acuerdo al tamaño de celda a usar.

En caso que el peso del mineral sea difícil de obtener por este método entonces se procederá de la misma forma que el cuarteo común solo que para obtener la muestra representativa se deberá usar un cucharón apropiado para sacar pequeñas porciones de cada una de las cuatro partes iguales que se formó esto hasta obtener el peso deseado.

Por último, en esta zona se debe guardar la muestra en las bolsas plásticas y rotularlas debidamente, el resto del mineral se devuelve

al compuesto. Es necesario que se obtenga como mínimo 3 muestras del peso requerido para poder hacer las pruebas de flotación.

En esta etapa también es muy importante usar los respectivos equipos de protección personal debido a los polvos que se genera al homogenizar el mineral.

### **MOLIENDA DEL MINERAL**

**OBJETIVOS:** moler el mineral a malla #200 (60%), liberación de la partícula valiosa, formar la pulpa.

Hallar la curva de moliendabilidad.

Acondicionar reactivos de flotación.

#### **MATERIALES:**

- (1) Molino de bolas (1) Mesa de rodillos (1) Balde de 5 litros
- (2) Cronometro
- (3) Probeta de 1lt
- (4) Pizeta
- (5) Cocina eléctrica
- (6) Rodillo de plástico
- (7) Periódico
- (8) Brocha
- (9) Balanza de 250 gr.

## PROCEDIMIENTO:

En primer lugar se debe de limpiar el molino ya que las impurezas dejadas por las pruebas anteriores pueden dar resultados erróneos, esto se hace echando 200 g de arena, 5 g de cal y 0,5 L de agua y cargando al molino con las bolas se lo hace funcionar por 1 minuto y se lava tanto las bolas como el molino con la pizeta.

En esta primera parte moleremos el mineral para hallar su curva de moliendabilidad y el tiempo estimado para que el mineral este a 60% malla 200 es por eso que no se hará aun la adición de los reactivos. se procede a moler el mineral, se carga las bolas al molino luego el mineral, el peso del mineral calculado para la celda de flotación es el que se usara también para la molienda se hecha la muestra de mineral al molino y luego el agua para esto se usara la probeta de 1 L, se tapa el molino y se pone a moler.

Probaremos diversos tiempos de molienda como mínimo 3, como ya sabemos que la granulometría deseada para nuestro mineral está en aprox. 11-14 minutos nos guiaremos por estos tiempos.

Recepcionamos el mineral en el balde de 5 litros enjuagando el molino con la pizeta y lavando las bolas para luego cargarlas otra

vez al molino. Una vez que ya tenemos nuestra pulpa en el balde le echamos floculante para eliminar la máxima cantidad de agua que se pueda, seguidamente se echa a una bandeja de secado y se hace secar en la cocina eléctrica.

El tiempo de secado es aproximadamente 30 minutos, una vez seco a este mineral se le deberá pasar rodillo para soltar a las partículas se procede a hacer el cuarteo hasta llegar a 100gr. Estos 100 g se pasan por tamiz #200 se pesa y se calcula el % sólidos en peso que han pasado la malla 200. se hace los apuntes necesarios.

Una vez hecho esto y hallado el tiempo óptimo de molienda se procede a moler el mineral esta vez ya para flotar.

Echamos el mineral al molino asimismo el agua en esta parte a diferencia de la anterior en la que solamente se quería hallar el tiempo de molienda agregaremos ciertos reactivos, primero se agregaran los modificadores, en este caso el modificador del pH es la cal, luego los colectores estos se agregan parcialmente en esta etapa en el acondicionamiento se agregan al 100%, para nuestro caso el complejo sulfato de zn/cianuro que es nuestro depresor también se deberá agregar en esta etapa.

Se da el tiempo óptimo de molienda hallado aprox. 12min el control del es muy importante para esto usaremos el cronometro, demasiado tiempo puede ocasionar una sobremolienda y esto podría ser perjudicial por la formación de lamas. Se recibe el mineral en el balde de 5 litros y se echa a la celda de flotación.

En esta etapa es importante protegerse bien los oídos debido al ruido alto que origina el molino.

### **PREPARACION DE REACTIVOS**

**OBJETIVO:** preparar los reactivos en las dosis correctas y exactas de tal forma que en el momento de la flotación se agreguen las cantidades calculadas.

#### **MATERIALES:**

- (1) Probetas plástico de 10mL
- (2) Jeringas de 1 mL
- (3) Jeringas de 3 mL
- (4) Jeringas de 5 mL
- (5) Jeringas de 10 mL
- (6) Fiola 100 mL
- (7) Pomos de plástico
- (10) Balanza de 250 g

(11) Cucharitas de plásticos

(12) Embudos pequeños

10 g de  $\text{CuSO}_4$

7.5 g de  $\text{ZnSO}_4$

2.5 g de  $\text{NaCN}$

30 g de cal

10g de Z-6

10 mL MIBC

10 mL A-242

10 mL A-404

10 mL A-208

#### PROCEDIMIENTO:

Lo primero que se debe hacer es rotular las jeringas esto para evitar que por error se mezclen los reactivos y se malogre la prueba.

En el caso de los reactivos sólidos ( $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{ZnSO}_4$ ,  $\text{NaCN}$ ) se pesan en sobres de papel en la balanza de 250g estos se rotulan para que no haya confusión a la hora de la preparación. Debemos tener especial cuidado con el  $\text{NaCN}$  ya que este es muy peligroso.

Para la preparación de estos reactivos debemos usar los pomos de plásticos para mezclar echamos los reactivos en un pomo diferente cada uno excepto el complejo.

En el caso de los reactivos líquidos lo primero que se debe hacer es hallar el peso de una gota de c/u de ellos calibrándolo con la jeringa a usar. Para los aerofloats se debe usar las jeringas de 1 mL ya que estas son las que nos dan gotas más pequeñas, para el MIBC se usara la jeringa de 5 mL

A continuación, se procede a detallar la preparación de cada uno de los reactivos:

a) **ESPUMANTE**

**MIBC**

Propiedades

Este es el espumante ideal para este tipo de flotación diferencial ya que tiene propiedades de selectividad esto nos permite tener concentrados de alta ley con escaso contenido de pirita e insolubles.

Preparación

Se debe hacer bien el pesaje de c/gota ya que si agregamos demasiado espumante la prueba saldrá mal ya que las espumas arrastrarían tanto ganga como material valioso.

Este reactivo líquido se agrega puro es por eso que para echar a la celda de flotación lo usaremos en gotas, luego de hacer los cálculos respectivos de la cantidad requerida.

Usando la jeringa de 5mL y haciendo los cálculos aprox. se usará de 2-3 gotas.

b) COLECTORES

Z-6 (xantato amilico de potasio)

Propiedades

Es un reactivo sólido fácilmente soluble en agua tiene un color amarillento y su presentación es en pellets.

