

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESTUDIO PRELIMINAR A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA  
CONCENTRACIÓN Y SEPARACIÓN DE LA ESTIBNITA POR EL MÉTODO  
DE FLOTACIÓN, UTILIZANDO UNA CELDA DE FLOTACIÓN TIPO  
DENVER DE LA MINA LOS ANGELES UBICADA EN PALENCIA,  
MUNICIPIO DE GUATEMALA.**

**TESIS**

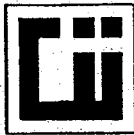
**PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR**

**JORGE LUIS LÓPEZ POLANCO**

**AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO**

**GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 1999.**



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Guatemala, 18 de agosto de 1999

Ingeniero:  
Otto Raúl De León De Paz.  
Director de la Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería,  
Presente

Ing. De León

Hago de su conocimiento que habiendo revisado el trabajo de tesis del estudiante: **JORGE LUIS LÓPEZ POLANCO**, denominado **ESTUDIO PRELIMINAR A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA SEPARACIÓN Y CONCENTRACIÓN DE LA ESTIBNIA POR EL MÉTODO DE FLOTACIÓN UTILIZANDO UNA CELDA DE FLOTACIÓN TIPO DENVER, DE LA MINA LOS ANGELES UBICADA EN PALENCIA MUNICIPIO DE GUATEMALA.**

Sin otro motivo en particular, me suscribo de usted.

Atentamente

Ing. Telma Cano  
Supervisor de Laboratorios  
Sección de Química Industrial  
Centro de Investigaciones de Ingeniería  
Colegiado N.433

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 18 de agosto de 1,999.

Ingeniero  
Otto Raúl de León de Paz  
Director Escuela Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Presente.

Estimado Ingeniero de León.

Por medio de la presente me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que he revisado el Informe Final de Tesis del estudiante **Jorge Luis López Polanco**, titulado: **ESTUDIO PRELIMINAR A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA SEPARACION Y CONCENTRACION DE LA ESTIBNITA POR EL METODO DE FLOTACION UTILIZANDO UNA CELDA DE FLOTACION TIPO DENVER, DE LA MINA LOS ANGELES UBICADA EN PALENCIA MUNICIPIO DE GUATEMALA**, de lo cual dejo constancia de aprobación para la autorización del respectivo trabajo.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. César García Guerra  
REVISOR

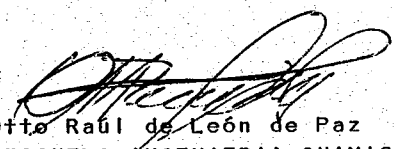
ESCUELA DE  
INGENIERIA QUIMICA

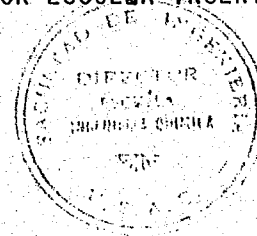
**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA**

El Director de la Escuela de Ingeniería Química, Ing. Otto Raúl de León de Paz, después de conocer el dictamen del Asesor con el Visto Bueno del Jefe de Departamento, al trabajo de Tesis del estudiante, Jorge Luis López Polanco, titulado: **ESTUDIO PRELIMINAR A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA CONCENTRACION Y SEPARACION DE LA ESTIBNITA POR EL METODO DE FLOTACION, UTILIZANDO UNA CELDA DE FLOTACION TIPO DENVER DE LA MINA LOS ANGELES UBICADA EN PALENCIA, MUNICIPIO DE GUATEMALA,** procede a la autorización del mismo.

  
Ing. Otto Raúl de León de Paz  
DIRECTOR ESCUELA INGENIERIA QUIMICA



Guatemala, noviembre de 1,999.

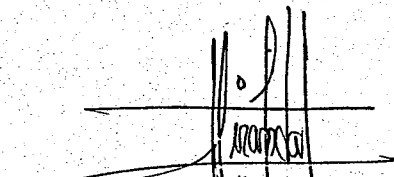
**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA**

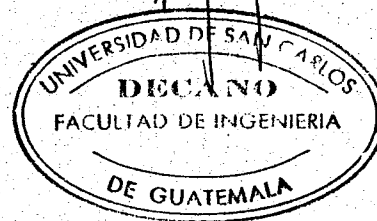


**FACULTAD DE INGENIERIA**

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de Tesis titulado: **ESTUDIO PRELIMINAR A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA CONCENTRACION Y SEPARACION DE LA ESTIBNITA POR EL METODO DE FLOTACION, UTILIZANDO UNA CELDA DE FLOTACION TIPO DENVER DE LA MINA LOS ANGELES UBICADA EN PALENCIA, MUNICIPIO DE GUATEMALA**, del estudiante, **Jorge Luis López Polanco**, procede a la autorización para la impresión de la misma.

**IMPRIMASE:**

  
Ing. Herbert René Miranda Barrios  
DECANO



Guatemala, noviembre de 1,999.

## **ACTO QUE DEDICO**

**A MI FAMILIA**

**Por ser los responsables del éxito alcanzado y por los esfuerzos y sacrificios que representa.**

**A MI ESPOSA**

**Por darme su amor y apoyo incondicional en todas las actividades que he efectuado.**

**A MIS HIJOS**

**Por ser ellos mi fuente de inspiración.**

**AL M.E.M**

**Especialmente a la Dirección General de Minería, por permitirme efectuar la fase experimental en el laboratorio de procesamiento de minerales.**

**AL C.I.I**

**Por su apoyo y participación en la culminación de la tesis.**

**A MIS COMPAÑEROS**

**Del laboratorio químico Julio Beltranena y laboratorio de procesamiento de minerales por su colaboración y entusiasmo en la realización de la tesis.**

## ÍNDICE GENERAL

	<b>Página</b>
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	IV
LISTA DE SIMBOLOS	VI
GLOSARIO	VII
RESUMEN	VIII
INTRODUCCIÓN	X
ANTECEDENTES	XII
OBJETIVOS	XV
HIPÓTESIS	XVI
1. LO ESENCIAL DE LA FLOTACIÓN	1
1.1 Generalidades de la flotación	1
1.2 Fundamentos fisicoquímicos	2
1.3 Termodinámica de la flotación	5
2. REACTIVOS DE FLOTACIÓN	7
2.1 Colectores	8
2.1.1 Colectores aniónicos	9
2.1.2 Colectores catiónicos	13
2.2 Espumantes	14
2.3 Activación, pasivación y sulfuración	16
2.4 Gas de flotación	17
2.4 Química de flotación	17
3. IMPACTO AMBIENTAL	20
3.1 Efectos en la salud e impacto ambiental	20
3.2 Efectos en la salud	20
3.3 Efectos ambientales	21

3.4	Efluentes líquidos de flotación	23
4.	EQUIPO DE FLOTACIÓN	24
4.1	Celdas de flotación	24
5.	CARACTERISTICAS DEL YACIMIENTO	26
6.	ANTIMONIO Y SUS PROPIEDADES	29
6.1	Antimonio	29
6.2	Propiedades físicas y químicas	30
6.3	Estado natural y producción	30
6.4	Aplicaciones del antimonio	31
6.4.1	Aplicaciones del antimonio como semiconductor	32
6.4.2	Acción biológica del antimonio	33
7.	RESULTADOS	34
8.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	42
9.	CONCLUSIONES	49
10.	RECOMENDACIONES	50
11.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
12.	BIBLIOGRAFÍA	52
13.	APÉNDICE	54



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

	Página
1. Mecanismo de flotación	3
2. Celda de flotación	4
3. Tamaño de partícula vrs. % Sb	38
4. Concentración vrs. % Sb	38
5. Condiciones iniciales y finales de la flotación	39
6. Concentración vrs % Sb (Resultados finales)	39
7. Tamaño de partícula vrs gramos recuperados de $Sb_2S_3$	40
8. Concentración vrs recuperación de $Sb_2S_3$	40
9. Concentración vrs recuperación de $Sb_2S_3$ (para un mesh No. 100)	41
10. Sulfuro de antimonio extraído mediante la flotación	41
11. Estructura del xantato isopropílico de sodio	44
12. Diagrama de flujo	56
13. Pto. de muestreo del antimonio en la concesión minera Los Angeles	63
14. Mineralización en la conseción minera Los Angeles	64

### TABLAS

	Página
I. Resultados finales de la flotación	34
II. Promedios de los concentrados de antimonio	34
III. Resultados de los análisis químicos de las muestras de estibnita	35
IV. Condiciones iniciales y finales del antimonio	35

V.	Recuperación obtenida para un mesh No.100	35
VI.	Resultados del análisis de Tukey.	36
VII.	Recuperación obtenida del sulfuro de antimonio (Tukey)	36
VIII.	Desviación estandar de los datos para las variables	37
IX.	Reactivos de flotación para la estibnita	52
X.	Reactivos de flotación colectores	53
XI.	Reactivos de flotación acondicionadores	53
XII.	Reactivos de flotación espumantes	53
XIII.	Reactivos de flotación supresores de polvo	53
XIV.	Avances importantes de la flotación	54
XV.	Propiedades fisicoquímicas del óxido de antimonio	54
XVI.	Propiedades químicas del óxido del antimonio	54
XVII.	Propiedades fisicoquímicas de los reactivos promotores	55
XVIII.	Rango de uso de los colectores de flotación	55
XIX.	Propiedades fisicoquímicas de los reactivos aerofloat (ditiofosfatos)	55

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>M1</b>	<b>Representa el lugar de donde se tomo la muestra número 1.</b>
<b>M2</b>	<b>Representa el lugar de donde se tomo la muestra número 2.</b>
<b>M3</b>	<b>Representa el lugar de donde se tomo la muestra número 3.</b>
<b>CMC</b>	<b>Concentración de la mezcla de colectores.</b>

## GLOSARIO

<b>Beacker</b>	Recipiente utilizado para mezclar soluciones esta hecho de pyrex para soportar altas temperaturas.
<b>Concentración de minerales</b>	Procesos mediante los cuales los componentes deseados de los minerales se separan de la ganga.
<b>Flotación</b>	Método de concentración de un mineral, finamente pulverizado con un aceite adecuado y agua en un tanque bastante grande. La agitación de la mezcla con aire produce una espuma que contiene las partículas del mineral el cual se extrae.
<b>Ganga</b>	Materiales indeseables que se hallan con los minerales, tal como se extraen de los depósitos.
<b>Mena</b>	Conglomerado formado por uno o mas minerales. Roca con suficiente cantidad de mineral comercialmente costeable.
<b>Metalurgia</b>	Procedimiento científico de extracción de metales de sus minerales y preparación de estos metales para su utilización.

**Plagioclasas**

**Denominación común para los feldespatos de sodio y calcio.**

## **RESUMEN**

**En Guatemala existen yacimientos metalíferos de gran importancia en la zona central y oriental del país por el apoyo de placas tectónicas que ayudan a que existan las condiciones necesarias para que se formen depósitos ricos en minerales.**

**Unos de los minerales que ha alcanzado mayor producción en el país en los últimos 5 años es el antimonio, este mineral es exportado principalmente a Estados Unidos de América debido a la pureza en la que se encuentra el antimonio en las minas.**

**El principal yacimiento de importancia de antimonio se encuentra ubicado en San Ildefonso Ixtahuacan, municipio de Huehuetenango, le sigue en importancia el yacimiento de la concesión minera Los Angeles ubicado en Palencia, municipio de Guatemala. Es en esta mina donde se obtuvo la materia prima de antimonio como mineral de Estibnita (sulfuro de antimonio), esta tiene vetas ricas de antimonio asociado con pirita de hierro (sulfuro de hierro), hematitas (óxido de hierro), andesitas, riolitas y materia volcánica.**

**El antimonio no se encuentra solo, siempre se encuentra acompañado de otros minerales que representan más del 50% de impurezas en una muestra específica, por lo que para su explotación es necesario procesar este mineral mediante su extracción y eliminación de impurezas mediante el método de flotación por espumas. Este es el método más utilizado para extraer cualquier mineral utilizado a nivel mundial.**

**La concesión minera Los Angeles cuenta con una planta de flotación que no ha sido utilizada, tampoco el equipo necesario para su extracción, ni los reactivos que se utilizan para su funcionamiento; no cuenta con estudios que ayuden a trazar un proceso**

para la separación mineral. Este estudio de tesis presenta un proceso a nivel planta piloto para la separación y concentración del mineral, tomando en cuenta las variables principales que participan en el proceso como: el tamaño de partícula del mineral y la concentración del reactivo principal causante de la flotación como lo es el colector de flotación.

El mineral fue tomado de un mismo punto representado por M1, siendo este representativo del lugar de donde se extrajo. Actualmente, existen en la concesión minera Los Angeles, varios puntos de riqueza mineralógica de antimonio, ubicándose estos en sitios distintos dentro de la concesión.

El mineral fue triturado y molido, clasificándose en 4 tamaños diferentes, para ser sometida a pruebas de flotación en una celda de flotación tipo Denver, con capacidad de 500g. Asimismo, se tomaron 4 concentraciones distintas de xantato isopropílico de sodio como colector de flotación en combinación con ditiofosfato de sodio para mejorar la eficiencia de la extracción en una proporción 1:2. Estas variables ayudan a establecer un marco de mejoramiento en el proceso.

Mediante el proceso de flotación se logró concentrar el mineral de antimonio para mesh 100 de 38.38% de Sb a un 55.56% de Sb, lográndose incrementar un 17% mas de pureza de antimonio en el mineral.

Al variar la concentración y el tamaño de partícula existe diferencia significativa en la recuperación del sulfuro de antimonio, no así con el porcentaje obtenido de antimonio al variar la concentración.

## INTRODUCCIÓN

La economía de Guatemala está cambiando. De acuerdo a estadísticas de 1995, la economía creció en un 4.9%, teniendo un papel importante en este crecimiento el sector minero, el cual se constituye como el sector de mayor crecimiento de aquellos que conforman el PIB. Para 1995 su crecimiento con relación al año anterior fue de 11.9%, superando por varios puntos porcentuales a sectores tradicionales de la economía guatemalteca.

Los estudios realizados por la Dirección General de Minería indican que este sector ha mantenido un crecimiento sostenido en su contribución en la conformación del PIB, ya que para 1990 su equivalente al PIB fue de 0.21% y para 1995 fue de 0.4% creciendo aproximadamente en un 5.6% para el periodo 1990 a 1995.

Actualmente existen pequeños mineros interesados en explotar los recursos minerales de Guatemala, pero no cuentan con los estudios que indiquen si el mineral se encuentra en forma rica o pobre para que sea rentable su extracción, por lo que con ayuda de la Dirección General de Minería y el Centro de Investigaciones de Ingeniería se efectuó un estudio para la extracción de antimonio, procedente de la mina Los Angeles ubicada en Palencia que se representa como uno de los principales minerales de explotación de Guatemala. El estudio consistió en separar y concentrar el antimonio procedente de la mina, Los Angeles ubicada en Palencia municipio de Guatemala. El mineral se encuentra como sulfuro de antimonio, en su forma natural. Se estableció el procedimiento para llevar la extracción del mineral desde la mina hasta su forma de utilización como producto final de sulfuro de antimonio.



La evaluación se llevó a cabo en dos etapas, la primera es la molienda y trituración del mineral para reducir el tamaño de la partícula mineral y desalojar en forma previa las impurezas ligadas al mineral en forma de ganga, y la segunda es la concentración del mineral mediante una celda de flotación tipo Denver.

En la actualidad la concesión minera Los Angeles no cuenta con estudios para concentrar el mineral de antimonio, por lo que las variables establecidas en el presente estudio son el tamaño de partícula que es muy importante definirla ya que nos permite optimizar gastos energéticos en la molienda y trituración.

Los reactivos de flotación que se utilizarán son aceite de pino como espumador, sulfato de cobre como activador primario, carbonato de plomo como activador secundario, carbonato de sodio como modificador de superficie y una mezcla de colectores aerofloat 343 y aero 404 como colectores selectivos para sulfuros, se escogió la combinación de estos colectores por presentar una alternativa adicional a este proceso ya que actualmente se utilizan otro tipo de colectores.

La diferencia de flotar un mineral consiste en que no hay dos tipo de menas idénticos, esto se debe a la ubicación de la mina y características del terreno, por lo que es necesario especificar las condiciones necesarias que llevaran a cabo la flotación selectiva del mineral de antimonio.

El muestreo en la mina se efectuó tomando tres muestras diferentes de distintos puntos del yacimiento tomando en cuenta las leyes de los minerales para que estas fueran representativas, para posteriormente evaluar cual de las muestras debe flotarse. (Ver figura 14 y 15 de la sección de apéndice).

