



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**  
**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS**

**Estudio de la hidrofobicidad de calcopirita**  
**Hidrofobicidad selectiva de calcopirita con diferentes colectores**

**Trabajo de Graduación previo a la obtención del título de:**  
**INGENIERO EN MINAS**

**Autor:**

**GABRIELA JACQUELINE CONTRERAS SINCHI**

**Director:**

**FERNANDO TULIO VALENCIA GUARICELA**

**Codirector:**

**MOISÉS OSWALDO BUSTAMANTE RÚA**

**CUENCA – ECUADOR**

**2018**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo se lo dedico a Dios quién ha sido el pilar fundamental y mi guía que me ha dado las fuerzas necesarias para superar las dificultades y conducirme por el camino correcto para llegar al éxito.

A mis padres por haberme apoyado en los buenos y malos momentos y regalarme la oportunidad de estudiar una carrera universitaria, y de esa forma enseñarme que, a pesar de no contar con las mejores posibilidades económicas, una persona puede triunfar en la vida sin lujos innecesarios y enseñarme que ésta y el tiempo son un regalo de Dios muy valiosos.

A mi hermana Mónica por ser el ejemplo de superación y a mi hermano Ismael que está con Dios, que, a pesar de no estar aquí presente, sé que me apoya; ustedes son una guía importante en mi vida y un pilar para salir adelante.

A mis tíos y mi abuelita por apoyarme contra viento y marea al demostrarme que, a pesar de no tener muchas cosas en la vida, una persona puede salir adelante y triunfar sin importar los obstáculos que la vida nos presenta.

A todos mis amigos y amigas, los buenos y mejores momentos compartidos superan toda circunstancia y prevalecen siempre sin importar los malos ratos vividos. El apoyo y la verdadera amistad se guarda y llena el alma con alegría.

## AGRADECIMIENTOS

A lo largo de mi vida pre-profesional muchas han sido las personas que forman parte de ella y quisiera agradecerles de corazón por su amistad brindada, consejos, un apoyo incondicional y todas esas fuerzas que en su momento me dieron cada uno. Sin importar en donde nos encontremos quiero decirles que los llevo en lo más profundo de mi ser.

A Dios por darme la vida, el entendimiento y la sabiduría para poder aprovechar la oportunidad de superarme cada día y así poder demostrarme a mí misma de lo que soy capaz.

A mis profesores Juan Calderón, Gil Álvarez, Patricio Feijoo, Néstor Rojas, Óscar Jaime Restrepo, quienes han sido desde el primer día de clase cada uno de ellos un pilar para formarme académicamente y a pesar de todo confiaron en mí y me apoyaron cuando necesite un consejo de profesor y amigo.

A mis Directores de tesis, Fernando Valencia de la Universidad del Azuay y a Oswaldo Bustamante de la Universidad Nacional de Colombia, por su esfuerzo y dedicación, consejos, enseñanza y sobre todo por su motivación para lograr culminar con éxito mi carrera.

A la Universidad Nacional de Colombia y a todos quienes forman parte del Instituto de Minerales CIMEX, que me abrieron sus puertas de las instalaciones y me apoyaron para realizar mi trabajo de graduación académica y moralmente; quienes siempre me dieron una mano y apoyaron en todo momento y supieron darme un consejo acerca de una etapa de vida profesional.

Sin olvidar a mis padres, familiares y amistades que de una u otra forma supieron aportar con su granito de arena en mi formación, quedo eternamente agradecida y pido a Dios que siempre los bendiga.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1 .....	5
CONCEPTOS GENERALES .....	5
1.1    El cobre.....	5
1.2    Concentrados de Cobre .....	7
1.2.1    Tratamiento Mineral de menas de cobre.....	8
1.3    Concentración de Minerales .....	9
1.3.1    Tenor .....	12
1.3.2    Objetivo fundamental de la Concentración.....	12
1.3.3    Importancia de la Concentración de Minerales en el ámbito minero – metalúrgico. ....	13
1.4    Índices Metalúrgicos .....	15
1.4.1    Balances de masa en un Concentrador Estacionario.....	16
1.4.2    Clasificación de los índices metalúrgicos .....	17
1.5    Fundamentos de la Flotación de Minerales .....	22
1.5.1    Flotación de Minerales .....	22