Este es el colector primario que se usara para la flotación del plomo. Este es un reactivo fuerte, pero es el menos selectivo de los xantatos por lo que se le tiene que ayudar con un colector auxiliar. Tiene tendencia a flotar sulfuros de hierro (pirita) es por eso que debemos usar depresores de pirita

Escogemos este tipo de xantato debido a su fuerte poder colector y debido a que nuestra flotación necesita una acción rápida.

Este reactivo se debe agregar en la etapa de acondicionamiento cuando el pH de la pulpa ya este regulado en 8-8.5 aprox. ya que tienen tendencia a descomponerse en medios ácidos. Aunque se usa también en circuitos de

flotación de acidez moderada no menor a pH 6. Debido a que su acción es rápida no es necesario agregarlo en la etapa de molienda.

Se debe tener cuidado con el exceso de este reactivo debido a que flota todo tipo de sulfuros, flotaría pirita e insolubles y lo contrario cuando se hecha muy poco se corre el riesgo de obtener poca recuperación y que los sulfuros valiosos pasen al relave.

#### Preparación

Luego de pesar 10 g lo depositaremos en un pomo de plástico le agregaremos 100mL de agua y agitaremos hasta que se disuelva bien, una vez que esté bien disuelto y homogenizado echamos a la probeta de plástico de 10mL según sea la cantidad requerida para la flotación.

#### **A-404**

#### Propiedades

Este reactivo lo usaremos como promotor o colector auxiliar solo cuando la galena se encuentre empañada es decir sea difícil de flotar y lo haremos en dosis muy bajas y con mucho cuidado ya que es un gran promotor de minerales zinc.

### Preparación

Lo usaremos en su forma pura y usando la jeringa de 1 ml para agregarlo a la celda de flotación. Es importante saber el peso de una gota para poder hacer nuestros cálculos de dosis y no cometer el error de echar en exceso.

### **A-208**

### Propiedades

Este reactivo es un excelente colector de oro y plata. Su acción es rápida así que no necesita mucho tiempo de acondicionamiento. Se usa debido a su selectividad contra la pirita y otros sulfuros.

### Preparación

Lo podemos usar tanto en su forma pura como en solución al 10%. Usaremos la jeringa de 1ml para agregar a la celda de flotación. Es importante que sepamos el peso de una gota para hacer nuestros cálculos.

### c) DEPRESORES

ZnSO<sub>4</sub>:

Propiedades

Son cristales incoloros sólidos muy parecidos físicamente a la sal, este reactivo se prepara en 2 formas.

La primera es en solución pura de sulfato de Zinc y la segunda es combinada con cianuro formando un complejo.

Este reactivo se usa como depresor de las partículas de Zn en la flotación del plomo, cuando se usa solo se agrega en una concentración del 5%. Se debe tener cuidado de usarlo en exceso ya que podría actuar deprimiendo los sulfuros de plomo y activando la pirita.

#### Preparación

Se pesa 5 g luego se deposita en un pomo de plástico se agrega 100mL de agua se agita hasta que todo el sulfato se disuelva una vez hecho esto se vacía a la probeta de 10 mL.

NaCN:

Son cristales de color blanco sólidos en forma de pellets este reactivo no se usa en solución pura se debe mezclar con el sulfato de zinc para formar un complejo.

El motivo por el cual se debe hacer el complejo es que el mineral tiene oro y plata y al agregar el cianuro en solución pura se corre el riesgo de disolución de ambos metales preciosos.

El cianuro de sodio es fuerte depresor de pirita, arsenopirita y esfalerita, pero se debe tener cuidado ya que en exceso puede deprimir los sulfuros de plomo y plata por lo contrario si se agrega muy poco se corre el riesgo de flotar demasiada pirita y ensuciar el concentrado.

#### COMPLEJO $ZnSO_4/NaCN$

##### Propiedades

El  $ZnSO_4$  se agregará para deprimir al Zn y la pirita en la flotación de plomo. El cianuro de sodio se agregará para activar a la galena y deprimir el zinc. Se deberá de preparar un complejo de sulfato de Zn con el cianuro de sodio.

##### Preparación

El complejo deberá ser preparado al 10%, el sulfato de zinc – cianuro de sodio será en una proporción de 3 de sulfato por 1 de cianuro es decir pesaremos 7.5g de sulfato de zinc por 2.5 g de cianuro de sodio esto lo depositaremos en uno de los pomos de plástico agregaremos 100ml de agua y agitaremos

hasta que toda la mezcla este disuelta. Luego pasamos a vaciarlo a la probeta de 10ml según la cantidad que hayamos calculado.

### BISULFITO DE SODIO

#### Propiedades

Este reactivo se usa como depresor de minerales de zinc y hierro, es recomendado en minerales con alto contenido de plata.

#### Preparación

Se pesará 10g de bisulfito de sodio este se vaciara a al pomo de plástico y se agregará 100ml de agua se debe agitar bien para lograr la disolución total del bisulfito.

#### d) ACTIVADOR

#### CUSO<sub>4</sub> (SULFATO DE COBRE)

#### Propiedades

Este reactivo es de color azul, viene en estado sólido y es soluble en agua, se usa para reactivar los sulfuros de Zn que han sido deprimidos por el sulfato de Zn en el circuito de flotación de Zn.

Se debe tener cuidado de no agregar en exceso ya que espesan las espumas y ensucian el concentrado de zinc con pirita. Cuando se echa muy poco no se reactivan completamente los sulfuros de zinc.

#### Preparación

El  $\text{CuSO}_4$  se deberá preparar al 10%, para esto se depositará en los pomos de plástico y se agregará 100ml de agua. En caso que los reactivos sean limitados se prepara al 1% y se aumenta el volumen de solución a echar en la celda de flotación.

Debemos agitar bien los pomos para que todo el  $\text{CuSO}_4$  se disuelva y sea una solución homogénea. Luego debemos pesar la cantidad calculada de solución de  $\text{CuSO}_4$  (ml) a la probeta de 10ml para de esta echar a la celda.

e) MODIFICADOR DE pH  
CAL

#### Propiedades

La cal la usaremos como el modificador de pH. El pH al que trabajaremos será entre 7.5-8.5 es muy importante mantener

este pH ya que si sube tendremos un concentrado sucio con mucha pirita.

Debido a la gran cantidad de plata que tenemos en nuestro mineral no es recomendable usar la cal como modificador de pH ya que esta puede tener efectos depresores sobre la recuperación del oro libre, otro de los riesgos que se corre es la activación de los minerales de zinc.

Preparación

Pesaremos en total 5g en paquetitos de 0.1, 0.2, 0.4, 0.5g.

CARBONATO DE SODIO ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )

Propiedades

Empezaremos a usar este modificador de pH para optimizar la recuperación de la plata y oro.

Preparación

Pesaremos en total 5g en paquetitos de 0.1, 0.2, 0.4, 0.5g.