## ANTECEDENTES

En Guatemala existen yacimientos de minerales de antimonio que han sido explotados y comercializados en gran escala, utilizando la flotación por espuma como proceso para concentrar este mineral, como es el caso del depósito mineral más grande que se ha descubierto que es el de San Ildefonso Ixtahuacan en Huehuetenango. Le sigue en orden de importancia la mina de Los Angeles ubicada en Palencia, Municipio de Guatemala, las de Nenoja I y II en Camotan departamento de Chiquimula y la de BHP-CU en Cunen departamento de El Quiché.

Únicamente las minas de San Ildefonso Ixtahuacan poseen una planta de flotación para concentrar el mineral, la concesión de la Mina de los Angeles posee una planta de flotación pero ésta no está activa.

### Geología regional

La mina los Angeles fue establecida mediante el acuerdo gubernativo No. 753-83, de fecha 13 de octubre de 1983. Está ubicada en el municipio de Palencia departamento de Guatemala, el acceso es bueno, la mina se encuentra a 50 kilómetros de la ciudad de Guatemala, de los cuales 35 son de asfalto y 15 kilómetros de terracería, en buen estado. El derecho minero fue adquirido por Minerales de Guatemala Sociedad Anónima, tiene una vigencia de 40 años. Entre los minerales autorizados para su explotación se encuentra el antimonio.

Entre los trabajos que se han realizados se encuentran, estudios geológicos-mineralógicos, catas o trincheras hechas con tractor. Es importante señalar que no se ha hecho exploración de minerales preciosos siendo el área muy prometedora para éstos.

La mineralización se considera que fué emplazada durante el periodo terciario superior, en rocas riolíticas, andesítica, dacíticas y calizas del cretácico superior, el área localizada en la provincia volcánica de Guatemala y la mineralización observada o detectada corresponde a sulfuros y óxidos de antimonio (estibnita y valentinita), contenidos de arsénico, mercurio, plomo, cobre, oro, plata etc.)

La estibnita se presenta en forma de cristales y minerales oxidados que lo acompañan. Se han encontrado pequeños cristales de tetrahedrita, proustita y pirargerita aparte de muy poco arsenopirita y un solo grano de oropimente. Un mineral no claramente identificado pudiera ser livingstonita (antimonida de mercurio) y también wulfenita.

El área que comprende la concesión Los Angeles esta situada directamente al norte de una falla normal que sigue un rumbo al oeste. La falla así tiene su expresión fisisigráfica en un "faul line serap" que hoy día esconde la traza original de la falla. El movimiento de ésta ha ocasionado que el bloque norte, el que comprende el área de la concesión, ha sido levantado relativamente a su bloque gemelo al sur. No se sabe con certeza si el tiempo de este evento ha sido anterior o posterior al tiempo del periodo de mineralización.

En el área de la concesión existen una cantidad de rocas; basaltas, dioritas, andesitas, rocas eruptivas de tipo sobresaturado e intermedio como dacita, monzonita y syenita, aparte de una serie sedimentaria compuesta de calizas intercaladas con silicatos. Esta formación de calizas que exhibe una estratificación fina, se supone pertenece al sistema del cretáceo superior. Cada uno de estos tipos de rocas tienen sus atributos especiales a los efectos de la meteorización que tuvo lugar después de la formación de las fallas.

Es aparente que los minerales han sido transportados a su lugar de depósito por soluciones hipotermales y emanaciones pneumotólicas. Representan la última fase en el emplazamiento de algún componente del magma primordial. En la mina Los Angeles se observa claro la dependencia de depósitos de mineral en los diques que se encuentran a la vecindad. Hay lugares donde los diques en su terminación se convierten en vetas de cuarzo y hay lugares donde vetas de cuarzo negro no cristalino se desprenden de sus flancos. Las emanaciones donde se encontraron con las plagioclasas, los penetraron profundamente y los convirtieron en arcillas caoliníticas. Esta etapa de caolinización ha tenido un efecto negativo porque abrió un camino lubricado para las fallas que vinieron después del emplazamiento de los minerales.

## **OBJETIVOS**

### **GENERAL**

1. Separar y concentrar el antimonio por el método de flotación por espumas, utilizando para ello una celda de flotación Denver, a nivel planta piloto.

### **ESPECÍFICOS**

2. Determinar cómo el tamaño de partícula y concentración de colector influyen sobre la concentración final del trisulfuro de antimonio.
3. Verificar si el concentrado de sulfuro de antimonio procedente de la mina cumple con el porcentaje mínimo requerido por la demanda mundial (60% Sb), mediante el proceso de flotación por espumas, para que sea factible su explotación futura.

## **HIPÓTESIS**

**Al utilizar la técnica de flotación por espuma para separar el mineral de antimonio, existe diferencia significativa en la recuperación al variar el tamaño de partícula de la estibnita y concentración de xantato-ditiofosfato como reactivo colector.**

# 1. LO ESENCIAL DE LA FLOTACIÓN

## 1.1 Generalidades de la flotación

Según, Kirk y Othmer (Ref. No.6), la flotación es un método para concentrar minerales metálicos que se fundan en la afinidad que las superficies minerales debidamente preparadas tienen por las burbujas de aire.

En la flotación con espuma, se prepara una espuma introduciendo aire en una pulpa de mena finamente pulverizada y agua que contiene algún material espumante, los materiales que tienen afinidad por las burbujas de aire suben a la superficie en la espuma y de esa manera son separados de los que están enteramente mojados.

Según, Mujlionov (Ref. No.9), el fenómeno de flotación está basado en el hecho de que la parte mineral del mineral bruto molido en húmedo es completamente humectable, pero se hace difícilmente humectable tratándolo con aceites y compuestos orgánicos heteropolares, ya que su grupo polar, a fin a los metales, se adhiere al mineral, mientras que el grupo no polar, aerofilo, le presta la tendencia a estar en contacto con el aire.

Según, Kirk (Ref. No.6), la flotación depende la humectabilidad relativa de las superficies. Un sistema de flotación consta de un líquido, un gas y algún material reducido a partículas. Este último puede ser un líquido (gotitas de aceite), pero de ordinario es un sólido cuyas dimensiones varían desde algo menos de 1mm hasta menos de 1 micro.

Según, Mujlionov (Ref. No.9), los procedimientos clásicos para la preparación de los minerales dejan de dar resultado cuando el desmenuzamiento, necesario para la separación mecánica, se efectúa hasta tamaños granulares de 0.2 hasta 0.005 mm, como resulta necesario para los minerales pobres y complejos que son los que más se explotan hoy. En un estado de tan fina división, las propiedades específicas de la sustancia pierden importancia en relación con las de su superficie grandemente aumentada, en aprovechar y en influir a voluntad justamente estas propiedades, consiste en el fundamento de la flotación.

## 1.2 Fundamentos fisicoquímicos de la flotación

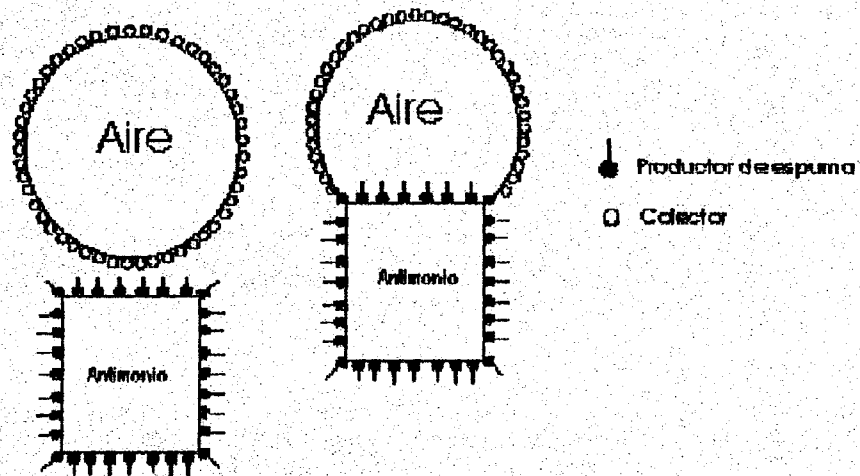
Según, Kirk (Ref. No.6), se puede exponer la teoría de la flotación estudiando por separado los agentes físicos y químicos que en ella participan. El rasgo característico de la flotación, que la diferencia de otros métodos de concentración de minerales, es que la separación se efectúa tomando como base la humectabilidad relativa de las superficies de minerales. Los principales problemas técnicos son los que se relacionan con la regulación química de las superficies de los minerales.

Según Thorpe (Ref. No.14), el índice de humectabilidad se determina por medio de los valores relativos de la tensión superficial en términos de ángulo de contacto en la interfase aire-agua.

La figura No.1, muestra el mecanismo utilizado en la flotación por espumas, la partícula mineral se adhiere a la burbuja que esta cargada en toda su superficie por un espumante que le da las propiedades de adherencia y consistencia a la burbuja de aire, por lo que la partícula mineral es atraída hacia la superficie de la celda de flotación y de esta forma se lleva a cabo la separación.



Figura No. 1 Mecanismo flotación (partícula mineral hidrofugada y burbuja de aire).



Cuando una gota de agua se coloca en diferentes tipos de superficies toma formas diferentes. Con una superficie hidrofóbica la tensión superficial  $\gamma$  ,sólido-agua es comparativamente grande y  $\gamma$  sólido-aire es comparativamente pequeña por tanto, la gota tiende a abultarse. Con una superficie hidrofílica sucede lo contrario y la gota se aplanada o extiende. En ambos casos la acción de la tensión superficial del agua,  $\gamma$  agua-aire es la de confinar la superficie curva de la gota en contacto con el aire al área mínima posible.

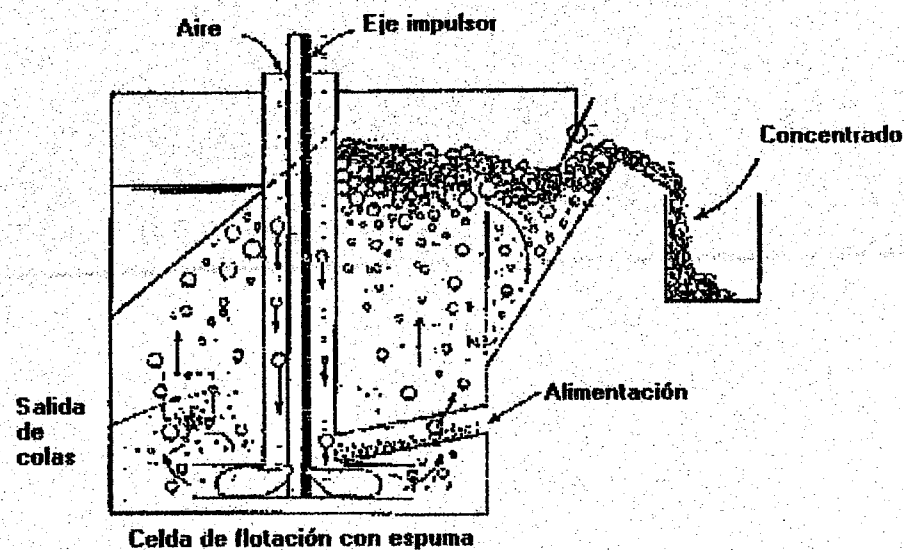
La flotabilidad de un mineral aumenta con el ángulo de contacto, los minerales con un elevado ángulo de contacto son los aerofílicos, o sea los que tienen afinidad más alta por el aire que por el agua.

Las burbujas de aire únicamente pueden pegarse a las partículas de mineral si desplazan el agua de la superficie mineral, lo cual únicamente puede ocurrir si el mineral es, en la misma extensión, repelente al agua o hidrofóbico.

Según, Kirk (Ref. No.6), los factores físicos participan de diversas maneras en la flotación. Una vez preparada una partícula con una superficie hidrorrepelente, se ha de poner en contacto con una interfase aire-agua, de tal manera que se mantenga en esa interfase el tiempo necesario para que se efectúe la separación.

El método más común para obtener estas condiciones es el de flotación por espuma, en el que se introducen burbujas de aire en una pulpa de diversos modos. La agitación de la pulpa, bien sea por medios mecánicos o haciendo pasar por ella gran cantidad de aire, hace que las partículas se pongan en contacto con las burbujas. Si la fuerza de adherencia de la partícula a la burbuja es suficiente para resistir las fuerzas de deslizamiento o las tracciones gravitacional o centrífuga y la fuerza de turbulencia de la pulpa, la partícula asciende a la superficie. Ver figura No. 2

Figura No. 2. Celda de flotación con espuma



La densidad de la pulpa, afecta su viscosidad, es un factor significativo de influencia en los resultados de flotación. La alta viscosidad de la pulpa inhibe la dispersión del aire y una buena formación de la burbuja, afectando adversamente las recuperaciones.

Es practica usual conducir la flotación en pulpas de 25% a 35% de sólidos. Densidades de pulpa son generalmente aceptables cuando sube la gravedad especifica, aunque puede tener un mínimo de 8% y un máximo de 55%. La relativa propiedad antihumectante de la superficie mineral y la turbulencia y la densidad de la pulpa son factores determinantes. En general, las partículas mayores de 300 micrometros, no se separan por flotación con espuma.

### 1.3 Termodinámica de la flotación

La termodinámica en el procesamiento de minerales se basa en los siguientes aspectos: la termodinámica de la adsorción sobre las superficies minerales y en la interface aire-agua, y la termodinámica que controla la adherencia de las partículas de mineral a las burbujas de aire.

La adsorción en la interface aire-agua es de interés particular en el proceso de flotación. Los espumantes, muchos de los cuales son alcoholes, son agentes de acción superficial que se utilizan para controlar la espuma en la flotación, la adición de un alcohol reduce la tensión superficial.

La tensión superficial de la solución se reduce desde la del agua (0.073N/m) a un valor cercano a la del alcohol, aunque el alcohol es solo una pequeña fracción de la solución. Esto indica que una gran fracción de la superficie de la solución alcohol en agua, deber ser alcohol.

Para determinar cuantitativamente el grado de adsorción del alcohol en las interfases aire-agua, puede usarse la ecuación de adsorción de Gibbs (ecuación 1).

$$T_i = 1/RT \delta y / \delta \ln A$$

En la flotación, se emplean también colectores. Los colectores son compuestos orgánicos heteropolares que se requieren para adsorber tanto en la interfase mineral-agua como en la interfase aire-agua. Su función en la flotación consiste en adherir en forma selectiva las partículas de mineral a las burbujas de aire.

Los colectores difieren de los espumantes en que generalmente son electrólitos, de manera que debe considerarse también la adsorción de las especies iónicas en la interfase aire-agua. Si el colector es un electrólito débil, tal como la sal de un ácido graso, la adsorción del ácido asociado debe considerarse también. Esto significa que el pH de una solución puede tener un efecto notable sobre la tensión superficial.

Los iones que son quimiodsorbidos en la superficie mineral establecen la carga de superficie y se llama iones determinantes del potencial. Los iones determinantes del potencial pueden ser iones de los que está compuesto el mineral, iones de hidrógeno o hidróxido, iones colectores que forman sales insolubles con los iones de la superficie mineral, o iones que forman iones complejos con los iones de la superficie mineral.

La densidad de adsorción de los iones determinantes del potencial de la superficie mineral determina la carga de superficie en un mineral.

## 1. REACTIVOS DE FLOTACIÓN

Según, Kirk (Ref. No.6), se escoge un reactivo en vista de su eficacia, especificidad, estabilidad, facilidad de manejo, adición, costo por peso de unidad y por unidad de separación. La cantidad que se añada varía según su función y se puede modificar de acuerdo con las variaciones de la mena y la cantidad de agua que entre en la operación.

Se agregan reactivos inorgánicos para regular el pH y efectuar la activación o depresión. La cal es el medio mas barato de obtener el ion hidróxilo, otros modificadores del pH son el carbonato sódico, el hidróxido sódico y el ácido sulfúrico. La cantidad añadida suele ser unos cuantos kilogramos por tonelada de mena tratada. La adición se hace antes de la flotación o durante ella, según las circunstancias.

Los reactivos orgánicos desempeñan el papel de colectores, productores de espuma y agentes productores de película. Los colectores sulfhídricos se suelen añadir en proporción de 0.025 a 0.125Kg por tonelada de mena para la concentración de sulfuros.

Los ácidos grasos colectores y los colectores catiónicos de tipo amina se añaden en proporción que varía desde una fracción de kilogramos hasta un kilogramos por tonelada de mena. Estos colectores suelen estar en forma de sales solubles y se añaden en algún punto inmediato anterior a las máquinas de flotación. Los agentes espumantes productores de película son generalmente aceites viscosos hidrosolubles que se usan en concomitancia con ácidos grasos para la flotación de minerales porosos, como el fosfato cálcico.