1.5.2	Proceso de Flotación Espumante .....	23
1.5.3	Hidrofobicidad .....	25
1.5.4	Ángulo de Contacto y la Ecuación de Young .....	27
1.5.5	Fisicoquímica de Superficies y Termodinámica de la Flotación .....	29
1.6	Variables que intervienen en la Flotación .....	40
1.7	Cinética de Flotación .....	42
1.7.1	Modelo Cinético García – Zúñiga y Cálculo de Parámetros Cinéticos	43
1.7.2	Potencial Químico y Constante Cinética de Flotación.....	46
1.7.3	Ecuación Cinética García – Zúñiga.....	49
1.7.4	Tiempo óptimo de Flotación .....	53
1.8	Reactivos de Flotación .....	54
1.8.1	Reactivos Colectores .....	54
1.8.2	Reactivos Modificadores.....	62
1.8.2.1	Activadores .....	63
1.8.2.2	Depresantes .....	63
1.8.3	Espumantes .....	64
1.9	Equipos de Flotación de Minerales .....	66
1.9.1	Celda de Flotación Denver D12.....	66
1.9.2	Medidor de ángulo de contacto OCA 15 PLUS.....	68
CAPITULO 2.....		70
TRATAMIENTO DEL MINERAL.....		70
2.1	Caracterización del mineral.....	70
2.1.1	Selección de muestras de mineral en roca.....	71
2.1.2	Reducción de tamaño .....	72
2.1.3	Análisis Químico para obtener Tenor de Alimento .....	73

2.1.4	Medición del Ángulo de Contacto .....	73
2.2	Protocolo de Flotación.....	74
2.3	Pruebas Propuestas .....	75
2.3.1	Parámetros Experimentales .....	75
2.3.2	Hipótesis.....	76
2.4	Proceso de Flotación espumante .....	77
2.4.1	Preparación de la suspensión (pulpa).....	78
2.4.2	Control de pH.....	79
2.4.3	Tiempo de Acondicionamiento .....	80
2.4.4	Dosificación de reactivos .....	80
2.4.5	Concentrados y colas.....	81
2.4.6	Análisis Químico del Laboratorio .....	81
2.5	Proceso Experimental.....	84
CAPÍTULO 3 .....		86
RESULTADOS Y DISCUSIONES .....		86
3.1	Caracterización Mineral .....	86
3.1.1	Análisis Químico.....	86
3.1.2	Medición de ángulo de contacto sobre la superficie de calcopirita .....	86
3.2	Pruebas de flotación .....	90
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		102

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1: Esquema de representación del Procesamiento Mineral. ....	10
Figura 1. 2: Esquema general de separación en un concentrador. Corrientes de entrada (Alimento) y corrientes de salida (Concentrado y Colas). ....	13
Figura 1. 3: Esquema Global de una Planta Concentradora de Minerales. ....	15
Figura 1. 4: Esquema de un Concentrador con dos Productos. ....	16
Figura 1. 5: Relación entre la Recuperación y la Razón de Enriquecimiento en una sola etapa en una operación de concentración. ....	19
Figura 1. 6: Celda de Flotación Espumante. ....	23
Figura 1. 7: Esquema de la interface gas-líquido-sólido. ....	24
Figura 1. 8: Parámetros del sistema de operación de la Flotación Espumante. ....	25
Figura 1. 9: Esquema de Adhesión Selectiva. ....	26
Figura 1. 10: Ángulo de Contacto y Ecuación de Young. ....	28
Figura 1. 11: Sistema de Equilibrio Trifásico. ....	30
Figura 1. 12: Adhesión Partícula – Burbuja. ....	30
Figura 1. 13: Trabajo de Adhesión. ....	33
Figura 1. 14: Adsorción. ....	34
Figura 1. 15: Energía de Activación . ....	36
Figura 1. 16: Modelo de Stern – Doble Capa Eléctrica ....	38
Figura 1. 17: Potencial Zeta ....	39
Figura 1. 18: Principio de Flotación. ....	42
Figura 1. 19: índice Metalúrgico de Recuperación ....	43
Figura 1. 20: Recuperación vs Tiempo ....	44
Figura 1. 21: Cinética de Flotación en las Celdas de Flotación ....	45
Figura 1. 22: Ejemplo de Potencial Químico ....	46
Figura 1. 23: Cálculo de la constante Cinética de Flotación. ....	48
Figura 1. 24: Modelo para tiempo corto de flotación. ....	49
Figura 1. 25: Recuperación de mineral en la espuma ....	51
Figura 1. 26: Aplicación de ecuación García – Zúñiga. ....	52
Figura 1. 27: Tiempo Óptimo de Flotación. ....	53
Figura 1. 28. Adsorción del colector sobre la superficie mineral en la interfase sólido-líquido ....	55
Figura 1. 29: Clasificación de los Colectores ....	56