## **FLOTACION DE MINERALES**

OBJETIVO: recuperación de los metales de interés económico en nuestro caso Cu. Obtener en el concentrado la

máxima recuperación posible de minerales de interés con la menor cantidad de impurezas (Sb, Bi, As).

**MATERIALES:**

- (1) Máquina de flotación tipo Denver laboratorio.
- (2) Celda de flotación de 2lts y 1 lt
- (3) Pizeta
- (4) Luna reloj
- (5) Paleta de plástico para sacar concentrado.
- (6) Bandejas metálicas
- (7) Medidor de pH

**PROCEDIMIENTO:**

Volteamos la pulpa que se encuentra en el balde de 5 lts a la celda de flotación agregamos el agua que falta hasta 2 cm. antes del borde de la celda aquí entramos en la etapa de acondicionamiento.

**Acondicionamiento:**

En esta etapa adicionaremos todos los reactivos faltantes recordemos que en la etapa de molienda agregamos cierta cantidad de complejo y la cal. El acondicionamiento se hará en la misma de celda de flotación, el tiempo estará entre 4-10 minutos dependiendo del tipo de mineral.

Encendemos el motor de la celda hacemos que funcione el agitador y que la pulpa se mezcle, en esta etapa no usaremos aire así que tenemos que cerciorarnos que nuestra entrada de aire este cerrada. A partir de aquí empezamos a adicionar los reactivos.

La adición de reactivo se hará en el siguiente orden:

Regulador de pH

Activador o depresor

Colector

Espumante

Para nuestro caso sería:

1. Cal: luego de agitar la pulpa tomamos el pH, recordemos que ya echamos cal en el circuito de molienda así que aquí se usará un mínimo solo para que nuestra pulpa se mantenga a un pH de 8-8.5.
2. Complejo: en el circuito de molienda también agregamos una parte del complejo ara que se acondicione, el resto lo vaciaremos en esta etapa.
3. Sulfato de zinc: agregaremos el sulfato de zinc según la dosis calculada.
4. z-6: echamos el xantato en solución.

5. A-242
6. A-208
7. A-404
8. Z-11
9. Espumante

Dejamos que la pulpa termine de acondicionar, debemos tomar nuestro pH hasta el final del acondicionamiento ya que ciertos reactivos podrían bajar nuestro pH.

Flotación rougher Cu:

En esta etapa nuestro objetivo principal es la recuperación de concentrado bulk Cu con una recuperación óptima y un mínimo de impurezas.

Abrimos la entrada de aire y veremos que se empiezan a formar las burbujas y espuma, esperamos a que se levanten hasta el ras y con nuestra paleta empezamos a retirar las espumas a la bandeja (esta ya debe estar rotulada como "CC rougher Cu"), esto se hace hasta que nuestras espumas estén levantando un concentrado rico en Cu. El tiempo aproximado de flotación rougher para nuestro mineral es entre 5 y 8 minutos.

Debemos tomar bien el tiempo de flotación con el cronometro ya que estos parámetros son muy importantes. Una vez que terminamos cerramos la entrada de aire y empieza el acondicionamiento para la flotación scavenger.

#### Flotación scavenger Cu

Esta es la continuación de nuestra flotación en donde flotamos el resto de cobre que nos queda.

Vamos a acondicionar de 2-4 minutos según sea conveniente, agregamos una cantidad de colector y según sea conveniente 1 gota de mibc.

Abrimos la entrada de aire y recolectamos las espumas en nuestra bandeja (esta la debemos rotular como "CC SCV Pb") por un tiempo aproximado de 4-5 minutos.

Una vez que veamos que nuestras espumas están pobres o sea blancas cerramos nuestra entrada de aire y empezamos con la flotación del Cu.

#### Flotación cleaner Cu

Normalmente en la flotación rougher de Cu el concentrado sale sucio ya que una gran cantidad de pirita flota e insolubles

y flota junto al plomo, para que nuestro concentrado sea limpiado procedemos a hacer una flotación de limpieza, es decir un concentrado del concentrado.

En esta etapa nuestro objetivo es deprimir la pirita por tanto en esta etapa acondicionaremos con complejo de sulfato zinc/cianuro de sodio y agregaremos espumante según sea la necesidad.

El tiempo que le daremos será entre 4-7 minutos.

### **SECADO DEL MINERAL**

**OBJETIVO:** como en todo proceso de flotación de minerales es necesario que nosotros sepamos cuales son nuestras recuperaciones y nuestras leyes, para esto debemos de hacer análisis químico a cada concentrado que hayamos obtenido en la prueba de flotación, para esto se debe de secar nuestro mineral, es decir eliminar el agua del concentrado.

**Materiales:**

- (1) Cocina eléctrica
- (2) Rodillo de amasar.
- (3) Periódicos
- (4) Floculante

- (5) Bolsas de 500g
- (6) Regla para cuarteo
- (7) Cucharita de plástico.

Procedimiento:

Una vez que terminemos nuestra prueba de flotación y tengamos las bandejas rotuladas según a la etapa que corresponda procedemos a eliminar el agua que se puede vaciar fácilmente, recordemos que para evitar que las lamas o los finos se nos vayan debemos poner detergente en la parte de la bandeja de donde estemos vaciando.

Una vez que hemos eliminado el agua superficial procedemos a echar el floculante esto para que nos ayude en la sedimentación. Luego de poner en la cocina eléctrica por más o menos 30 minutos.

Una vez que este seco nuestro concentrado lo vaciamos al periódico y le pasamos rodillo hasta que las partículas se suelten luego se cuartea y se separa 20 gramos los cuales pasaremos al laboratorio para su respectivo análisis.

## **5.5. DESARROLLO EXPERIMENTAL DE FLOTACIÓN**

La flotación se ha llevado a cabo empleando un tanque agitado, que consta de un recipiente de plástico con una capacidad de 2 litros,

con tapa en la que se han practicado tres orificios, a través del primero de los cuales pasa el eje de un mezclador de paletas que es accionado por un pequeño motor de velocidades regulables a través de un reductor; por el segundo se coloca el ingreso de aire y por el tercero sale un tubo al que se adapta una manguera de hule para unirlo con el absorbedor-mezclador, que es el dispositivo encargado de captar los vapores.

Las características mineralógicas de la mena tales como su composición, el tamaño de las partículas, los tamaños de liberación de estas, las texturas de los minerales, indicaban que una secuencia muy promisoría en el beneficio del mineral para ser probada era la concentración gravimétrica de la cabeza del material, complementada con la flotación espumante del rechazo de dicha concentración gravimétrica.

Se realizaron pruebas de moliendabilidad para determinar el tiempo de residencia en el molino del laboratorio para alcanzar un tamaño de partícula de 150 micrones definido como el tamaño propicio para la molienda primaria, de acuerdo al tamaño de liberación encontrado y a la aplicación de la concentración gravimétrica.