Según la Dirección General de Minería (Ref No.8), los reactivos de flotación representan el grupo más diverso de compuestos utilizados en la industria minero-metalúrgica. Normalmente, los reactivos de flotación son compuestos de base orgánica que pueden ser clasificados de acuerdo con las siguientes categorías:

1. Colectores
2. Acondicionadores
3. Espumantes
4. Modificadores
5. Depresores

Todos los reactivos de flotación se utilizan en el circuito de molienda y celdas de flotación, siendo descargados bajo la forma de aguas de proceso a un cuerpo receptor, a menos que el proceso opere con descarga cero. Por tanto, a no ser que los reactivos de flotación sean neutralizados, destoxificados o eliminados, estos serán descargados con el agua del proceso, pudiendo ocasionar la degradación de la calidad del agua, así como niveles peligrosos de toxicidad de las aguas de los ríos en donde desembocan las aguas de proceso.

## 2.1 Colectores

Según, Spootiswood (Ref. No.5), el colector es el más decisivo de los reactivos de flotación. Los colectores son moléculas o iones orgánicos que se adsorben selectivamente sobre las superficies minerales. Tienen que convertir en hidrofóbica la superficie del mineral para que, en equilibrio (como lo indica el ángulo de contacto), haya adherencia entre burbuja y partícula, y además deben reducir el tiempo de inducción, para asegurarse de que ocurra adherencia en la colisión entre burbuja y partícula.

La mayoría de los colectores son ácidos débiles, bases o sus sales. Son heteropolares y pueden considerarse que tienen dos extremos funcionales, uno iónico, que puede ser adsorbido en la superficie mineral ya sea por reacción química con los iones de la superficie mineral (quimioadsorción) o por atracción electrostática a la superficie mineral (adsorción física), y el otro una cadena o grupo orgánico, que proporciona la superficie hidrofóbica al mineral. Algunos colectores, son compuestos no ionizantes, una vez adsorbidos, vuelven al mineral hidrofóbico en la misma forma que los colectores heteropolares. Los colectores se pueden dividir en dos grupos, según sea adsorbido su anión o su catión.

### 2.1.1 Colectores aniónicos

Según, Spootiswood (Ref. No.5), los colectores aniónicos del tipo tiol, en los que el grupo polar contiene azufre bivalente, se utilizan para la flotación de minerales sulfurosos. Los xantatos y los ditiolfosfatos son los que tienen mayor uso. Los dialquiltiocarbamatos han sido bien aceptados en años recientes, el tiocarbamilido y el mercaptobenzotiazol (cyanamid R-404), se utilizan como colectores suplementarios, los ditiocarbamatos y los alquil mercaptanos tienen uso limitado.

A continuación se describen las características de los colectores más utilizados en flotación:

#### **Xantatos Aero**

**Xantato Aero 325:** etílico de sodio. Usado en minerales complejos para máxima selectividad. Se usa más frecuentemente para flotar galena en minerales de Pb/Zn.

**Xantato Aero 343:** isopropílico de sodio. El más ampliamente usado por su bajo costo. Es un buen compromiso entre poder colector y selectividad.

**Xantato Aero 317: isobutilico de sodio. Bajo costo, colector poderoso.**

**Xantato Aero 350: amilico de potasio es el xantato más poderoso y el menos selectivo. Usado a menudo como colector en el "scavenger", después de un colector más selectivo en el "rougher".**

**Xantato Aero 355: amilico de sodio. Puede ser substituido por el xantato aero 350 bajo todas las condiciones y puede proporcionar ahorros en costos, por medio de menores dosificaciones.**

#### **Comentarios:**

- **Todos los productos son pellets o polvos solubles en agua. Usualmente alimentados como soluciones en concentraciones del 10% al 20% en peso.**
- **Ampliamente usados para todos los minerales sulfurosos, pero tienen una tendencia fuerte a flotar sulfuros de hierro, salvo que se usen depresores.**
- **Generalmente no son usados en circuitos fuertemente ácidos debido a su composición a pH bajos.**

#### **Promotor Aero**

**Promotor Aero 400: usado principalmente para flotación de piratas auríferas en circuitos ácidos.**

**Promotor Aero 404: ampliamente usado en circuitos alcalinos para minerales empañados y secundarios de Cu,Pb y Zn y metales preciosos. Excelente colector para pirita y pirita aurífera en circuitos ácidos.**



**Promotor Aero 407:** un colector más fuerte que el promotor 404. Puede substancialmente reemplazar xantatos en muchas aplicaciones, siendo mientras tanto más selectivo contra sulfuros de hierro en circuitos alcalinos. Es útil para tratar un rango amplio de minerales de metales-base y preciosos. Particularmente aquellos de Cu, Ni y Zn. Excelente para flotación bulk de minerales poli-metálicos y piritas con oro, al usar circuitos ácidos.

**Promotor Aero 412:** un colector más fuerte que el promotor aero 407 con aplicaciones substancialmente iguales.

**Promotor Aero 425:** una versión seca, modificada, de las otras de las series de promotores aero 400, para minerales de cobre con sulfuros y óxidos mixtos, los que a menudo flotan sin sulfurización si los minerales oxidados están presentes en cantidades pequeñas.

#### **Comentarios:**

- Son generalmente colectores más fuertes que los promotores acuosos aero y aerofloat correspondientes, pero aun más selectivos que los xantatos, contra los sulfuros de hierro, en circuitos alcalinos. Usualmente el uso de un xantato como colector secundario, provee la mejor metalurgia.
- Usualmente se benefician con tiempos más largos de acondicionamiento o cuando se adicionan al molino.
- Colector excelente para sulfuros y metálicos de la mayoría de los metales-base y metales-preciosos, de minerales empañados lentos en flotar o de minerales secundarios oxidados, que pueden requerir primero de sulfurización.

Los formiatos de xantogeno (minerec) también se usan limitadamente, los dixantogenos, y de hecho los ditiolatos que resultan de la oxidación de otros colectores del tipo tiol, actúan como colectores, pero en general se forman en la solución o en la superficie mineral.

La cadena de hidrocarburos de los colectores tiol es bastante corta. En la mayoría de estos colectores, la disminución de la solubilidad al aumentar la longitud de la cadena limita dicha longitud a alrededor de 6 átomos de carbono. La longitud de la cadena se traduce en una adsorción más intensa del colector pero en una selectividad reducida entre los sulfuros. Para lograr la máxima selectividad, normalmente se utiliza un colector de cadena corta.

Los colectores aniónicos de oxihidrido se utilizan para la flotación de minerales no sulfurosos. Incluidos en este grupo están los carboxilatos, los sulfatos orgánicos y los sulfonatos. Los carboxilatos son los de uso más frecuente.

A menudo se utilizan sales de sodio como colectores, por ser más solubles que los ácidos asociados. Se debe en gran parte a la solubilidad el que los ácidos grasos que se emplean como colectores estén limitados a la cadena de 18 carbonos del ácido oleico, y a la cadena de hidrocarburos no saturados.

Los sulfatos y sulfonatos orgánicos no se usan tan frecuentemente como los ácidos grasos. Aunque actúan en forma muy semejante a los ácidos grasos, tienden a adsorberse con menor intensidad y por tanto tienen aplicación en donde se requiere mayor selectividad. Los hidroxamatos, corresponden también a este grupo, sin embargo todavía no han tenido una aplicación comercial exitosa.

La concentración en solución de los colectores de cadena más larga (colectores oxihidrido que hay en uso común) esta limitada por la asociación de iones o moléculas o de ambas que puede ocurrir. Esta asociación o micelización ocurre a una concentración particular para cada especie química, y se le conoce como la concentración critica de micelización (CMC). Si la concentración de colector que se agrega a una solución sobrepasa (CMC), ocurre la micelización y se reduce en forma importante la concentración del colector disponible para la adsorción en el mineral. Hay disponibles valores del CMC para la mayoría de los colectores.

Según Mujlionov (Ref No.9), los colectores aniónicos pertenecen a las siguientes clases de sustancias.

1. Xantatos
2. Ésteres de ácido diti fosfórico
3. Sales de los ácidos grasos
4. Sulfatos alcohólicos
5. Sulfonatos alcohólicos

#### 2.1.2 Colectores catiónicos

Según, Spootiswood (Ref. No.5), los colectores catiónicos tienen un grupo polar con carga positiva asociado con la cadena o grupo de hidrocarburos hidrofóbicos. Generalmente son aminas, aunque también hay en uso eter-aminas, se han utilizado aminas primarias y secundarias.

Estos colectores se derivan a menudo de grasas naturales y se comercializan con frecuencia bajo el mismo nombre de la fuente de grasa en particular (por ejemplo, acetato de la amina grasa animal). Se emplean ambos grupos de hidrocarburos, los de alquil y los de aril, quedando limitada la longitud de cadena del grupo por la solubilidad de la amina. Para ayudar a la solubilidad, normalmente hay disponibles colectores de aminas en forma de cloruros o acetatos.

Según, Spootiswood (Ref. No.5), entre los colectores catiónicos se encuentran:

Alcoholaminas (primarias, secundarias, terciarias)  
Sales de amina cuaternaria  
Sales de alcoholpiridina

Estos reactivos pueden actuar como colectores, no sólo para minerales oxidados, sino también para sulfurados, y que al mismo tiempo son espumadores fuertes, en los que la tensión superficial de sus disoluciones acuosas pasa por un mínimo a una concentración crítica.

Su efectividad colectora crece al aumentar la concentración llegando primero a un máximo, pero desaparece completamente al ser esta de 500mg/l. Estos fenómenos pueden atribuirse a la formación de micelas sin una orientación de cargas determinada, o quizá también a un recubrimiento de la primera por una segunda capa adherida.

## 2.2 Espumantes

Según, Spootiswood (Ref. No.5), los reactivos orgánicos solubles en agua que se adsorben en la interfase aire-agua, son moléculas heteropolares, con un grupo polar que da la solubilidad en agua, y un grupo hidrocarbonado no polar. El espumante es necesario para formar una espuma arriba de la pulpa, que sea lo suficientemente estable para evitar la desintegración de la misma y el retorno subsecuente de las partículas a la pulpa antes de que aquella sea removida, es importante que la espuma se desintegre rápidamente una vez que se remueve, ya que de no ser así, se tienen problemas en el bombeo de la pulpa y en los subsecuentes pasos de procesamiento.

Otro requisito importante de un espumante es de que no se adsorba sobre las partículas minerales. Si un espumante actuara como colector, se reduciría la selectividad del colector en uso.

Algunos colectores como los ácidos grasos, exhiben ciertamente propiedades espumantes, sin embargo, para lograr un buen control en la planta, deben minimizarse la interacción del agente espumante con el colector.

Los alcoholes y compuestos afines, tales como los éteres de glicol, tienen gran utilidad como espumantes, debido en gran parte a su incapacidad para adsorberse sobre la partículas minerales, por lo que no actúan como colectores. Los alcoholes aromáticos procedentes de fuentes naturales, como el aceite de pino o el ácido cresílico, se han utilizado extensamente.

Los espumantes sintéticos se utilizan mucho en la actualidad, tiene la ventaja de poseer una composición estrechamente controlada, lo cual ayuda a mantener la estabilidad de la operación de la planta. El metil isobutilcarbinol y los éteres del polipropilenglicol están en esta categoría de espumantes. Cualquier compuesto que se adsorba en la interface aire-agua tiene propiedades espumantes.

Según, Mujlionov (Ref. No.9), una importancia similar a la de los colectores para modificar la superficie sólido/líquido, tienen los espumadores para influir la líquido/gas. Disminuyen en esta la tensión superficial y provocan la formación de muchas burbujas pequeñas con una superficie total grande, la cual puede acumular grandes cantidades de mena.

Los espumantes consisten en un grupo polar, soluble en agua y de una cadena apolar, hidrófoba, alifática, o de anillos aromáticos. En su acumulación en la superficie líquido/gas se disponen de tal manera que el grupo hidrófilo está sumergido en agua, mientras que su parte hidrófoba se extiende hacia el espacio de aire.

Al alcanzar la superficie del líquido, se produce de estas burbujas una capa de espumas cuyas láminas están rodeadas por ambas partes de la película espumadora, en cierto modo por una piel elástica. La resistencia mecánica de estas láminas depende de la solubilidad del grupo polar y de la longitud de la cadena de átomos de carbono. En estas láminas tiene lugar una purificación posterior automática de los concentrados al salir el agua, acompañada de partículas de ganga suspendidas en agua que han sido arrastradas, y permanecen las partículas de mena hidrófobas en la superficie límite aire/agua.

La adición de un espumador no es necesaria sólo en la aplicación de colectores, cuyas propiedades activas para la superficie faltan, sino también en los ácidos y aminas grasos espumadores, para prestar a sus espumas la consistencia técnicamente necesaria o reducir una viscosidad demasiado grande a la medida deseada.

Los espumadores más importantes son los alcoholes terpénicos como el aceite de pino de la Hercules Powder Co. Y el flotol sintético de la Lech-chemte. También se emplea con frecuencia aceite de eucalipto.

Además se utilizan igualmente alcoholes alifáticos y, para la formación de espumas muy sólidas, cresoles y xilenoles (flotigol), así como aceites de alquitrán vegetal (tragol). En la mayoría de los casos, es suficiente añadir de 50 a 100g de espumador al mineral.

### 2.3 Activación, pasivación y sulfuración

Según, Mujlionov (Ref. No.9), hay minerales cuyas fuerzas superficiales no son suficientes siquiera para adsorber iones colectores de gran afinidad hacia los metales, la flotabilidad de los minerales puede reprimirse haciendo que adsorban en su superficie iones negativos, ocupando así todos los puntos existentes para la adsorción de los iones colectores, también negativos.

El procedimiento basado en la pasivación y reactivación la llamada flotación selectiva, tiene importancia esencial en la preparación de minerales complejos y ha desplazado completamente la obtención antes usual, de concentrados mixtos menos valiosos. También la sulfuración puede considerarse como una activación.

#### 2.4 El gas de flotación

Probablemente la elección del gas será, para la flotación de importancia secundaria, pues se ha demostrado que, empleando otros gases, no se han podido conseguir mejores resultados que con el empleo de aire. Donde se ha pasado a emplear, en su lugar, un aire enriquecido de oxígeno, y  $SO_2$ , se trata de una acción química sobre los componentes del mineral más que de las propiedades físicas del gas. Se le concede al gas disuelto en la suspensión una importancia esencial para la producción del contacto entre partícula mineral y burbuja de aire.

#### 2.5 Química de la flotación

Según, Spootiswood (Ref. No.5), la mayoría de los minerales son naturalmente hidrofílicos. Para lograr una separación por flotación, las superficies del mineral tienen que volverse selectivamente hidrofóbicas. Esto puede lograrse mediante la regulación de la química de la solución, seguida por la adición de un colector que selectivamente se adsorba y proporcione la superficie hidrofóbica requerida.

Solamente un pequeño número de minerales son hidrofóbicos por naturaleza, como el carbón mineral y la molibdenita. Es posible flotar estos minerales sin ningún colector, aunque es práctica común agregar un colector suplementario. Otros minerales también pueden volverse hidrofóbicos sin el uso de un colector.

Las adiciones de grandes concentraciones de sulfuro de sodio a minerales sulfurosos puede resultar en superficies hidrofóbicas con la subsecuente flotación sin colectores, en este caso se cree que el ion sulfuro reemplaza a los productos de oxidación e hidratación en la superficie mineral.

La regulación de la química de la solución puede abarcar la adición de reactivos, ya sea activadores, que aumentan la selectividad intensificando la adsorción del colector, o depresores, que retardan o evitan la adsorción del colector.

Finalmente, la regulación de la química de la solución puede incluir el control del pH para asegurar que habrá de existir el colector (que es a menudo un ácido débil) en la solución, en la forma deseada. Otro grupo de reactivos que intervienen en la flotación son los espumantes. Estos tienen dos funciones. Mejorar la dispersión de las burbujas finas en la pulpa y controlar las características de la espuma.

Según, Kirk (Ref No. 6), los factores químicos que han de ser considerados al estudiar la flotación son la estructura cristalina de los minerales, la estructura y composición del agua, la química de los reactivos de flotación y sus reacciones químicas de superficie con los minerales, así como las asociaciones naturales de estos.

Los minerales presentan una superficie fuertemente polar y de esa manera son humedecidos por el agua, siempre que la superficie no esté contaminada con ninguna sustancia no polar, como la grasa.

Son excepciones el talco y la pirofilita, en los que los enlaces no polares están incluidos dentro de láminas dobles de tetraedros enlazados que se representan con  $\text{SiO}_{10}$ . Por consiguiente, la segmentación de estos minerales deja al descubierto superficies que no tienen enlaces insaturados y, en consecuencia, no se unen a los iones de hidrógeno e hidroxilo del agua. Esta falta de unión al agua significa que los minerales se unen



preferentemente al aire, por ejemplo, el talco y la pirofilita pueden ser considerados como flotadores naturales.