Figura 1. 30: Celda de Flotación Denver. ....	67
Figura 2. 1: Muestra del mineral de sulfuro. ....	70
Figura 2. 2: Pulido de Muestra # 2 – Calcopirita. ....	72
Figura 2. 3: Mineral fino posterior a Conminución ....	72
Figura 2. 4: Gota de reactivo sobre la superficie mineral ....	74
Figura 2. 5: Celda de Flotación de 1 litro. ....	79
Figura 2. 6: Control de pH de la pulpa. ....	80
Figura 2. 7: Adición de reactivos a la pulpa. ....	81
Figura 2. 8: Etiquetado y pesado de concentrados ....	82
Figura 2. 9: 10 g de muestra de los concentrados y colas de una flotación. ....	82
Figura 2. 10: Concentrados y Colas de Flotación ....	85
Figura 3. 1: Reactivos e instrumentos utilizados para medición. ....	87
Figura 3. 2: Valores del ángulo de contacto para la superficie de calcopirita con diferentes colectores. ....	88
Figura 3. 3: Ángulo de Contacto ....	89
Figura 3. 4: Gota de agua sobre la superficie de una muestra de ganga ....	89
Figura 3. 5: Tenores de concentrados de Cu a diferentes intervalos de tiempo. ....	91
Figura 3. 6: Valores de recuperación (R) de Cu de los diferentes colectores ....	94

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1: Diferentes métodos de Concentración de Minerales y algunos equipos empleados.....	11
Tabla 1. 2: Características de la Adsorción Física (Fisiadsorción).....	35
Tabla 1. 3: Características de la Adsorción Química.....	36
Tabla 1. 4: Características de los Xantatos .....	57
Tabla 1. 5: Características de los Ditiolfosfatos.....	59
Tabla 1. 6: Características de Reactivos Modificadores.....	62
Tabla 1. 7: Modelo Denver D12.....	68
Tabla 1. 8: Especificaciones técnicas de una celda de flotación.....	68
Tabla 2. 1: Análisis Químico de 10 gr de Calcopirita.....	73
Tabla 2. 2: Protocolo de Flotación .....	75
Tabla 2. 3: Diseño Experimental para las pruebas de flotación.....	76
Tabla 2. 4: Variables .....	76
Tabla 2. 5: Peso de concentrado de t (intervalo 0 - 2 min) flotación con colector Aero 3418.....	83
Tabla 2. 6: Lectura de análisis químico de laboratorio de Concentrado de t (intervalo 0 - 2 min) flotación con colector Aero 3418.....	83
Tabla 2. 7: Parámetros que influyen en las flotaciones.....	84
Tabla 3. 1: Lectura de análisis químico de 10 g de muestra de calcopirita (Tenor de Alimento) .....	86
Tabla 3. 2: Valores del ángulo de contacto con la superficie del mineral .....	88
Tabla 3. 3: Resultados Pruebas de flotación con diferentes colectores.....	90
Tabla 3. 4: Intervalos de tiempo y concentraciones de Cu de primeras pruebas .....	92
Tabla 3. 5: Resultados de Recuperación de cada prueba de flotación con diferentes tiempos de flotación .....	93
Tabla 3. 6: Valores de la Razón de Enriquecimiento.....	94
Tabla 3. 7: Razón de Concentración .....	95
Tabla 3. 8: Rendimiento de Concentración.....	96