## CAPÍTULO VI

### RESULTADOS

#### 6.1. RESULTADOS OBTENIDOS.

TABLA 1

RESULTADOS DEL ANÁLISIS QUÍMICO DE LA MUESTRA

COMPONENTE	CONCENTRACIÓN
Cobre insoluble, %	2,53
Cobre soluble, %	0,87
Total de cobre, %	15,4
Hierro, %	0,59
Azufre, %	21

Fuente: Datos experimentales.

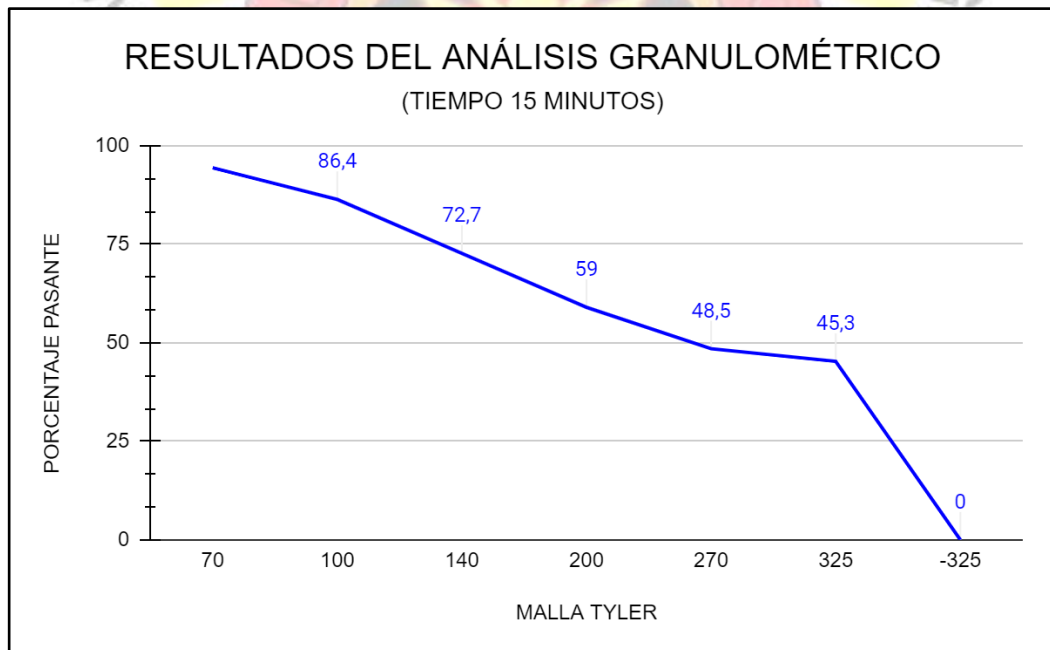
La tabla 1 muestra los resultados del análisis químico de la muestra de mineral que contiene 12,53% de sulfuros de cobre; 0,87% de óxidos de cobre y un 0,59% de Hierro; así como un elevado contenido de azufre que alcanza el 21%. La muestra contiene un total de 3,4% de cobre.

TABLA 2  
 RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO  
 (TIEMPO 15 MINUTOS)

Malla Tyler	Abertura (µm)	Peso, G	Porcentaje en peso	Porcentaje retenido	Porcentaje pasante
70	212	21,2	5,3	5,6	94,4
100	150	33,5	8,3	13,6	86,4
140	106	55,3	13,7	27,3	72,7
200	75	57,4	14,3	41,0	59,0
270	53	42,1	10,5	51,5	48,5
325	45	12,70	3,2	54,7	45,3
-325		180,3	44,8	100	0,0
Total		402,5	100	P80 (µm)	125

Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO 1



Fuente: Datos de la tabla 2.

La tabla 2 y el gráfico 1, muestran los resultados de la molienda del mineral, durante 15 minutos, la cantidad en gramos de pasante del mineral molido durante este tiempo, donde se puede observar que el tamizaje se ha hecho en mallas que van desde malla 70 hasta malla 325, habiéndose registrado un mayor porcentaje a malla 70 y menor porcentaje a malla 325.



TABLA 3  
CONDICIONES DE FLOTACIÓN

PARÁMETROS Y MATERIALES	CANTIDADES
Peso del mineral, g	931.3
Densidad de la pulpa, g/mL	1 250
Granulometría del mineral, $\mu\text{m}$	150
Agua, L	1,600
Velocidad de agitación en el acondicionamiento, rpm	1 350
Velocidad de agitación en la flotación, rpm	1250
Porcentaje de sólidos, %	31,2
pH	9
Cal (CaO), g	0,5
MIBC, gotas	1
Tiempo de flotación, min.	8
Tiempo de acondicionamiento, min.	4

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 3 se dan a conocer los parámetros que permanecerán fijos en todos los ensayos a realizarse con los colectores seleccionados, a fin de establecer valores estándares de ensayo y poder hacer un estudio comparativo adecuado.

TABLA 4

ENSAYOS CON EL PROMOTOR A-404

NÚMERO DE ENSAYO	DOSIFICACIÓN DEL COLECTOR, g/T	Cu RECUPERADO, g
01	5	21,2
02	10	23,4
03	15	26,3
04	20	27,2
05	25	28,9
06	30	30,1
RENDIMIENTO, %		95,1

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 4 muestra los resultados de las pruebas realizadas con el promotor A – 404, en las que se obtuvo un 95,1 % de rendimiento en la recuperación del cobre, empleando cantidades elevadas del promotor, con un máximo de 30 g/T de colector.

TABLA 5  
ENSAYOS CON EL XANTATO Z - 11

NÚMERO DE ENSAYO	DOSIFICACIÓN DEL COLECTOR, g/T	Cu RECUPERADO, G
01	5	20,2
02	10	22,3
03	15	24,2
04	20	26,4
05	25	27,9
06	30	30,6
RENDIMIENTO, %		96,7

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 5 muestra los resultados de las pruebas realizadas con el xantato Z-11, en las que se obtuvo un 96,7 % de rendimiento en la recuperación del cobre, empleando también cantidades elevadas del colector, con un máximo de 30 g/T.

TABLA 6

ENSAYOS CON EL XANTATO Z - 6

NÚMERO DE ENSAYO	DOSIFICACIÓN DEL COLECTOR, g/T	Cu RECUPERADO, g
01	5	22,0
02	10	24,9
03	15	26,4
04	20	27,9
05	25	29,1
06	30	31,2
RENDIMIENTO, %		98,6

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 6 muestra los resultados de las pruebas realizadas con el xantato Z - 6, en el que se obtuvo un 98,6 % de rendimiento en la recuperación del cobre, empleando, en este caso, también cantidades elevadas del colector, es decir, 30 g/T.

TABLA 7

ENSAYOS CON EL PROMOTOR A-242

NÚMERO DE ENSAYO	DOSIFICACIÓN DEL COLECTOR, g/T	Cu RECUPERADO, g
01	5	18,3
02	10	20,7
03	15	22,1
04	20	24,5
05	25	26,6
06	30	28,1
RENDIMIENTO, %		88,8

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 7 muestra los resultados de las pruebas realizadas con el promotor A-242, en el que se obtuvo un 88,8 % de rendimiento en la recuperación del cobre, empleando, en este caso, también cantidades elevadas del colector, es decir, 30 g/T.