Por su ionización (y polaridad) y por su abundancia, el agua es el líquido más útil para la flotación. Con todo, las condiciones que se requieren para la flotación no restringen este método de separación a un sistema que contenga agua, pues se puede usar otros líquidos, con tal que la fase sólida que va a ser separada tenga tan sólo afinidad parcial, o no tenga afinidad alguna por el líquido.

### **3. Impacto Ambiental**

**3.1 Efectos en la salud e impacto ambiental, asociados con el uso de reactivos de flotación, fluctúan entre mínimos a moderados.**

Es posible que el uso de reactivos de flotación, sin tener en consideración los requisitos mínimos de protección personal, pueda producir efectos adversos a la salud. Si bien el riesgo de exposición durante periodos cortos puede no ser significativo, sin embargo, en el caso de reiteradas exposiciones se cuenta con información documentada sobre los efectos adversos en pruebas efectuadas con animales. El uso y manipuleo responsable de los reactivos de flotación minimiza los potenciales impactos entre el personal de operaciones y, por consiguiente, el medio ambiente.

**3.2 Efectos en la salud**

Los efectos en la salud debido al uso de reactivos de flotación han sido documentados mediante pruebas de laboratorio realizadas con animales. La ejecución de estas pruebas condujo al desarrollo de los límites de exposición, tales como los valores iniciales límites y los niveles de exposición en periodos cortos, y su propósito es establecer los límites de concentración a los que los trabajadores pueden ser expuestos.

La transgresión de dichos límites de exposición podría causar trastornos en la salud de los trabajadores, tales como irritación de la piel y pulmones, o la formación de acumulaciones en los tejidos del cuerpo.

El uso y el manejo responsable de los reactivos de flotación pueden ser puesto en practica mediante el uso de ropa de trabajo y controles técnicos apropiados, tales como las cubiertas de descarga y el aislamiento del proceso. Se deberá seleccionar el equipo teniendo como base el tipo de exposición.

Con el fin de asegurar que los efectos en la salud del trabajador sean mínimos, se deben desarrollar e implementar programas de capacitación en los que se exponga en forma resumida, al personal, los potenciales efectos dañinos en la salud, causado por los reactivos en uso en las operaciones.

La capacitación al trabajador ayudará a la correcta comprensión de los posibles efectos en la salud y la necesidad de usar apropiadamente el equipo protector, como respiradores, guantes y ropa especial. En general, aumentará considerablemente la comprensión por parte del trabajador respecto al uso apropiado de los reactivos de flotación y los métodos de protección personal más adecuado.

El área en donde los trabajadores se encuentran expuestos a los agentes de flotación es el área de preparación de reactivos. En estos lugares los reactivos se encuentran en bruto y en altas concentraciones, por lo que es más probable que causen efectos nocivos para la salud. Se deberá desarrollar procedimientos operativos que incluyan el manipuleo de reactivos en bruto. La implementación de estos procedimientos operativos deberá darse preferentemente bajo la forma de capacitación.

En el caso de los reactivos de flotación, los riesgos de incendio y explosión para las mezclas y concentraciones diluidas (tanques de servicio) son mínimos siempre que se sigan los procedimientos adecuados de almacenamiento, prevención de derrames y primeros auxilios, se capacitará al personal y se le mantendrá actualizado sobre la correcta implementación de los procedimientos.(Ref No.11).

### 3.3 Efectos ambientales

El impacto ambiental de los derrames de espumantes, modificadores, acondicionadores y promotores es mínimo, si se toman en consideración los procedimientos adecuados de prevención de derrames y almacenamiento. Sin embargo,

el impacto ambiental más grave que podría producirse en el caso de una descarga descontrolada de reactivos de flotación será que estos entren en contacto con ríos, arroyos o lagos adyacentes. En un caso como éste el reactivo podría ser tóxico para la vida acuática. Los usuarios que utilicen el agua en áreas cercanas a la planta de procesamiento (agua para riego y potable) también podrían verse negativamente afectados por estos elementos.

También pueden registrarse impactos en otros elementos constitutivos del ambiente, como los suelos, el agua freática y la vegetación. Las descargas descontroladas en el suelo no representan un daño grave; sin embargo, de no procederse a la limpieza o a controlar dichas descargas la responsabilidad ambiental es mayor, sobre todo si la vegetación o el agua subterránea se ve afectada. Más aún, las reiteradas descargas sin control hacia la nata freática pueden originar efectos costosos y difíciles de remediar en el largo plazo. Los reactivos de flotación no se caracterizan por su alta volatilidad, por lo que, no representan un peligro significativo en términos de emisiones atmosféricas.

Sin embargo, el uso de reactivos en procesos de flotación puede dar origen a emisiones molestas en el aire del área de trabajo. Se pueden utilizar controles técnicos como la ventilación industrial e instrumentos para el monitoreo de la calidad del aire con el propósito de caracterizar y controlar las emisiones.

Cada planta debe contar con un plan específico de prevención de derrames y de respuesta en caso de emergencias, el cual será de gran utilidad para comprobar y establecer la idoneidad de las instalaciones de almacenamiento y contención de derrames con que se cuenta para asegurar la protección ambiental, especialmente en el área de preparación de reactivos.

La potencial toxicidad de los reactivos de flotación en la vida acuática, por las aguas de desecho de las instalaciones, puede servir como un parámetro de control que permita establecer niveles permisibles para la descarga de aguas residuales. Por lo general, una mina o fundición descarga aguas de proceso que pueden contener concentraciones residuales de reactivos de flotación. En caso que las concentraciones respectivas excediesen los niveles tóxicos para la vida acuática, sería necesario tratar esta agua para eliminar los reactivos de la descarga. Por tanto, la protección ambiental presupone la protección y cuidado de los cuerpos receptores que discurren aguas abajo.(Ref No.11).

### 3.4 Efluentes líquidos de flotación

Los residuos de reactivos utilizados en flotación acompañan tanto a los relaves sólidos como a los líquidos descargados con los relaves. Los reactivos de flotación pueden ser cal, ditiofosfatos, xantatos, cromatos, sulfitos, sulfato de cobre, sulfato de zinc, ácidos grasos, alcoholes, aceites y cianuros entre otros, la mayoría de los demás reactivos de flotación existen en formas no tóxicas para los humanos y la vida acuática.

Generalmente se aplican en pequeñas concentraciones en las operaciones mas eficientes; los reactivos orgánicos de flotación se descomponen rápidamente y son rara vez responsables de algún impacto ambiental serio.

El proceso de flotación puede también liberar otros constituyentes en solución dependiendo de la extensión en la cual estos puedan estar presentes en el mineral y de su solubilidad. Esto incluye frecuentemente sulfatos y cloruros pero a menudo dentro de limites aceptables para agua de bebida y usos acuáticos.(Ref No.2)

## **4. EQUIPO DE FLOTACIÓN**

### **4.1 Celdas de flotación**

La mayor parte de la flotación se lleva a cabo en bancos de celdas de flotación. La concentración por flotación puede considerarse en términos de dos grupos de variables. Primero, las condiciones químicas. La interacción de los reactivos químicos con las partículas minerales para dar lugar a un producto selectivamente hidrofóbico, Segundo, las condiciones fisicomecánicas, las cuales la determina la máquina de flotación.

Aunque existen muchos diseños diferentes de máquinas de flotación, todas ellas tienen la función primaria de hacer que las partículas que se han convertido en hidrofóbicas entren en contacto y se adhieran a las burbujas de aire, permitiendo así que dichas partículas se eleven a la superficie y formen una espuma, la cual puede ser removida. Para lograr esta función, una máquina de flotación debe.

1. Mantener todas las partículas en suspensión. Esto requiere que las velocidades ascendentes de la pulpa sobrepasen a la velocidad de asentamiento de todas las partículas presentes (incluso las más grandes y las más pesadas).
2. Asegurar que todas las partículas que entren en la máquina tengan la oportunidad de flotar. Debe minimizarse el desvío de corrientes y la formación de corto circuito en el interior de la máquina. De modo semejante, es indeseable el espacio muerto porque reduce el volumen efectivo de la máquina.
3. Dispersar burbujas finas de aire en el seno de la pulpa. El grado de aereación necesario depende del sistema mineral en particular y de la fracción de masa que ha de flotarse.

4. Promover el contacto partícula-burbuja de manera que las partículas hidrofóbicas puedan adherirse a las burbujas y elevarse a la espuma. Esto puede hacerse mediante agitación vigorosa, flujo a contracorriente o precipitación de aire (gas) en disolución.
5. Proporcionar una región de pulpa en quietud inmediatamente debajo de la espuma para minimizar el arrastre de pulpa hacia la espuma y la disolución turbulenta de la capa de espuma.
6. Proporcionar suficiente espesor de espuma para permitir que ocurra el drenaje de las partículas arrastradas.

Según Sprotiswood (Ref No. 5), en el diseño inicial de un proceso se requieren pruebas de flotación en el laboratorio, así como también para mejorar el proceso durante la vida de la planta y para optimizar continuamente el proceso al ocurrir cambios en la ley o la mineralogía del mineral.

La mayoría de las pruebas se efectúan en celdas de flotación aisladas, las cuales aceptan entre 500 y 2000g de mineral. Se pueden usar los datos obtenidos de tales celdas de laboratorio para especificar los requerimientos de los reactivos y los tiempos de retención en las operaciones a escala industrial.

## 5. CARACTERISTICAS DEL YACIMIENTO

Según Kirk (Ref. No. 6), la mayoría de las menas están compuestas de uno a cinco metales o minerales que se pueden separar económicamente, en combinación con una cantidad mucho mayor de un componente inútil llamado ganga.

La textura o mezcla física de los minerales es una de las cosas más importantes, pues de ello depende el que se puedan o no separar los componentes valiosos, así como la naturaleza de las operaciones que se requieren para efectuar la separación.

Probablemente sin excepción no hay dos cuerpos de mena idénticos, y ningún cuerpo tiene composición uniforme igual. Los iones de elementos que existen en pequeña cantidad pueden estorbar de manera notable la separación deseada.

Otra dificultad es que muchos depósitos contienen lama de partículas coloidales que cubre las superficies de todos los minerales y estorba la acción selectiva de los reactivos de flotación.

Según Perry (Ref. No.12), las minas son concentraciones de un determinado mineral al cual se le denomina yacimiento. Generalmente se halla en forma de vetas, menas, filones o capas en el subsuelo que los geólogos e ingenieros estudian por diversos procedimientos desde la superficie, sin verlos. Finalmente, llegan a determinar su importancia, situación, dirección, profundidad y calidad, datos indispensables y anteriores a toda explotación.

Algunos de estos yacimientos son de origen magmático, es decir, proceden de las fusiones desarrolladas en el interior de la tierra que en un momento dado pugnaron por salir, en parte lo consiguieron y en parte quedaron implicado entre masas y rocas. Otros tienen un origen sedimentario, o sea que fueron depositados a lo largo del tiempo.



Finalmente, existen los minerales metamórficos que se produjeron por efecto de grandes presiones y elevadas temperaturas en el seno de la tierra, pero que no son de origen volcánico o magmático.

La metalurgia tiene por objeto el estudio de los métodos industriales para obtener el metal a partir del mineral. Los metales casi nunca se encuentran en estado natural y es preciso separarlos de sus compuestos que suelen ser óxidos, carbonatos, sulfuros, etc.

Según Thorpe (Ref. No.14), la separación química depende del metal o del mineral de que se trate. Si es óxido bastará calentarlo con carbón para que el oxígeno se combine con él y quede libre el metal que, además, quedará fundido y permitirá separar la escoria.

Si el mineral no es un óxido, a veces puede convertirse en tal, sea por oxidación o por calcinación. En algunos casos, basta dejar el mineral al aire libre durante un tiempo para que se oxide. La calcinación es una oxidación a alta temperatura en la que se eliminan compuestos volátiles. Por ejemplo, un carbonato al perder anhídrido carbónico se convierte en óxido.

Según Perry (Ref. No.12), como regla en las plantas químicas se trata de emplear una materia prima concentrada lo más posible para intensificar los procesos y obtener productos de mejor calidad con menores gastos.

Al emplear materia prima concentrada en unos procesos se consigue disminuir los consumos de combustible para el calentamiento de las masas reactivas y en otros procesos permite usar de modo más eficaz el calor de la reacción, por ejemplo, para producir vapor.

El contenido de los componentes útiles en una materia prima natural suele ser insuficiente para el empleo efectivo de la misma y por eso se efectúa el enriquecimiento previo de dicha materia, o sea, el aumento de la cantidad del componente valioso o su separación en varios componentes que sirven de materia prima para distintas industrias. Al enriquecer la materia prima en el lugar donde se extrae, se reducen los gastos de transporte para el traslado al sitio de su transformación proporcionalmente al aumento de la concentración del componente útil en la materia prima.

El enriquecimiento es necesario también puesto que las reservas de materia prima concentrada que hay en la naturaleza se agotan poco a poco y la industria se ve obligada a separar los componentes útiles de una materia prima pobre de una gran cantidad de ganga todavía no utilizable.

## 6. ANTIMONIO Y SUS PROPIEDADES

### 6.1 Antimonio

Según Kirk (Ref. No.6) el antimonio, Sb, tiene el número atómico 51, peso atómico 121.76, e isótopos de masa 121 (56%) y 123 (44%). Está en el grupo V del sistema periódico, en el subgrupo que contiene también el nitrógeno, el fósforo, el arsénico y el bismuto, con 5 electrones en la capa exterior del átomo, que permite números de valencia de +3,+5 y -3. Como podía esperarse, el antimonio es, en general, más metálico en sus propiedades físicas y químicas que ningún otro miembro del subgrupo, salvo el bismuto.

En su forma cristalina normal, es de color blanco plateado, muy quebradizo y bastante blando. A causa del tipo hexagonal romboédrico de su estructura cristalina, el metal se fractura fácilmente mostrando planos de exfoliación muy brillantes. La escasa ductilidad del antimonio restringe su uso a las aleaciones con plomo y estaño, en las cuales son convenientes la mayor dureza y resistencia que les comunica. Además del metal cristalino normal, existen las formas de antimonio negro, amarillo y explosivo.

La antimonita es el mineral de antimonio que se conoce desde hace mas tiempo. Plinio (77 d.c) lo llamaba stibium, de lo que se ha derivado hoy el símbolo químico del antimonio (Sb).

El antimonio destilado en alto vacío es amorfo y también produce una cristalización explosiva cuando se rasca o se calienta. Las aleaciones de antimonio se emplean en tipos de imprenta, cojinetes, placas para baterías de acumuladores, metal Britania, cubiertas de cables y láminas y piezas fundidas de plomo endurecido. Los compuestos de antimonio son tóxicos, pero el antimonio metálico suele considerarse no tóxico.

## 6.2 Propiedades físicas y químicas del antimonio

Las constantes, para el antimonio puro son: P.f., 630.5 °C, calor esp., 0.049; calor latente de fusión, 38.3 cal./g; conductividad térmica, 0.0454 cal./cm /seg./°C. A la temperatura ambiente; resistencia eléctrica, 39 microhmios-cm a 0°C.; módulo de elasticidad  $11.3 \times 10$  lb/pulg. ( $7.945 \times 10$  Kg/cm). El coeficiente lineal de dilatación térmica depende de la orientación de los cristales y es 8.5 a  $10.8 \times 10$  a 20–60°C.

## 6.3 Estado natural y producción del antimonio

Según Kirk (Ref. No.6) por el orden en que abundan los metales en la corteza terrestre, el antimonio ocupa un lugar inferior al del arsénico y casi a la misma altura que el mercurio y el cadmio, en la relación de algo menos de 0.0001%.

Más de un centenar de minerales contienen antimonio, pero sólo unos cuantos tienen el carácter de mena de este metal. La estibina  $Sb_2S_3$ , es la mena más importante. Siguen en importancia el oxisulfuro (quermesita) y los óxidos cervantita, valentinita y senarmonita. Minerales complejos de antimonio como livingstonita ( $HgSb_4 S_7$ ) y una jamisonita ( $Pb_2Sb_2S_5$ ) son también una fuente de este metal. Se ha encontrado antimonio nativo en el carbón mineral, en las arenas de los ríos y en algunos filones de plata.

El sulfuro se presenta también en minerales complejos de mercurio, plomo y cobre, en los cuales suele ser indeseable, pero a veces constituye un subproducto vendible, en especial en la refinación del plomo.

China es el principal productor de antimonio y se considera que tiene, con mucha diferencia, las mayores reservas de mineral.

Son países productores de este metal Argelia, Bolivia, México, China, Yugoslavia, Checoslovaquia, Estados Unidos, Canadá, Unión Sudafricana, Perú e Italia. La producción media de antimonio en los Estados Unidos, con minerales del país, en los años 1942-1944, aproximadamente 95% (3360 toneladas) procedió de cuatro minas del estado de Idaho explotadas para producir otros metales, y solo el 3% de minas fueron explotadas exclusivamente por su antimonio.