TABLA 8  
ENSAYOS CON EL PROMOTOR A-208

NÚMERO DE ENSAYO	DOSIFICACIÓN DEL COLECTOR, g/T	Cu RECUPERADO, g
01	5	18,6
02	10	20,3
03	15	22,9
04	20	25,2
05	25	27,6
06	30	29,3
RENDIMIENTO, %		92,6

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 8 muestra los resultados de las pruebas realizadas con el promotor A-208, en el que se obtuvo un 92,6 % de rendimiento en la recuperación del cobre, empleando, en este caso, también cantidades elevadas del colector, es decir, 30 g/T.

TABLA 9

RESULTADOS COMPARATIVOS DE RENDIMIENTO

Nº	COLECTOR	RENDIMIENTO, %
01	Promotor A-404	95,1
02	Xantato z – 6	98,6
03	Xantato Z – 11	96,7
04	Promotor A-242	88,8
05	Promotor A-208	92,6

Fuente: Datos tablas 4, 5, 6, 7 y 8.

La tabla 9 muestra los resultados comparativos de los tres colectores usados en el mineral oxidado-sulfurado de cobre, en ella se puede observar que el Z-6, es el colector que tiene el más alto rendimiento (98,6%) mientras que el promotor A-242 es el de más bajo rendimiento (88,8%)

## 6.1. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

El estudio experimental desarrollado en la presente tesis, en la que como muestra mineral se ha empleado un mineral que contiene sulfuro y óxidos del cobre, de estos últimos, una menor cantidad, ha demostrado que el colector Z – 6, es el de mayor rendimiento, ya que se ha podido recuperar un 98,6% del cobre presente en el mineral, incluyendo el cobre soluble. En los cinco casos se ha empleado las mismas condiciones de ensayo, las cantidades de colector ha ido creciendo en cada prueba, lo que indica que este tipo de mineral requiere lo máximo aconsejado de colector para lograr un buen rendimiento.

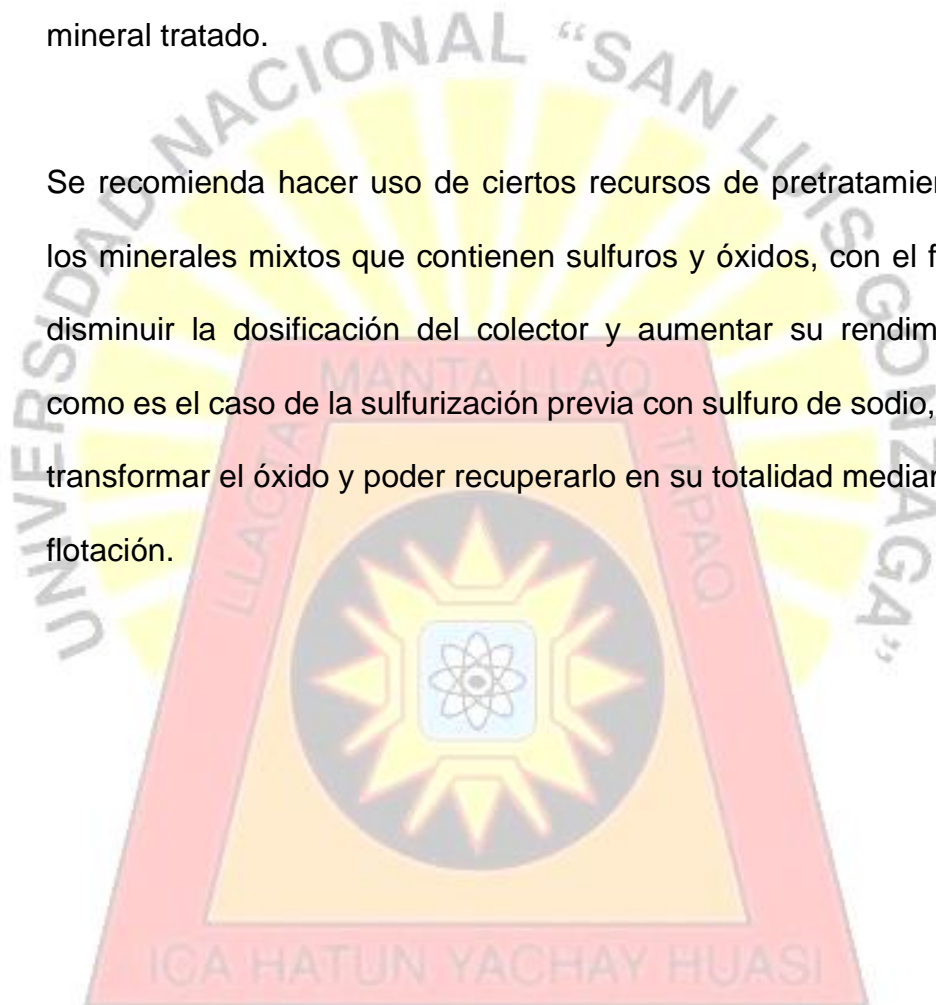
Se ha demostrado también que el comportamiento del colector Z–6 se ve favorecido en un medio alcalino, con un pH 9 al cual se ha llegado con la adición a la muestra de 0,5 g de óxido de calcio, el cual al disolverse en el agua conforma el hidróxido de calcio que le da carácter básico a la pulpa.

## CONCLUSIONES

1. Debido a que todos los minerales que se tratan en una planta no son los mismos desde el punto de vista de su composición química, es necesario realizar los ensayos pertinentes que permitan establecer que colector es el más adecuado para lograr un máximo de recuperación del cobre presente en el mineral.
2. De los cinco colectores empleados se ha demostrado que el xantato Z-6 es el que mejor mejores resultados a tenido, pues se ha podido recuperar 31,2 gramos de cobre del mineral tratado, el mismo que tiene un total de 31,65 g de dicho metal.
3. El mayor rendimiento obtenido en las pruebas experimentales ha sido de 98,6%, dado por el xantato Z-6, empleando una cantidad de 30 g/T, es decir la cantidad máxima recomendada de empleo de este tipo de colector.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar ensayos con otros colectores a fin de establecer un criterio más acertado sobre el uso de los colectores en la flotación del cobre, teniendo en cuenta las particularidades del mineral tratado.
2. Se recomienda hacer uso de ciertos recursos de pretratamiento a los minerales mixtos que contienen sulfuros y óxidos, con el fin de disminuir la dosificación del colector y aumentar su rendimiento como es el caso de la sulfurización previa con sulfuro de sodio, para transformar el óxido y poder recuperarlo en su totalidad mediante la flotación.