#### 6.4 Aplicaciones del antimonio

Los antiguos egipcios, griegos y romanos elaboraban a partir de este mineral ungentos, maquillajes y medicamentos oftalmológicos. El mineral era muy buscado entre los alquimistas, que lo utilizaban para depurar el oro, también se elaboraba el "vidrio de antimonio" que servía de vomitivo y laxante.

El antimonio es usado en metalurgia como elemento aditivo, sus propiedades físicas son adecuadas para aplicaciones en ingeniería. Una de sus aplicaciones más importantes es como constituyente de una aleación a base de plomo para conferir dureza y rigidez, mejorando igualmente su resistencia a la corrosión. Es también utilizado como ingrediente en aleaciones de estaño. El antimonio es usado en revestimiento de cables, moldes, soldaduras tubos etc.

Al enfriar, el antimonio líquido tiene la propiedad excepcional de expandirse mientras se solidifica (el agua es una de las pocas sustancias con esta misma propiedad). De este modo consigue rellenar las grietas de los moldes, por lo que las aristas de las piezas que se obtienen son muy afiladas. Por esta razón, se usa para hacer tipos de imprenta; también es un componente en muchas otras aleaciones, tales como el denominado metal inglés, el peltre, la aleación antifricción y el plomo antimonado.

Entre los compuestos importantes del antimonio están el tartaro emético, un tartrato doble de antimonio y potasio utilizado como agente medicinal; el sulfuro de antimonio rojo, utilizado en fósforos de seguridad y para vulcanizar caucho (como colorante aditivo); el cristal de antimonio, una mezcla de sulfuro y óxido de antimonio, utilizado como pigmento amarillo en el vidrio y la porcelana, y la manteca de antimonio, tricloruro de antimonio, utilizada para broncear el acero, como mordiente en los tintes y como sustancia cáustica en medicina. En los animales el antimonio produce glotonería.

El trióxido de antimonio es un polvo fino blanco usado principalmente como retardante de flama en la industria textil y en la industria de plástico. Se usa como revestimiento cerámico (para mantener constantes la refractariedad de los colores) en instrumentos de metal. Es también utilizado como pigmento blanco en pinturas y adhesivos, en compuestos de cloro y polímeros son usados en la fabricación de objetos a prueba de fuego y plásticos. Es altamente usado en compuestos de vidrio, en preparación de fármacos y mordientes de tinta. (Ver tabla No.7 y 8 de la sección de apéndice)

#### 6.4.1 Aplicaciones del antimonio como semiconductor

El antimonio de pureza superior a 99.99%, es usado en la tecnología de semiconductores. Este material puede ser producido por la reducción de compuestos de alta pureza, como trióxido o cloruro, con hidrógeno. Importantes compuestos del tipo II-V, como aluminio-antimonio, indio-antimonio y galio antimonio son hechos con antimonio ultra-puro, pudiendo ser usados como detectores de infra-rojo, diodos y dispositivos del efecto de Hall. El compuesto más importante de este grupo es el indio-antimonio con pureza superior a 99.99%. Es un ingrediente importantes en aleación del tipo  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , que pueden ser usados como enfriadores termoeléctricos o generadores.

#### 6.4.2 Acción biológica del antimonio

La toxicidad del antimonio depende de su estado químico, el antimonio metálico es relativamente inerte, por lo tanto la estibnita es altamente tóxica. La toxicidad de otros compuestos puede ser clasificada entre estos dos extremos. El manipuleo del antimonio o de sus compuestos debe estar en ambientes debidamente ventilados para evitar una contaminación atmosférica. Caso contrario existe peligro de formación de dermatitis.

## RESULTADOS

La tabla I. Resultados de los análisis químicos del antimonio obtenido como concentrado al separarse por flotación, se efectuó tres repeticiones para cada tamaño de mineral.

Tabla I. Resultados de las corridas de flotación

		Factor B			
	Tamaño de partícula	CMC1	CMC2	CMC3	CMC4
	(mesh)				
Factor A		37.3173502	46.64668772	48.137635	47.344298
	48	38.8964647	43.71048714	42.165214	47.903822
		37.3173502	45.61878658	46.453289	47.62406
		50.5369993	49.94023743	42.387602	41.307442
	65	53.5618332	43.06194584	42.387602	47.20406
		52.0494162	46.50109164	43.939123	44.255751
		54.6693729	55.69749164	61.374232	54.379493
	100	52.4433193	51.70575392	58.163786	55.409307
		52.4065305	54.83048235	59.743832	54.3944
		52.1260487	52.80226505	51.597122	52.043539
	200	51.4466643	53.78011873	47.344298	48.137826
		53.2863565	55.79119189	49.47071	49.090683

CMC: Concentración de la mezcla de los colectores xantato isopropilo de sodio y ditiofosfato de sodio.

Tabla II. Promedios obtenidos en los concentrados de antimonio.

	CMC1	CMC2	CMC3	CMC4
48	37.84372167	45.3253205	45.58537939	47.62406
65	52.04941622	46.5010916	42.90477594	44.255751
100	53.17307422	54.0779093	59.76061646	54.727733
200	52.28635653	54.1245252	49.47071002	49.75735



**Tabla III. Resultados de los análisis químicos para la estibnita**

	% Sb	Pb (mg/g)	% Zn	% Fe	% CaCO <sub>3</sub>	% MgCO <sub>3</sub>
M1	38.04	15	0.01	0.07	0.77	1.31
M2	11.07	54	0.01	0.24	49.26	2.24
M3	27.06	340	0	7.88	5.17	1.9

Las análisis se realizaron por vía húmeda para los siguientes elementos y compuestos Sb, CaCO<sub>3</sub>, MgCO<sub>3</sub>, los elementos Pb, Zn, Fe se determinaron por la técnica de absorción atómica.

**Tabla IV. Condiciones de la muestra de estibnita antes de la flotación y los resultados en el concentrado mostrando el incremento en su calidad de antimonio mediante el proceso de flotación.**

Mesh	% Sb inicial	% Sb Flotado	inc. De conc
M 48	31.48	44.0946204	12.6146204
M 65	35.03	46.42775868	11.39775868
M 100	38.38	55.43483333	17.05483333
M 200	45.68	51.40973534	5.729735343

**Tabla V. Recuperación que se logró al concentrarse el antimonio, el grado de concentración alcanzado respecto al inicial y el residuo obtenido de las colas de flotación para un tamaño de partícula con número de mesh 100**

N. Mesh	% Sb inicial	% Sb final	% Sb residual	Recup.
c100(1)	38.37805834	53.173074	8.05918092	93.11327042
c100(2)	38.37805834	54.077909	9.05825868	91.7689522
c100(3)	38.37805834	59.760616	6.891408988	92.7375713
c100(4)	38.37805834	54.727733	10.88071723	89.42832996

**Resultados estadístico mediante el análisis de varianza de Tukey**

**Tabla VI. Resultados estadísticos mediante el análisis de varianza utilizando el método de Tukey donde se observa la probabilidad para el rechazo o aceptación de las variables implicadas como lo son el número de malla y la concentración de colectores**

Source	DF	Sum of squares	Mean square	Valor F	Pr > F
Mesh	3	601.25563	200.41854	6.1	0.0021
Conc.	3	124.03458	41.34486	1.26	0.3051
Mesh*conc	9	589.77239	65.53027	1.99	0.0732
Error	32	1051.232731	32.8510228		
Corrected total	47	2366.295337			
R-Square	C.V.	Root MSE	RENDI Mean		
0.555747	11.927148	5.7315812	48.05491833		

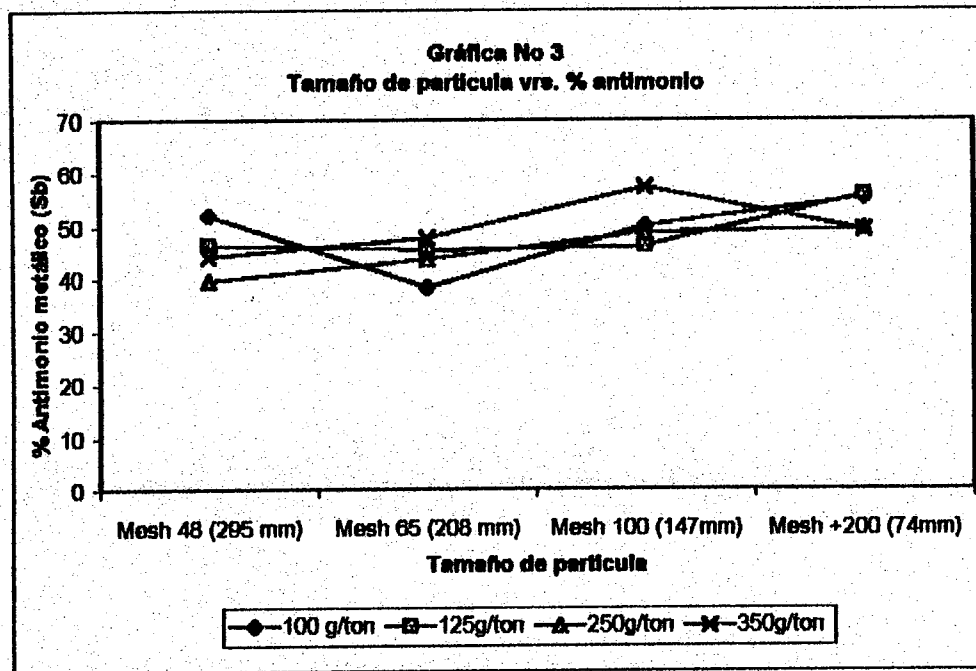
**Tabla VII. Resultados estadísticos para la interacción entre la cantidad recuperada de sulfuro de antimonio al variar el número de mesh y la concentración de colector, exponiendo diferentes niveles de grupos tukey, lo que confirma que los datos presentaron diferencias unos de otros.**

Tukey grouping	Mean	N	Malla
A	292.9	12	200
B	289.6	12	100
C	137.8	12	65
D	121.7	12	48
Tukey grouping	Mean	N	Colector
A	243.7	12	350 gr/ton
B	227.1	12	250 gr/to
C	200.4	12	125gr/ton
D	170.8	12	100 gr/ton

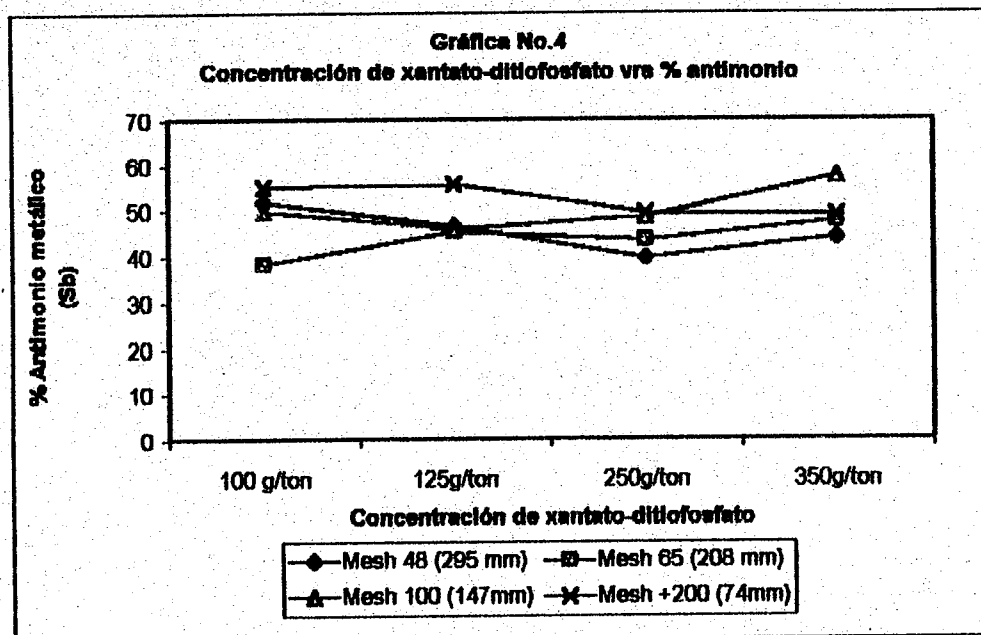
**Tabla VIII. Promedios y desviación estandar del concentrado de antimonio al variar el tamaño de partícula y la concentración**

Mesh	Conc	N	Mean	SD
48	100 gr/ton	3	52.04942	1.512417
48	125 gr/ton	3	46.50109	3.4391458
48	250 gr/ton	3	39.6667	2.7292409
48	350 gr/ton	3	44.25575	2.9483092
65	100 gr/ton	3	38.17706	1.4890524
65	125 gr/ton	3	45.32532	4.1164072
65	250 gr/ton	3	43.58538	9.957695
65	350 gr/ton	3	47.62406	0.2797621
100	100 gr/ton	3	49.83974	8.8670523
100	125 gr/ton	3	46.07791	11.0993165
100	250 gr/ton	3	48.74383	12.6304
100	350 gr/ton	3	57.3944	1.0149074
200	100 gr/ton	3	55.28546	1.1603088
200	125 gr/ton	3	55.79119	0.0110732
200	250 gr/ton	3	49.47071	2.1264121
200	350 gr/ton	3	49.09068	2.9528565

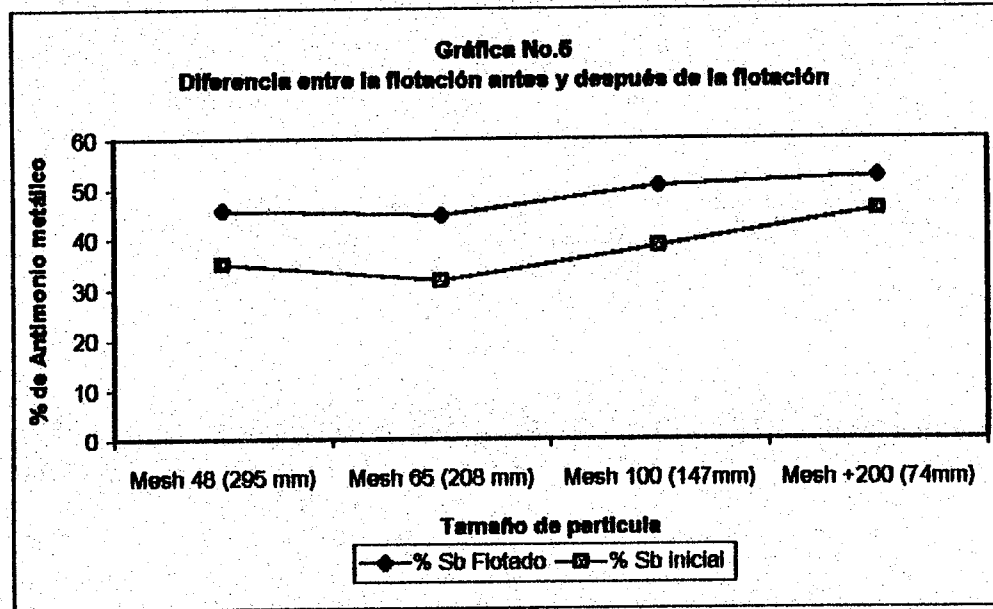
**Gráfica No.3. Comportamiento obtenido en la variable respuesta al variar el tamaño de partícula, lograndose una diferencia significativa en el concentrado de antimonio presentando su mayor concentrado para un mesh 100**



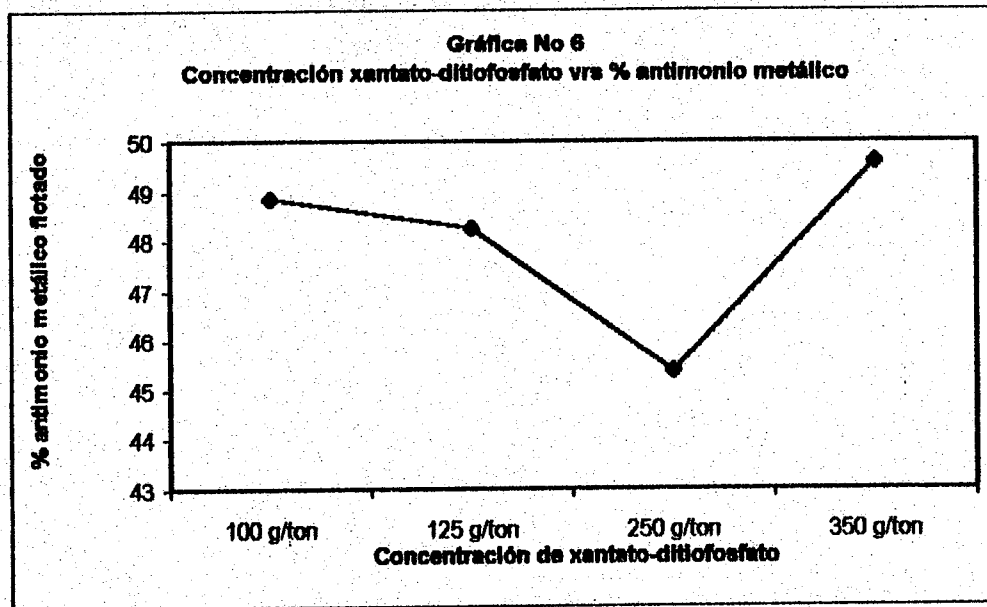
**Gráfica No.4. Comportamiento obtenido al variar la concentración del xantato-ditiofosfato presente en una relación 1:2, no existiendo diferencia significativa en el concentrado de antimonio.**



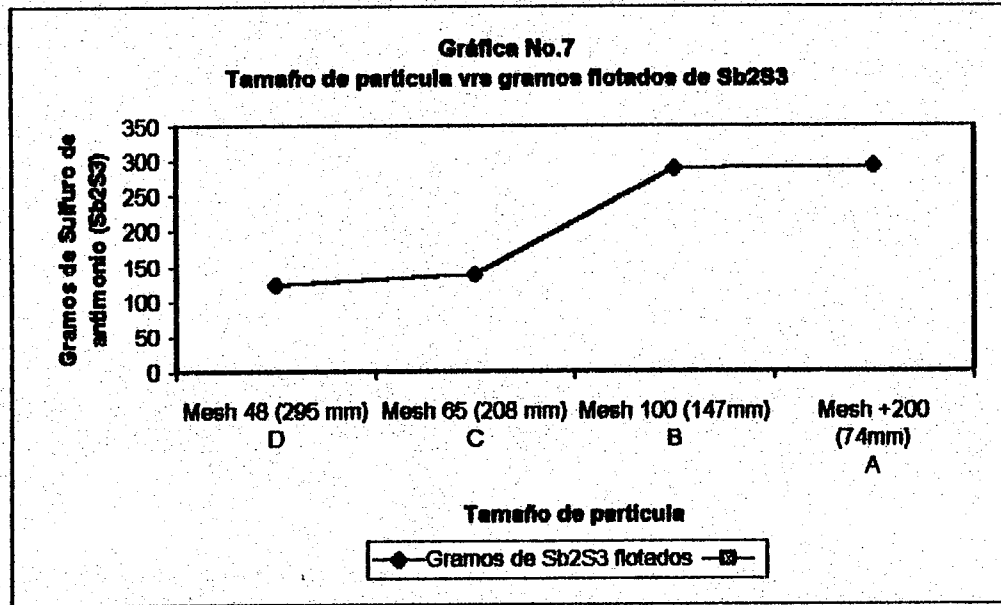
**Gráfica No.5. Diferencias obtenidas mediante la concentración de antimonio al inicio de la flotación respecto a los resultados promedios obtenidos al concentrar el mineral hasta un 12% respecto a su condición inicial.**



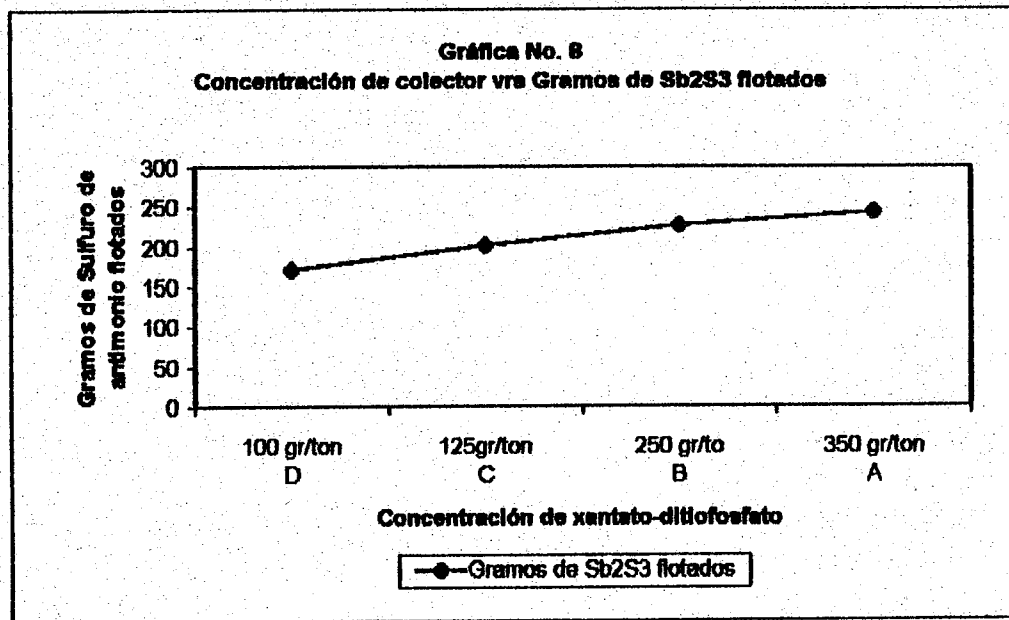
**Gráfica No.6. Concentración de colectores xantato-ditiofosfato no influyeron en el concentrado de antimonio no lograndose mayores concentrados al variar la concentración de los mismos.**



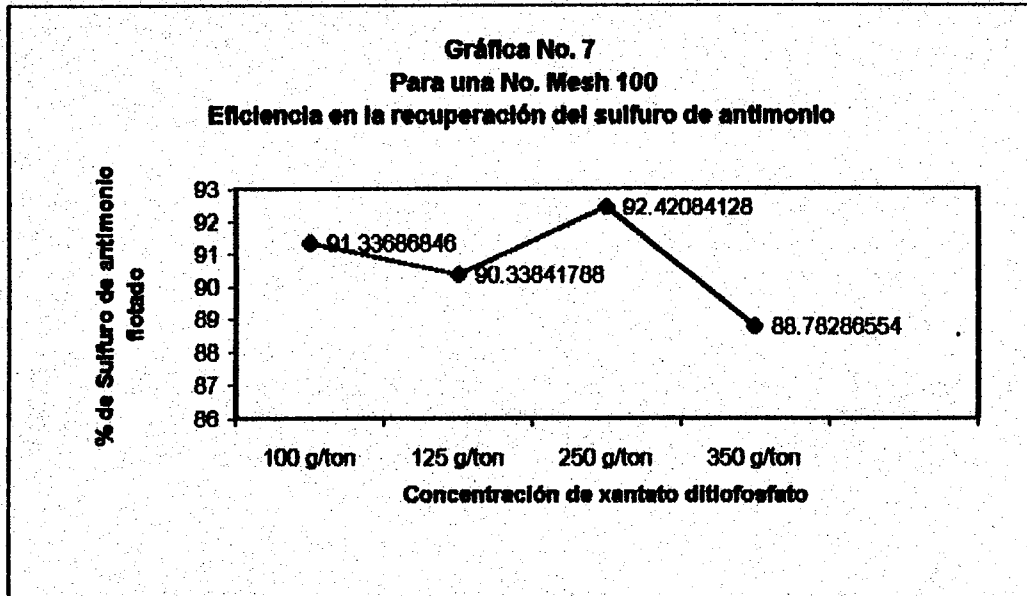
Gráfica No.7. Comportamiento obtenido al variar el tamaño de partícula obteniéndose una mayor recuperación en el concentrado de sulfuro de antimonio flotado para un mesh +200 y un menor concentrado para una partícula gruesa que corresponde a un mesh 48.



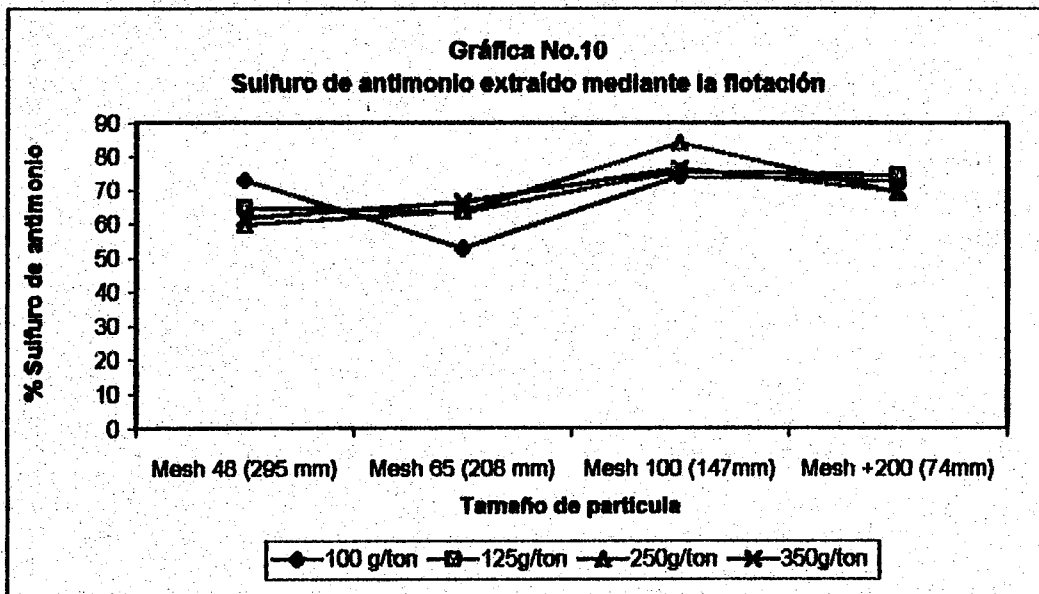
Gráfica No.8. Comportamiento obtenido al variar la concentración de xantato ditiofosfato lográndose una mayor recuperación al incrementarse su concentración.



Gráfica No. 9. Eficiencia de flotación para un mesh 100 obteniéndose una recuperación del 92.42 %, lográndose a una concentración óptima de 250 gr/ton.



Gráfica No.10. Comportamiento obtenido al variar el tamaño de partícula obteniéndose un 83.33% de sulfuro de antimonio.



## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El mineral de antimonio estibnita se obtuvo de la concesión minera Los Angeles ubicada en Palencia, los resultados de los puntos de muestreo, ayudaron a establecer que la muestra M1 contenía un 38.04% Sb, el antimonio localizado en M2 presentó un alto contenido de carbonatos estando el antimonio cristalizado en calcita, siendo ésta la que contenía antimonio en menor cantidad siendo este de 11.07% Sb y la M3 estaba asociado con sulfuros y óxidos de hierro en mayor proporción con un contenido de antimonio de 27.06% de Sb. De los 3 sitios distintos de muestreo ubicados en puntos diferentes dentro de la concesión minera, se trabajó con M1 por presentar mayor contenido de antimonio y menor interferencias al proceso de flotación.

Los minerales presentes en el yacimiento, específicamente de donde se extrajo M1, son livingstonita ( $Pb_3Sn_4Sb_2S_{14}$ ), jamesonita ( $Pb_4FeSb_6S_{14}$ ), oropimente ( $As_2S_3$ ), pirita ( $Fe_2S$ ), marcasita ( $FeS_2$ ) y estibnita ( $Sb_2S_3$ ), siendo este último el mineral presente en mayor proporción y simpleza para su extracción como sulfuro de antimonio.

Los resultados de los análisis químicos nos ayudaron a establecer los reactivos que se utilizaron en la flotación apoyados en los metales presente en M1, siendo estos (Pb, Zn, Fe) que se encontraron en proporciones bajas no representando esta interferencia al momento de flotarse. (ver tabla No. III), por lo que se decidió no utilizar reactivos depresores.

Los resultados para una malla de la serie Taylor correspondiente a un número de mesh 100, indicó que el contenido del antimonio presentó un 38.04% de Sb antes de la flotación que se utilizó para alimentar a la celda de flotación y se obtuvo un mínimo en 56.54% de Sb, este resultado en la variación es el efecto producido al variar la concentración del colector utilizado que fue un xantato isopropilico de sodio en combinación con ditiofosfato de sodio, la combinación de colectores se utilizó en una



proporción 1:2 en solución al 10% para mejorar su eficiencia en la concentración, la concentración mínima agregada fue de 100 gr/ton y la máxima de 350 gr/ton.

La recuperación del sulfuro de antimonio fue aumentando a medida que se incrementó la concentración de colectores lográndose un mínimo de 170.8 gr de  $Sb_2S_3$  un máximo de 292.96 gr de  $Sb_2S_3$ . El aumento en la recuperación fue obtenido de igual forma al variar el tamaño de partícula obteniéndose un mínimo de 121.7 gr de  $Sb_2S_3$  y un máximo de 292.9 gr  $Sb_2S_3$ . (ver tabla No. VII)

Las pruebas de flotación se efectuaron en una celda de flotación tipo denver D-2, la cantidad de mineral añadido a cada prueba fue de 500g. La velocidad de agitación dentro de la celda fue constante y se fijó de tal forma que la burbuja no fuera arrastrada fuera de la celda y no perdiera su estabilidad, la cantidad de aire dentro de la celda se fijó mediante la abertura de una válvula que proporcionaba el aire en la parte inferior de la celda.

El mineral presente en la celda de flotación se acondicionó durante 5 minutos, cumpliendo con un 8% de sólidos siendo esta la cantidad mínima en porcentaje de sólidos alimentados a una celda para pruebas de flotación en el laboratorio, el máximo permitido es de 55% de sólidos pero esto se utiliza cuando se tienen grandes cantidades de mineral para procesar y se cuenta con un proceso donde se tienen un gran número de celdas de flotación.

Durante el tiempo de acondicionamiento se añadieron los reactivos de flotación, estos reactivos se escogieron en base a su efectividad y costo en el mercado siendo estos:

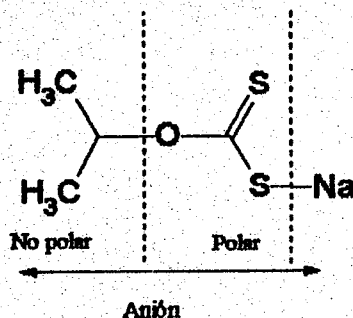
xantato isopropílico de sodio (aerofloat 343).  
ditiófosfato de sodio (promotor aero 404).  
nitrate de plomo  
sulfato de cobre  
carbonato de Sodio

colector primario  
colector suplementario.  
activador  
activador  
modificador de superficie.

Como colectores de flotación se utilizaron xantato 343 y promotor aero R-404 en una relación de 1:2, comprobándose que al tener esta relación de colectores se logran velocidades de flotación y recuperación más altas que aquellas que se obtienen con el xantato solo.

La estructura química del xantato ayuda a comprender el fenómeno de la flotación por estar constituido por una parte no polar (hidrofóbica) y otra parte polar (hidrofilica), como se muestra en la siguiente figura.

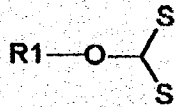
Figura No. 11. Estructura del xantato isopropílico de sodio



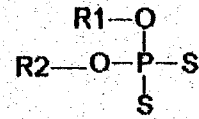
Estructura del Xantato isopropílico de Sodio (Aerofloat 343)

La parte no polar del xantato atrapó las moléculas de antimonio permitiendo que ésta se adheriera en su superficie. La parte no polar fue la responsable, en combinación con el aire en la pulpa, de el concentrado flotara hacia la superficie por ser ésta inmisible en el agua.

Se escogió como reactivo colector primario el xantato isopropílico de sodio conocido como aerofloat por ser adecuado para separar sulfuros de antimonio y por su forma estructural. La longitud de su cadena es de 4 átomos de carbono lo que se traduce en una absorción más intensa. Al aumentar la cadena de carbono su selectividad disminuye.



Mayor selectividad y poder colector



Menor selectividad bajo poder colector.

Como reactivos activadores se utilizaron nitrato de plomo y sulfato de cobre por ser estos activadores específicos para la estibnita, además ayuda al proceso de flotación, sin ellos no sería posible separar el antimonio del mineral para disponer del antimonio y que el colector lo atrape.



La activación se debió a la formación de moléculas de sulfuro de cobre sobre la superficie mineral debido al hecho de que el cobre es más electronegativo que el antimonio y por consiguiente se ioniza menos.

El sulfuro de cobre que se depositó sobre la superficie de la estibnita reaccionó rápidamente con el xantato para formar un xantato de cobre insoluble, que hace hidrofóbica la superficie de la estibnita.

El espumante al estar en la celda de flotación captura aire que es alimentado en la parte inferior de la celda y hace que se forme una burbuja lo suficientemente estable para que suba a la parte superior de la celda y en su camino atrape el antimonio separado para que se acumule en la superficie y posteriormente sea separado.

El orden de adición de los reactivos fue el siguiente. Llevar el potencial de hidrogeno a pH=8 para bloquear la activación de la pirita y otros minerales ligados a la estibnita., sulfato de cobre y nitrato de plomo para activar el antimonio, xantato-ditiofosfato y por último aceite de pino como espumante.