## BIBLIOGRAFÍA

- Arana Murriel Jaime / Joe Pezo Sánchez "Curso de Hidrometalurgia de Oro y Cobre" Universidad Nacional de Ingeniería, 2003
- Avendaño V. Carlos, Aspectos Teóricos de Procesos LX-SX-EW, 1996.
- Cáceres Germán; Hidrometalurgia y Electrometalurgia, 2007.
- Fisher H, "The Nucleation Dependent Growth Layer- A Structure Element Electrocrystallization", 1969.
- Guzmán, Maribel, Hidrometalurgia del Cobre, 2009.
- Hernández P. Marcelo, Control de Hierro en el circuito de extracción por solventes para la Sociedad Contractual Minera el Abra, 2007.
- Henkel, Control de Procesos en Plantas de extracción Por Solventes, 1998.
- Kordosky Gary, Copper Solvent Extraction for Concentrate Leach Solutions, Cognis Corporation, 2008
- Kordosky, Gary A; Hans Steger, Patent US2004/0103756A1, 2004.
- MCT Redbook, Reactivos de Extracción por Solventes y sus Aplicaciones, by Cognis Group, 2008.
- Mantell C.L. "INGENIERIA ELECTROQUIMICA" 1980
- MinPeru, Balance de Minería del Perú 2010, 2011.
- Posadas Dionisio, Introducción a la Electroquímica, 1980.
- Pourbaix M. "Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions" Pergamon Press, New York. USA, 1974

Navarro et al, Uso de un modelo químico de SX en la obtención matemática de diagramas de Mc Cabe Thiele, 2005.

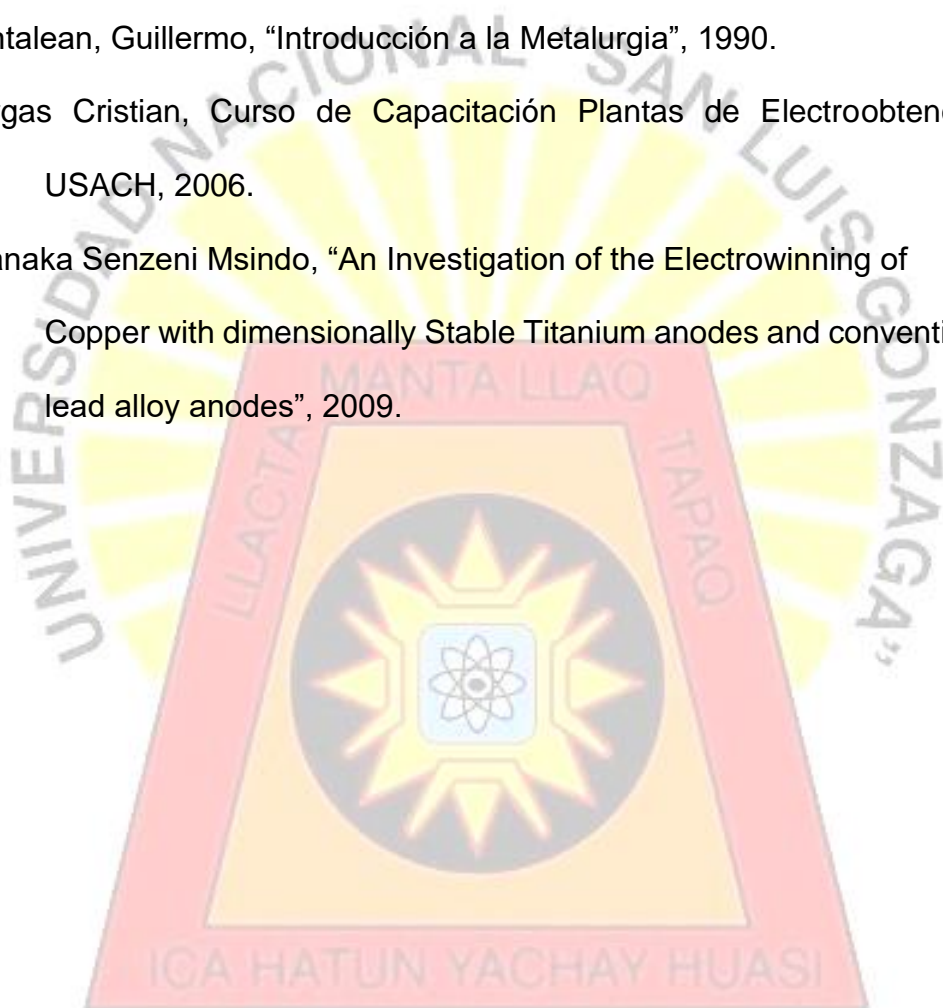
Nicol. M.J “Electrowining and Electrorefining of Metals”; .2006.

TECSUP, Curso “Hidrometalúrgia, Procesos Químicos y Metalúrgicos”, 2000.

Tantalean, Guillermo, “Introducción a la Metalurgia”, 1990.

Vargas Cristian, Curso de Capacitación Plantas de Electroobtención, USACH, 2006.

Zvanaka Senzeni Msindo, “An Investigation of the Electrowinning of Copper with dimensionally Stable Titanium anodes and conventional lead alloy anodes”, 2009.





## ANEXOS

## METODOS DE ENSAYO DEL COBRE

### Cobre soluble – Método del Cianuro de Potasio.

#### Aplicación

Este ensayo se realiza para cuantificar los óxidos de cobre presentes en el mineral.

#### Reactivos:

Ácido sulfúrico.

Hidróxido de amonio

Agua destilada.

Cianuro de potasio.

#### Procedimiento:

Pesar 1,0 g de muestra cuando es cabeza o relave y 0,5 g cuando es concentrado.

Agregar ácido sulfúrico concentrado 10 mL y llevar a la plancha hasta desprendimiento de humos blancos.

Retirar de la plancha y dejar enfriar, luego agregar agua destilada 50 mL.

Volver a calentar hasta ebullición, durante 5 minutos y retirar de la plancha, dejar enfriar y filtrar.

Cuando está frío el contenido del vaso se vierte hidróxido de amonio en exceso, pero con mucho cuidado y llevar a la plancha hasta ebullición por otros cinco minutos.

Retirar de la plancha, dejar enfriar y filtrar nuevamente quedando esta vez una masa grumosa pardo rojiza de hidróxido de hierro.

Titular en frío con cianuro de potasio hasta formación de un precipitado amarillo de cianuro de cobre  $\text{Cu}(\text{CN})_2$ .

La ley de cobre soluble se halla con la fórmula:

$$\% \text{Cu} = [\text{Gasto de KCN en mL} \times F \times 100] / \text{Peso de la muestra.}$$

### **Cobre insoluble – Método del cianuro de potasio.**

#### Aplicación.

Permite determinar cuantitativamente los sulfuros de cobre presentes en el mineral.

#### Reactivos:

Ácido clorhídrico

Ácido nítrico

Clorato de potasio

Hidróxido de amonio

Agua destilada.

#### Procedimiento.

Pesar 1 g de muestra cuando es cabeza y relave y 0,5 g cuando es concentrado.