La flotación se efectuó después del acondicionamiento de la pulpa durante siete minutos. En esta etapa el mineral se concentró en la superficie y se separó la espuma cargada de mineral. Seguidamente se procedió a efectuar una limpieza de las colas para agotar el mineral lográndose obtener un 8.72% de Sb como promedio en las colas de flotación.

El xantato funcionó mediante el mecanismo siguiente.

1. Oxidación del sulfuro de la superficie a sulfato (o tiosulfato) ,por el oxígeno disuelto en pulpa, de acuerdo con la reacción

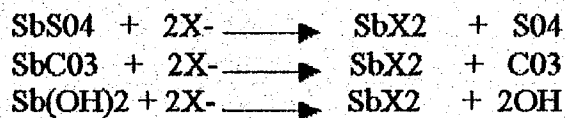


2. Reemplazamiento por intercambio de iones del ion sulfato de la superficie por el ion carbonato.



En las pulpas aereadas hay presente iones de carbonato. Los productos de solubilidad del sulfato y el carbonato de antimonio indican que habrá de ocurrir esta reacción. Las pruebas experimentales indican la presencia de iones sulfato y carbonato a la vez.

3. Remplazamiento por intercambio de iones de los iones carbonato y sulfato de la superficie (y del ion hidroxilo, dependiendo del pH) por el ion xantato (indicado por X-)



Como los xantatos de sulfato son más estables que el carbonato o el sulfato, se forman xantatos de antimonio en la superficie de la antimonita.

El sulfuro de antimonio concentrado se secó en un horno a 100°C durante una hora, y posteriormente se le efectuaron los análisis químicos por vía húmeda y por el método de la llama en absorción atómica.

De los resultados obtenidos en flotación se llegó a determinar que existe diferencia significativa en el concentrado de antimonio al variar el tamaño de partícula, la probabilidad obtenida durante el análisis estadístico fue de 0.0021 lo que indica que sí tiene efecto el variar el tamaño del mineral alimentado a la celda de flotación.

La probabilidad obtenida al variar la concentración del colector no tiene efecto en la recuperación del sulfuro de antimonio, ésta fue de 0.3051 y confirma que hay un error del 30.51% de que el efecto de la concentración pueda ser afectado al incrementarse la misma.

Los resultados obtenidos al variar el tamaño de partícula y la concentración respecto a la cantidad de sulfuro antimonio flotado son satisfactorios, ya que presentan diferencias en los grupos formados mediante un análisis Tukey lo que indica que hay variantes en ambas variables como resultado de una recuperación mayor de sulfuro de antimonio flotado al incrementarse la concentración y el tamaño de partícula (Ver tabla No. VI).

La máxima recuperación del sulfuro de antimonio se logró con una concentración de 350g/ton y con un número de mesh +200. A este tamaño de partícula el mineral se encuentra muy fino por lo que la cantidad de mineral adherido a la burbuja es mucho mayor por tener más área de contacto y es por ello que la recuperación del mineral fue mayor en comparación con un mesh 48 en donde el mineral se encuentra muy grueso por lo que el mineral tiene poca área de adherencia y el peso contribuye a que se obtengan menores recuperaciones.

El máximo incremento en el porcentaje se logró para un mesh 100, siendo éste al inicio de 38.38% de Sb y alcanzando un 55.43 % de Sb, lo que indica un 17.05 % de Sb como resultado de la concentración por flotación por espumas. (Ver tabla No.IV)

## CONCLUSIONES

1. Se obtuvo un concentrado de antimonio del 55.56%, al variar el tamaño de partícula, lográndose incrementar el grado del mineral en un 17.88% de Sb. El incremento en la concentración del colector no tuvo influencia en la concentración del antimonio.
2. La malla económica para la flotación se logró con las mallas No. 100 y +200, pero a nivel energético. La malla No.100 tiene ventaja sobre la malla No.+200 por no requerir de mucha energía para su trituración y molienda, los resultados de la malla No.100 indican una alta recuperación del sulfuro de antimonio.
3. Existe diferencia significativa al variar el tamaño de partícula y la concentración de xantato-ditiofosfato como colectores en la recuperación de sulfuro de antimonio, la mayor recuperación se logró con un mesh +200 y una concentración de 350g/ton.

## RECOMENDACIONES

1. Utilizar una combinación alterna de reactivos colectores de flotación en especial Xantato amilico-promotor 3477 y compararlos con los resultados obtenidos en este estudio.
2. Continuar los estudios de flotación para los puntos de muestreo 2 y 3 que no se evaluaron y anotar las variaciones mineralógicas que se obtienen de la gama de minerales.
3. Saber que minerales están asociados al mineral de interés y de esta forma seleccionar los reactivos de flotación que influirán en el proceso como lo son los reactivos activadores, depresores y colectores, así mismo efectuar un análisis petrográfico.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Características de los relaves. <http://www.mem.gob.pe/nuevo/carácter1.htm>.
2. Características de los relaves. <http://www.mem.gob.pe/nuevo/carácter.htm>.
3. Categorización de los compuestos químicos y de reactivos.  
<http://www.mem.gob.pe/nuevo/categori.htm>.
4. Categorización de los compuestos químicos. <http://www.gob.pe/nuevo/conti.htm>.
5. KIRK, Raymond & OTHMER, Donald. **Enciclopedia de tecnología química**. Tomo VI. 1ª ed. Editorial Hispano Americana. México: 1962.
6. **Minerales metálicos**. <http://www.rodus.com/mineguat/spanish/metallic.html>.
7. **Minerales-volumen-índice-valor**.  
<http://www.bsc.com.bo/muller/hojasw~1/mineral2.html>.
8. MUJLIONOV, I.P. **Fundamentos teóricos de la tecnología química**. 2ª ed. Moscú: 1985.
9. PERRY, Robert. **Biblioteca del ingeniero químico**. 5ª ed. Tomo V. Editorial McGraw Hill. México: 1987.
10. Propiedades del antimonio. <http://www.if.ufrj.br/teaching/elem/e05100.html>.
11. Química y tecnología de procesos de cianuración. Capítulo 2.  
<http://www.mem.gob.pe/nuevo/quimicapama.htm>.
12. SPOOTISWOOD, David & ERROL, Kelly. **Introducción al procesamiento de minerales**. 1ª ed: Editorial Limusa, 1990.
13. TABAREZ, Ornelas. Columna de flotación. <http://www.fi-a.unam.mx/prof/2.html>
14. TORPE, Whiteley. **Dictionary of applied chemistry**. 4ª ed. Volumen 5. Editorial Longmans. Gran Bretaña: 1967

## BIBLIOGRAFÍA

- 1) Academics of the Dep of Metalúrgica.  
<http://www.met.udec.cl/eng/academics/academics.html>.
- 2) AGUILAR, Fernando. Operación de una planta piloto para evaluar la recuperación de azufre por el proceso de flotación. Tesis Ing. Químico. Guatemala, USAC. Facultad de Ingeniería. 1969.
- 3) Beneficios de metales preciosos de baja ley.  
<http://www.uson.mx/unison/ugit/ugit77.htm>
- 4) Coagulación y floculación. [http://www.campus.ruv.itesm.mx:8080/programas/maestria/mia/cu220/material 1/indice.htm](http://www.campus.ruv.itesm.mx:8080/programas/maestria/mia/cu220/material%201/indice.htm).
- 5) Congresos internacionales.  
<http://www.bbs.mcacland.cl/~pdinamic/cat/infomine/univ/ingminas/congint/pr ocmin.htm>.
- 6) Cotización de los minerales. [http://www.bsc.com.bo/muller/hojas w~1/mineral3.htm](http://www.bsc.com.bo/muller/hojas%20w~1/mineral3.htm).
- 7) Cotización maquinaria flotación. <http://www.westproequip.com/esp/fl16.html>.
- 8) Dirección General de Minería. Nomina de muestras minerales de Guatemala.
- 9) Editorial tipografía nacional. Guatemala: 1962
- 10) FREY, Paul. Química Moderna. 3ª ed. Barcelona. Editorial Montaner y Simón S.A. 1968.
- 11) GUZMAN, Ervin. Caracterización del proceso de obtención de sílice mediante flotación por espumas. Tesis Ing. Químico. Guatemala. USAC. Facultad de Ingeniería, 1980.
- 12) Laboratorio N.6. Obtención de metales.  
<http://www.ur.mx/cursos/diya/quimica/jescobed/lab06.htm>.

- 13) **Manual de productos químicos para minería. Traducción del Inglés al Español por Ma. Elena Loya. Propiedad Literaria American Cyanamid Company. México 1988.**
- 14) **Prácticas de laboratorio. <http://www.ur.mx/cursos/diya/química/jescobed/topico.htm>.**
- 15) **Reactivos de flotación. <http://www.gequisa.es/gequisa/homec.htm#xant>.**
- 16) **RUANO, Jorge. Descripción y evaluación de un proceso hidrometalúrgico para la producción de concentrado de sulfuro de antimonio. Tesis de Ing. Químico. Guatemala, USAC. Facultad de Ingeniería, 1986.**
- 17) **SANTIZO, Mario. Diseño de una planta de concentración de minerales de tungsteno. Tesis Ing. Químico. Guatemala, USAC. Facultad de Ingeniería, 1976.**
- 18) **VALLADARES, Juan. Estudio preliminar a nivel planta piloto para la separación y concentración de mineral de plomo, por el método de flotación, del mineral procedente de la mina Torlon en Huehuetenango. Tesis de Ing. Químico. Guatemala, USAC. Facultad de ingeniería, 1991**

## APÉNDICE

Los reactivos utilizados para la flotación por espumas son de vital importancia para la eficacia de la flotación, las soluciones se prepararon a una solución al 10% para los colectores como el xantato isopropilo de sodio, y el nitrato de plomo el ditiofosfato y el aceite de pino se agregaron en forma pura, las propiedades fisicoquímicas de los reactivos se encuentran en la Tabla I y II. El cálculo del volumen requerido para efectuar las diluciones se presenta a continuación.

$$\frac{250 \text{ gr.}}{\text{ton}} * \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ Kg}} * 0.500 \text{ gr. xantato} * \frac{1 \text{ ml}}{1.15 \text{ gr}} * \frac{10 \text{ gr.}}{100 \text{ ml}} * \frac{1 \text{ ml}}{1.15 \text{ gr}} = 1.25 \text{ ml C}_4\text{H}_7\text{OS}_2\text{Na}$$

Para el ditiofosfato (promotor R 404) se utilizó en una proporción de 1:2 para mejorar la eficiencia del reactivo en la flotación por lo que la cantidad que se agregó fue la siguiente.

$$1.25 \text{ gr xantato} = 2.5 \text{ gr ditiofosfato (relación de concentración)}$$

Para el reactivo activador de la estibnita se utilizó nitrato de plomo y sulfato de cobre, el cálculo de su volumen para el nitrato de plomo fue el siguiente.

$$\frac{500 \text{ gr.}}{\text{ton}} * \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ Kg}} * 0.500 \text{ gr. xantato} * \frac{1 \text{ ml}}{4.53 \text{ gr}} * \frac{10 \text{ gr.}}{100 \text{ ml}} * \frac{1 \text{ ml}}{4.53 \text{ gr}} = 5 \text{ ml PbNO}_3$$

Los resultados del volumen de los reactivos se encuentran tabulados en la tabla IX del apéndice.

Reactivos que se utilizan para la flotación de la estibnita

Tabla IX. Reactivos empleados para la flotación por espumas, los reactivos fueron escogidos en base a su selectividad, poder de adsorción y valor económico.

No. De mesh	Concentración gr./tonelada	Colector 1ario Aerofloat 343 (ml)	Colector 2ario Promotor 404(ml)	Activador 1ario Pb(NO3) (ml)	Activador 2ario CuSO4(ml)	Espumante (oil pine)gtaa.
	100	0.5	1	5	1.71	8
48	125	0.625	1.25	5	1.71	8
	250	1.25	2.5	5	1.71	8
	350	1.75	3.5	5	1.71	8
	100	0.5	1	5	1.71	8
65	125	0.625	1.25	5	1.71	8
	250	1.25	2.5	5	1.71	8
	350	1.75	3.5	5	1.71	8
	100	0.5	1	5	1.71	8
100	125	0.625	1.25	5	1.71	8
	250	1.25	2.5	5	1.71	8
	350	1.75	3.5	5	1.71	8
	100	0.5	1	5	1.71	8
200	125	0.625	1.25	5	1.71	8
	250	1.25	2.5	5	1.71	8
	350	1.75	3.5	5	1.71	8

La cantidad de reactivo se calcula en base a 500 g de mineral  
 El xantato isopropílico de sodio (aerofloat 343) se utilizó en una solución al 10%  
 El nitrato de plomo se utilizó en una solución al 10%  
 El óxido de calcio se utilizó en una solución al 10%  
 El sulfato de cobre se utilizó en una solución saturada  
 El ditiofosfato (promotor aero 404) se utiliza puro

A continuación se describen los reactivos de flotación utilizados a escala industrial.

Tabla X  
Reactivo de flotación-colectores

Nombre del producto	Familia Química
Aero 404	Ditiofosfato
Aero 407	
Aero 412	
Aero 3477	
Aeroflat sodium	
Aero 4037	
Aero 5415 ATP	Tionocarbonatos
Reactivos S-7249	Ditiofosfatos
Aeroflat 242	Fosforoditoato
Aeroflat 211	
Aeroflat 238	
Aeroflat 25	Acido aryl ditiofosforico
Aeroflat 31	
Aeroflat 33	
Aeroflat 208	Sal fósforoditoata
Aeroflat 241	
Aeroflat249	
Aeroflat 317	Xantato, isobutilo de sodio
Aeroflat 325	Xantato, etilo de sodio
Aeroflat 343	Xantato, isopropilo de sodio
Aeroflat 350	Xantato, amilo de potasio
Aeroflat 355	Xantato, amilo de sodio
Cal	Alcalinos
Ceniza de soda	Alcalinos
Silicato alcalino	Silicato
Hidróxido de sodio	Alcalino
Fosfatos inorgánicos	Fosfatos
Acido sulfúrico	Acidos
Acido fluorhídrico	Acidos
Acido fosfórico	Acidos
Acido cítrico	Acido
Acido láctico	Acido
Sulfuros alcalinos	Sulfuro
Silicato de sodio	Silicato
Acetato de plomo	Sal metálica
Sulfato de cobre	Sal metálica
Sulfato de zinc	Sal metálica
Dex organico	Orgánico
Sulfonato líquido	Sulfonato
Fosfatos orgánicos	Fosfatos
Sulfato ferrico	Sal metálica
Nitrato de mercurio	Sal metálica
Sulfato de aluminio	Sal metálica
Manganatos	Sal metálica
Aero 633	Orgánicos
Aero 322	Orgánicos
Superflo	Orgánicos
Almidon	Orgánicos
Hidróxido de magnesio	Alcalinos

Tabla XI  
Reactivos de flotación acondicionadores

Nombre del producto	Familia química
Superfloc 208	Acrilamida
EN-ACT 7883	Sales de aluminio
Nalco 9894	Glicol
Nalco 8873	Acrilamidas W.T
Nalco 9853	Amina
Nalco 9714	Carboxilatos W.T
Nalco 9851	Amina W.T
Nalco 8897	Amina
Nalco 9857	Acrilamida W.T
Nalco 9854	Acrilamida
Nalco 7810	Eter poliglicol
Nalco 9809	Acrilamida
Sulfuro de hidrógeno	Sulfuro

Tabla XII  
Reactivos de flotación-espumantes

Nombre del Producto	Familia Química
Nalflote 9743	Alcohol
Aerofroth 65	Glicol
Aerofroth 70	Alcohol
Aerofroth 72	Alcohol
Nalflote 9474	Alcohol
Nalflote 8836	Alcohol
Dowfroth 250	Glicol/éter
Aceite de pino	Terpenoles
Aerofroth 73	Alcohol
Aerofroth 76	Alcohol
Aerofroth 77HP	Alcohol
Aerofroth 88	Alcohol
Aerofroth 4166	Alcohol
Vapor de petróleo	Petróleo
Dow froth 200	Glicol/éter
Polialcoxiprafinas	Petróleo
Nalco 9747	Alcohol/aldehído/éter

Tabla XIII  
Reactivos de flotación-(supresores de polvo)

Nombre del producto	Familia química
Dust-ban 8806	Cloro
Coherex	Petróleo
Arcillas de caolín	Oxido de silicio y aluminio
Cloruro de calcio	Cloruro