Atacar con 10 mL de ácido clorhídrico, llevar a ebullición en la plancha hasta desprendimiento de humos blancos de vapor de agua; agregar 10 mL de ácido nítrico y una pizca de clorato de potasio para lograr una oxidación rápida.

Evaporar el líquido hasta conseguir una masa pastosa, enfriar totalmente y agregar 50 mL de agua destilada e hidróxido de amonio hasta lograr la precipitación del hierro.

Colocar en la plancha durante 5 minutos, bajar y filtrar lavando el precipitado 2 ó 3 veces, para luego dejar enfriar y titular con cianuro de potasio.

La ley (%) de cobre insoluble se calcula con la misma fórmula empleada para el cálculo del cobre soluble.

#### **Preparación de la solución estándar de KCN**

Para preparar la solución estándar de cianuro de potasio, pesar 21 g de esta sal químicamente pura (Q.P.) y disolver con agua destilada hasta completar un litro de solución.

#### **Determinación del Factor (F).**

Para determinar F (el factor) se pesa 0,5 mg de cobre metálico puro, en tres vasos y se ataca con 10 mL de ácido nítrico Q.P. y llevar a calentamiento hasta eliminación total de vapores nitrosos.

Bajar de la plancha y dejar enfriar para luego agregar 50 mL de agua destilada con 10 mL de hidróxido de amonio, llevando nuevamente a calentamiento hasta ebullición.

Retirar de la plancha, dejar enfriar y titular con cianuro de potasio.

Calcular el factor (F) con la siguiente fórmula:

$$F = (\text{Peso del cobre}) / (\text{Gasto de KCN, en mL})$$

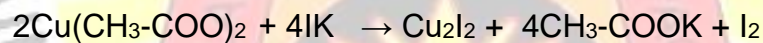
### **Método iodométrico.**

#### Aplicación.

El método de ioduro es uno de los métodos más exactos que se conoce para la determinación del cobre en minerales.

#### Fundamento y calculo.

El método se basa en que si se trata una solución de sal cúprica neutra o débilmente ácida, con yoduro de potasio en exceso, se precipita todo el cobre en estado de yoduro cuproso y queda libre un átomo de cobre. El yodo liberado se valora con solución de tiosulfato de sodio, según las reacciones.



Para cálculos:

1Litro de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  0.1N =  $\text{Cu}/10 = 6,357$  g para un litro.

Para solución 0.1N de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  tomar 24,8105 g para un litro.

$$1\text{mL} = 0,006357 \text{ g de Cu}$$

La determinación del porcentaje de cobre en un mineral constituye un ejemplo de un análisis que emplea el ion yoduro como agente reductor, y yodo como agente oxidante.

### Preparación y estandarización de soluciones.

Las soluciones que se necesitan son: agua de bromo, suspensión de almidón y solución estándar de tiosulfato de sodio.

#### SUSPENSIÓN DE ALMIDÓN.

Esta suspensión debe de ser recientemente preparada. Con 1 g de almidón soluble al cual se le agrega agua, poco a poco, se prepara una pasta delgada. Se vacía ésta en 100 mL de agua hirviendo, al tiempo que se agita vigorosamente. Se enfría, se agregan 2 g de KI sólido y se agita hasta disolverlos.

#### SOLUCIÓN ESTÁNDAR DE TIOSULFATO DE SODIO.

Es mejor utilizar esta solución unos días después de haberla preparado. La estandarización de la solución debe hacerse simultáneamente con las titulaciones de las muestras problemas, si se desea resultados de la más alta precisión:

- a. Se disuelve 20 g de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  en unos 500 mL de agua destilada fría, que se ha hervido para eliminarle el  $\text{CO}_2$ .
- b. Se agregan unos 0,5 g de NaOH y se diluye a un litro.
- c. Se limpian 2 g de cobre electrolítico puro, primeramente, con fibra de acero y seguidamente con solución de HCl.
- d. En un matraz Erlenmeyer de 250 mL se pesa el cobre con exactitud.
- e. Se añaden 10 mL de ácido nítrico concentrado.

- f. Cuando la reacción cesa , se agrega 5 mL de agua de bromo saturada y se hierve por 2 minutos.
- g. Se diluye a 50 mL y se enfría.
- h. Se agrega gota a gota hidróxido de amonio, hasta que el hidróxido de cobre de color celeste que se forma al principio, comienza a disolverse, indicación de lo cual es que la solución empiece a tomar un color azul más oscuro. No se debe añadir tanto amoniaco que la solución vaya a adquirir un color azul oscuro.
- i. Se agregan unos 5 mL de ácido acético glacial.
- j. Se pasa a un matraz volumétrico de 500 mL, se enfría y se diluye hasta la marca de aforo.
- k. Se pipetea 50 mL de esta solución dentro de un matraz Erlenmeyer de 250 mL
- l. Se diluye a 100 mL y se adicionan 3 g de KI previamente disueltos en unos 10 mL de agua destilada.
- m. Se titula con solución de tiosulfato hasta que el color café del yodo haya desaparecido totalmente.
- n. Se agrega 1 mL de solución de almidón y se titula hasta que el color azul comienza a decolorarse.
- o. Se agrega 1 mL más de solución de almidón y 2 g de  $\text{NH}_4\text{SCN}$  (Sulfocianuro de amonio), disueltos en agua. El ion sulfocianuro desplaza al  $\text{I}_2$  adsorbido sobre el  $\text{Cu}_2\text{I}_2$  (yoduro cuproso) que se formó como un precipitado durante la titulación.

- p. Se titula hasta que el color cambia a un tanino muy ligero.
- q. Se calcula el título en cobre de la solución de tiosulfato:

Título en Cu = Peso del Cu/ mL de titulante.

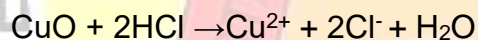
### Análisis del mineral.

El tratamiento que se describe sirve para disolver minerales que contienen sulfuros, óxidos o cobre metálico.

### REACCIONES DURANTE EL ANÁLISIS.

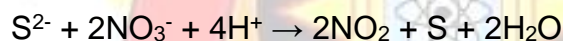
Las siguientes reacciones pueden ocurrir durante el análisis:

- a. En la solución de HCl se disolverá el óxido de cobre, así:

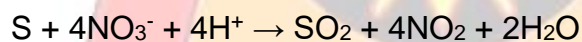


- b. El sulfuro de cobre se disolverá solamente si se agrega ácido nítrico.

El nitrato oxida el  $\text{S}^{2-}$  a azufre libre.

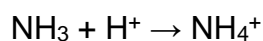


El azufre puede ser oxidado ulteriormente a  $\text{SO}_2$

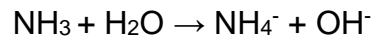


Estas dos reacciones reducen la concentración del ion sulfuro por debajo de la concentración en la constante de producto de solubilidad para el  $\text{CuS}$ . La concentración de  $\text{Cu}^{2+}$  aumenta grandemente y el  $\text{CuS}$  se disuelve.