**Tabla XIV. Avances importantes en el desarrollo de la flotación.**

1860	Haynes	Diferencia en la mojabilidad de minerales
1886	Everson	Uso de agua acidulada
1902	Potter	Uso de gas como medio boyante
1906	Ballot	Reduce la cantidad de aceite aire por agitación
1913	Bradford	CuSO <sub>4</sub> como activador de la esfarelita
1917	Corliss	Primer colector polar α - Nafilamina
1922	Sheridan	Cianuro como depresor de la pirita y esfarelita
1924	Sulman	Ácidos grasos y jabones
1925	Keller	Xantatos como colectores
1926	Whitworth	Ditiofosfatos orgánicos como colectores
1952	Tveter	Espumantes solubles
1954	Harris	Dialkiltionocarbamatos como colectores
1966	Frommer	Floculación selectiva para taconitas
1978	Klimpel	Modelos matemáticos en flotación
1979	Hansen	Colectores especiales para carbón
1985		Desarrollo de la celda columnar

**Tabla XV. Propiedades fisicoquímicas del Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

Fórmula	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Peso específico	5.2
Peso molecular	291.52
Punto de fusión	652 oC
Punto de ebullición	1,570 oC
Densidad aparente	1.02 - 1.10 gr/cc
Granulometría (tamaño medio)	1.00 - 2.00 micras
Residuos magnéticos en malla 325	.0005% Max

**Tabla XVI. Requisitos que debe de cumplir en calidad el óxido de antimonio para su exportación**

**Propiedades químicas del Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

Nombre	Cantidad	Peñoles (%)
Trióxido de antimonio	min	99
Arsénico		0.0080 - 0.0400
Plomo		0.1000 - 0.2000
Cadmio		0.0002 - 0.0020
Bismuto		0.0015 - 0.0150
Hierro		0.0040 - 0.0100
Níquel	max.	0.001
Cobre	max.	0.0001
Zinc	max.	0.001
Estafio	max.	0
Plata	max.	0

**Tabla XVII. Propiedades fisicoquímicas de los reactivos promotores aero (ditiósfatos)**

	400	404	407	412
<b>Apariencia</b>				
<b>Pto. De ebullición</b>	-	104	103	103
<b>Pto. De congelación</b>	-	-2	-7	9
<b>PH</b>		11.5	-13	
<b>Gr. Esp. 25 C</b>	1.26	1.16	1.17	1.16
<b>Viscosidad (cps)</b>				
<b>0 C</b>	-	21	20	-
<b>30 C</b>	-	6	6	7

**Tabla XVIII. Propiedades fisicoquímicas de los promotores aerofloat, su color va de castaño oscuro a café.**

<b>Promotor aerofloat</b>	<b>Gr. Esp.</b>	<b>Viscosidad (cps)</b>
25	1.19	100-200
31	1.19	250-500
33	1.19	350-700
241	1.19	300-800
242	1.19	300-600

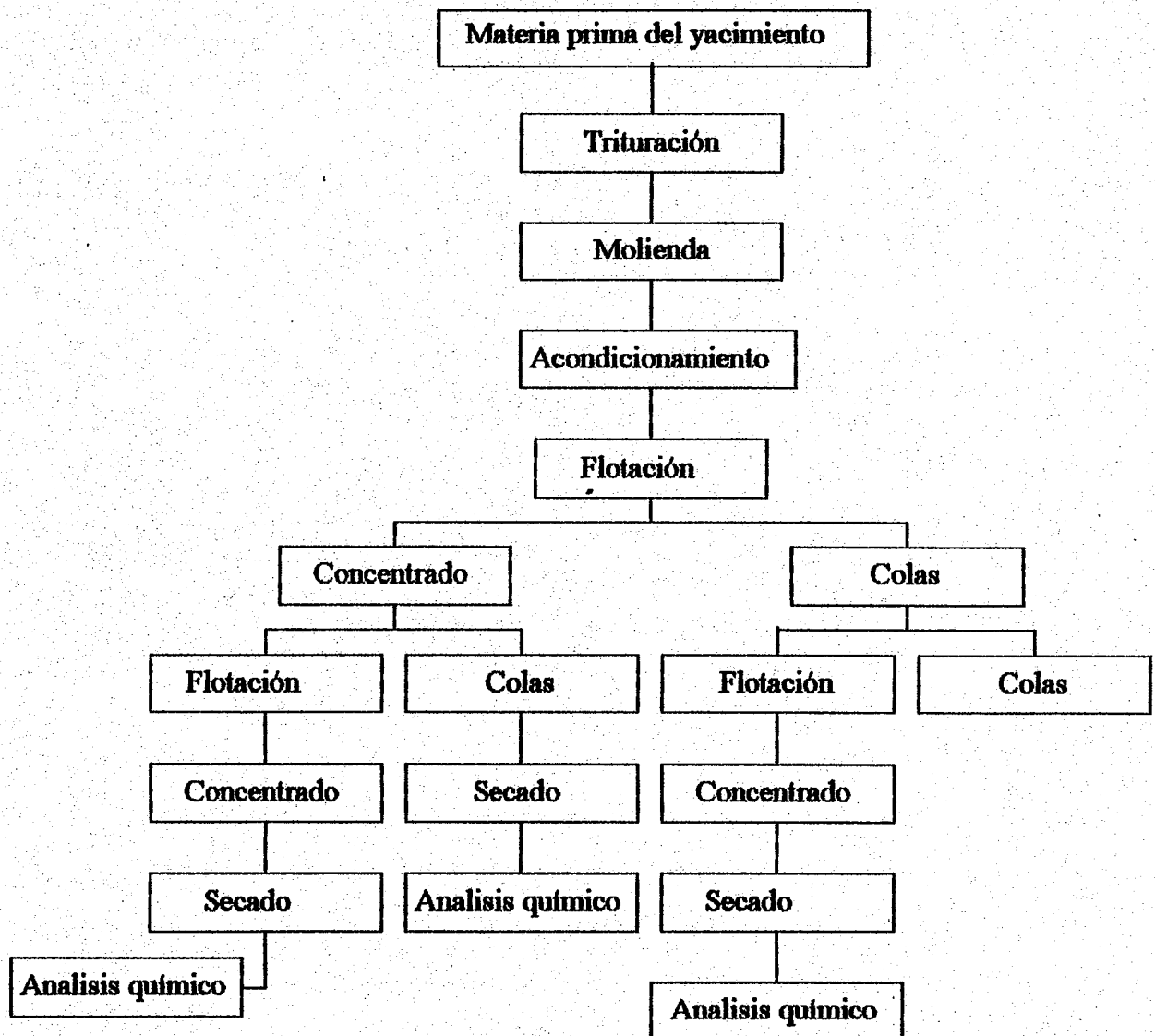
**Tabla XIX. Límites de uso para los reactivos de flotación**

<b>Reactivos de Flotación</b>	<b>Límite inf. gr/ton</b>	<b>Límite sup. gr/ton</b>
Aceite de pino	0.25	250
Acido sulfúrico	100	5000
Aerofloats 213,226,238	10	50
Cianuro	5	250
Hidróxido de calcio	250	5000
Nitrato de plomo	250	750
Carbonato de sodio	250	2500
Dicromato de sodio	100	2500
Sulfuro de sodio	250	2000
Sulfato de cobre	100	2500
Sulfato de zinc	50	1500



A continuación se presenta el diagrama de flujo utilizado que indica el procedimiento que se llevo a cabo para la flotación del antimonio.

Figura No.12. Diagrama de flujo de la flotación a nivel planta piloto



A continuación se describen los departamentos de Guatemala que tienen licencias vigentes para la explotación del mineral de antimonio, estos yacimientos son los más importantes que tiene el país. Estadísticas provistas por el Ministerio de Energía y Minas, para el año 1998.

### **PRINCIPALES YACIMIENTOS DE ANTIMONIO**

<b>Nombre de la mina</b>	<b>Localización</b>
Los Lirios	San Idelfonso Ixtahuacan, Huehuetenango
La Florida	San Idelfonso Ixtahuacan, Huehuetenango
Anabella	San Idelfonso Ixtahuacan, Huehuetenango.
Clavito II,III,IV	San Idelfonso Ixtahuacan, Huehuetenango.
BHP-HUE	San Mateo Ixtan, Huehuetenango.
Los Angeles	Palencia, Guatemala
Nenoja I,II	Camotan, Chiquimula
Samorroro	Camotan, Chiquimula
BHP-CU	Cunen, El Quiché.
BHP-CUCHIL	Tamahu, Alta Verapaz.

## DETERMINACION DE ANTIMONIO (Sb) EN ESTIBNITAS

Procedimiento utilizado para efectuar el análisis químico a las muestras de estibnitas; método evaluado por via humeda.

- ❖ Tomar o pesar 0.5 gr de muestra y colocarlo en un "beacker" de 250 ml.
- ❖ Pesar 0.1 gr de KCl fino
- ❖ Cubrir y adicionar 20 ml HCl.
- ❖ Poner a calentar sin hervir.
- ❖ Agregar 2 gr. de ácido tartarico.
- ❖ Calentar
- ❖ Agregar porciones de agua hasta completar 100 ml.
- ❖ Si aparece un precipitado blanco entonces repetir.
- ❖ Poner a hervir durante 1 minuto
- ❖ Filtrar (W41) y lavar con HCl (1+5)
- ❖ Adicionar unas gotas de rojo de metilo
- ❖ Neutralizar con NaOH 20%
- ❖ Ajustar el PH con HCl (1+1)
- ❖ Verter en erlenmeyer de 500 ml conteniendo 3 gr de NaHCO<sub>3</sub> en 200 ml H<sub>2</sub>O
- ❖ Adicionar solución de almidón 0.1/100 disolver H<sub>2</sub>O caliente.
- ❖ Titular con solución de yodo 0.1 normal.

## **PREPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES**

### **Preparación de la solución de yodo**

1. Preparación de 1 litro de solución de yodo, aprox a 0.1N
2. Añadir 12.069 gr de I<sub>2</sub>
3. Añadir 25.038 gr de KI
4. Disolver, agitando vigorosamente en pequeñas porciones de agua, añadiendo cada vez mas agua destilada.
5. agregar a 1 litro, asegurando que este bien disuelto el yodo
6. Dejar en reposo una noche y luego valorar.

### **Valoración de la solución de yodo**

1. Añadir 0.1 gr de óxido de arsenico
2. Disolver con NaOH 20%
3. Diluir a volumen de 75 cc.
4. Añadir fenoftaleina y acidificar con HCL (1+1)
5. Añadir 3 gr de NaHCO<sub>3</sub>
6. Añadir solución de almidón
7. Titular con yodo.

### **Solución de almidón**

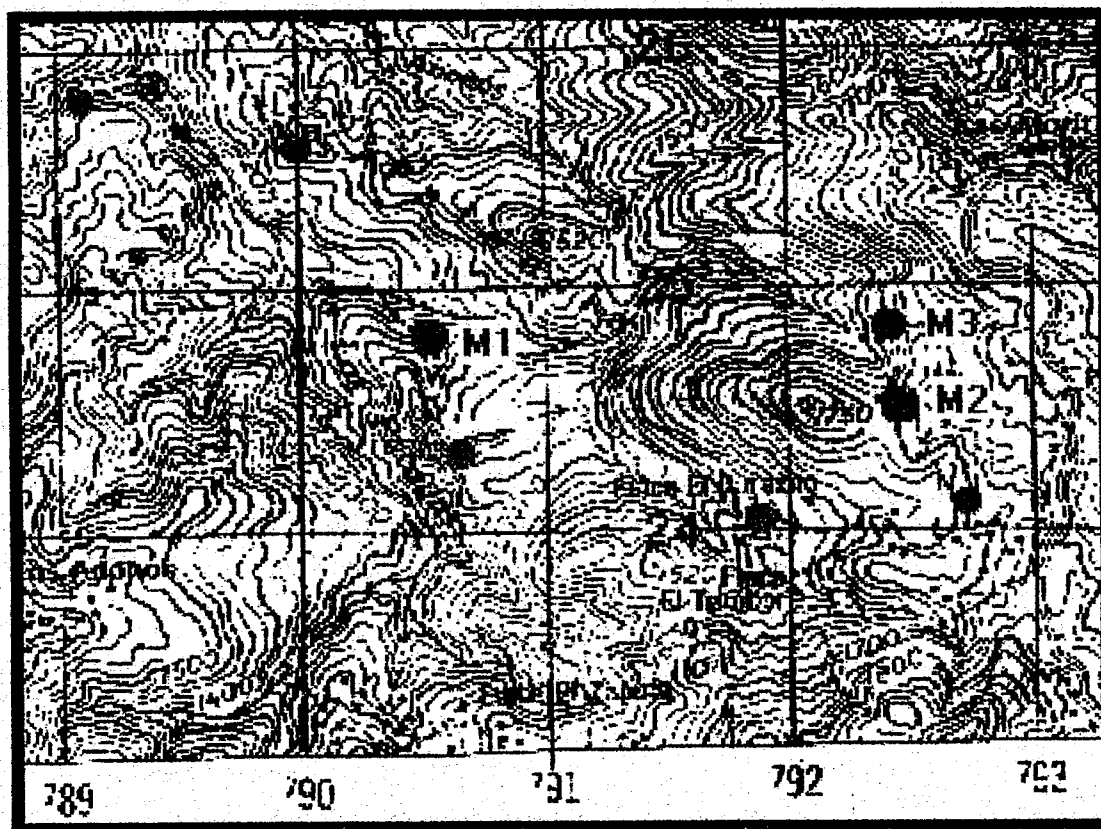
(0.25 GR + 50 CC H<sub>2</sub>O hirviendo)

### **Preparación de rojo de metilo**

0.02gr de Rojo de metilo  
70% Alcohol absoluto  
30% Agua destilada.

La figura No. 13 , muestra los puntos donde fueron tomadas las muestras del mineral de antimonio dentro de la concesión.

Figura No. 13 . Concesión minera Los Angeles



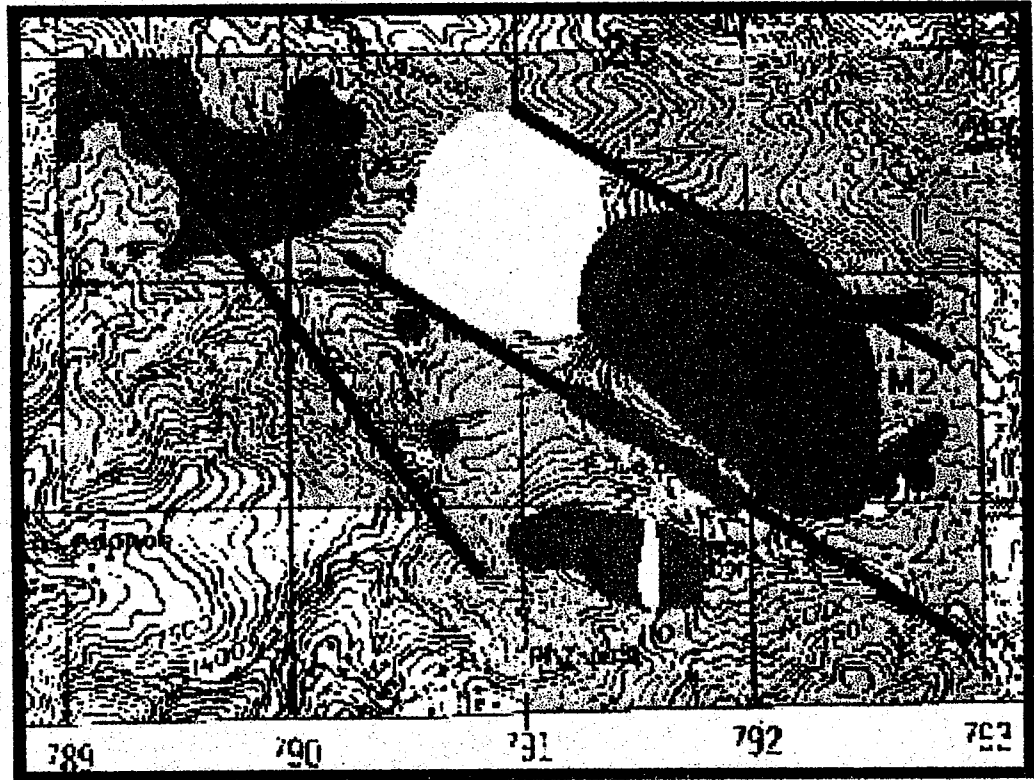
Áreas con mineralización de antimonio









Áreas donde se tomaron muestras para las pruebas de flotación

Figura No.14. Mapa geológico de la concesión minera Los Angeles que describe los diversos tipos de minerales que se encuentran asociados con el antimonio.

Mapa geológico simplificado  
(Escala 1:50000)



-  Ignimbritas
-  Perlita
-  Rocas Volcanicas caolinizadas y piritizadas
-  Calizas
-  Zonas mineralizadas de antimonio, valentinita
-  Falla