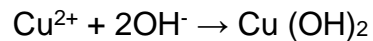
- c. La adición de hidróxido de amonio neutraliza el exceso de ácido.



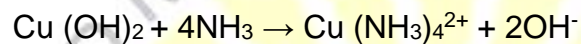
Aumenta también la concentración de  $\text{OH}^-$ , de manera que el hidróxido de cobre precipita.



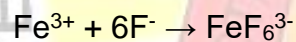
y



Si se agrega demasiado amoníaco, se redisolverá el hidróxido de cobre formando un ion complejo de color azul oscuro:

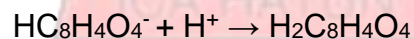


- d. Se agrega bifluoruro de amonio para formar un ion complejo muy estable con los iones férricos. De otra manera los iones férricos reaccionarían con el ion yoduro para dar yodo libre.



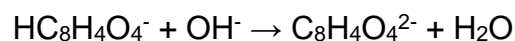
Esta reacción reduce la concentración de  $\text{Fe}^{3+}$  por debajo de la que se necesita para oxidar los iones yoduro.

- e. El ftalato ácido de potasio contiene el ion biftalato que puede reaccionar indistintamente con un exceso de  $\text{H}^+$  o de  $\text{OH}^-$  manteniendo el pH entre 3,5 y 4,5. Por consiguiente el ion biftalato es un buffer:

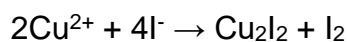


Esta reacción se verifica si en la solución hay un exceso de ácido.

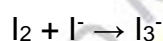
De haber un exceso de iones oxhidrilo la reacción que se efectúa es la siguiente:



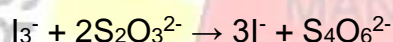
- f. Los iones cúpricos oxidan el ion yoduro a yodo libre.



El yoduro cuproso es insoluble y precipita adsorbiendo  $\text{I}_2$  considerablemente, a menos que estén presentes bastantes iones sulfocianuro para desplazar el yodo. Las moléculas de yodo reaccionan con los iones yoduro para formar un ion complejo débil, el ión triyoduro:



- g. El ion triyoduro es reducido a yoduro por los iones tiosulfato de la solución estándar.



#### PROCEDIMIENTO.

El mineral se disuelve y analiza de acuerdo con los siguientes pasos:

- Se seca el mineral por una hora a  $105-110^{\circ}\text{C}$ . Un sobre secado puede ocasionar que el oxígeno del aire oxide los sulfuros del mineral.
- En matraces Erlenmeyer de 500 mL, si es que no hay disponibles matraces de cobre, se pesan muestras de 1 g de mineral.
- Se agregan 10 mL de HCl concentrado.
- Se hierve hasta reducir el volumen hasta 5 mL.
- Se adicionan 10 mL de  $\text{HNO}_3$  concentrado.
- Se hierven hasta reducir el volumen a unos 10 mL.

- g. Se agrega 10 mL de HCl concentrado y se hierve hasta reducir el volumen a unos 10 mL.
- h. Se enfrían y se agregan con mucho cuidado 10 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado.
- i. Se hierve para expulsar por lo menos 5 mL de líquido del matraz. Se continúa la ebullición hasta que por la boca del matraz escapen vapores blancos de ácido sulfúrico, por lo menos por 30 segundos. Todo el HCl debe ser volatilizado.
- j. Se enfría, se añaden 20 mL de agua y se calienta hasta que los humos blancos, densos, vuelvan a aparecer por la boca del matraz.
- k. Se enfría y se diluye a 25 – 30 mL.
- l. Se adiciona hidróxido de amonio hasta que el color verde comience a volverse azul.
- m. Se agregan 2 g de bifluoruro de amonio (NH<sub>4</sub>HF<sub>2</sub>) y se agita hasta disolverlo completamente.
- n. Se agregan 3 gramos de yoduro de potasio y se disuelve.
- o. En este punto para actuar como buffer se puede adicionar y disolver un gramo de ftalato ácido de potasio. Sin embargo, rara vez se necesita.
- p. Utilizando almidón como indicador se titula con tiosulfato de sodio hasta que el color café del iodo haya desaparecido.
- q. Se calcula el porcentaje de cobre en el mineral.

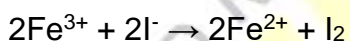
$$\text{Título} \times \text{volumen de titulación} = \text{g de Cu}$$

### Errores del método

Existen muchas posibles causas de error en este análisis, pero, con precauciones apropiadas se pueden obtener excelentes resultados.

### IONES FÉRRICOS.

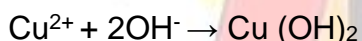
El  $\text{Fe}^{3+}$  al igual que el  $\text{Cu}^{2+}$ , oxida al  $\text{I}^-$ , a menos que el ion férrico sea separado de la solución:



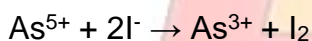
Para evitar esta reacción con el  $\text{NH}_4\text{HF}$  se agregan iones fluoruro, los cuales forman un ion complejo estable.

### CONTROL DEL pH.

Con un pH superior a 4,5 el  $\text{Cu}^{2+}$  reacciona con el  $\text{OH}^-$ , precipitando de la solución y originando una oxidación incompleta del  $\text{I}^-$ .

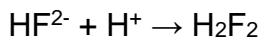


Con un pH inferior a 3,5 tanto el  $\text{As}^{5+}$  como el  $\text{Sb}^{5+}$ , de estar presentes pueden oxidar el  $\text{I}^-$ :

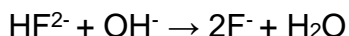


El antimonio reacciona de forma similar. Por consiguiente, la solución que se va a analizar debe bufferizarse a un pH entre 3,5 y 4,5. El ion bifluoruro del  $\text{NH}_4\text{HF}_2$  por lo general es un agente regulador suficiente, aunque el ftalato ácido de potasio con frecuencia se agrega como agente bufferizante

adicional. El ion bifluoruro bufferiza del mismo modo que el ion biftalato, con exceso de  $H^+$ :



Y con exceso de  $OH^-$ :



#### ADSORCIÓN DEL $I_2$ SOBRE EL $Cu_2I_2$ .

El precipitado de yoduro cuproso adsorbe  $I_2$  fuertemente, a menos que cantidades relativamente grandes de  $SCN^-$  estén presentes para ser adsorbidos, desplazando así al  $I_2$  de las superficies de los cristales de yoduro cuproso.

#### INESTABILIDAD DE LA SOLUCIÓN DE TIOSULFATO.

El tiosulfato se descompone en soluciones ácidas o neutras y con el  $O_2$  del aire, produciendo azufre y sulfatos o sulfitos. La adición de  $NaOH$  ó  $Na_2CO_3$  estabiliza algo la solución, pero es mejor que las titulaciones y estandarizaciones se complementen el mismo día.