## ESTUDIO DE LA HIDROFOBICIDAD DE CALCOPIRITA

### RESUMEN

La flotación espumante es un proceso físico-químico en el que a partir de minerales se concentra una especie mineral valiosa por medio de adhesión de burbujas de aire. En el presente trabajo se procesa una mena de cobre en la que el mineral de interés es la calcopirita induciendo hidrofobicidad selectivamente en las partículas y se determina un reactivo de flotación que, bajo un escenario de flotabilidad determinado, genere una buena recuperación. Así se determina un patrón de comparación únicamente variando reactivos colectores para definir que reactivo es el más adecuado mediante una caracterización de la superficie mineral. Al final cada concentrado obtenido muestra el porcentaje de recuperación de  $\text{CuFeS}_2$  y los resultados permiten proponer que la Flotación de cobre de tamaño relativamente fino con colectores Xantatos es posible y muestran una recuperación más alta en el proceso de concentrado de Cu, consiguiendo un valor superior al 80 %.

**Palabras claves:** hidrofobización, calcopirita, Flotación Espumante, reactivos, colectores.

---

Fernando Tulio Valencia Guaricela

**Director del Trabajo de Titulación**

---

Jaime Alfonso Ampuero Franco

**Coordinador de Escuela**

---

Gabriela Jacqueline Contreras Sinchi

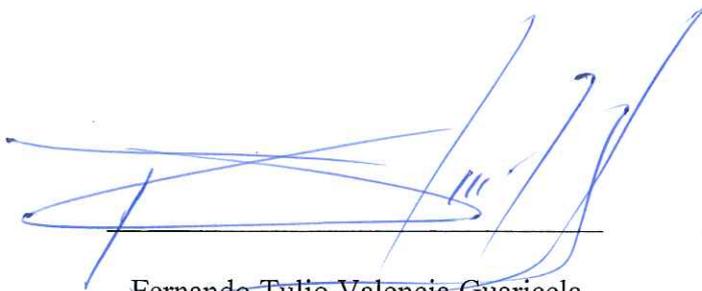
**Autora**

## ESTUDIO DE LA HIDROFOBICIDAD DE CALCOPIRITA

### RESUMEN

La flotación espumante es un proceso físico-químico en el que a partir de minerales se concentra una especie mineral valiosa por medio de adhesión de burbujas de aire. En el presente trabajo se procesa una mena de cobre en la que el mineral de interés es la calcopirita induciendo hidrofobicidad selectivamente en las partículas y se determina un reactivo de flotación que, bajo un escenario de flotabilidad determinado, genere una buena recuperación. Así se determina un patrón de comparación únicamente variando reactivos colectores para definir que reactivo es el más adecuado mediante una caracterización de la superficie mineral. Al final cada concentrado obtenido muestra el porcentaje de recuperación de  $\text{CuFeS}_2$  parcial y los resultados permiten proponer que la Flotación de cobre de tamaño relativamente fino con colectores Xantatos es posible y muestran una recuperación más alta en el proceso de concentrado de Cu, consiguiendo un valor superior al 80 %.

**Palabras claves:** hidrofobización, calcopirita, Flotación Espumante, reactivos, colectores.



Fernando Tulio Valencia Guaricela

**Director del Trabajo de Titulación**



Jaime Alfonso Ampuero Franco

**Coordinador de Escuela**



Gabriela Jacqueline Contreras Sinchi

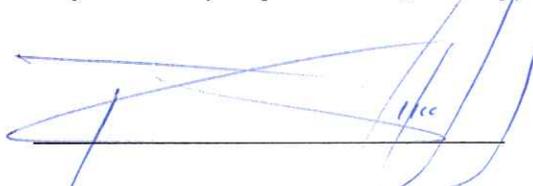
**Autora**

## STUDY OF THE HYDROPHOBICITY OF CHALCOPYRITE

### ABSTRACT

The foaming flotation is a physical-chemical process where a valuable mineral species is concentrated through the adhesion to air bubbles. In the present work, a copper mine was processed and the mineral of interest was the chalcopyrite. Hydrophobicity was selectively induced in the particles and a flotation reagent was determined in order to generate a good recovery under a given buoyancy scenario. A comparison pattern was obtained by varying collector reagents to define which reagent was the most suitable by a characterization of the mineral surface. Each obtained concentrate showed the recovery percentage of  $\text{CuFeS}_2$ . The results allowed to define that the flotation of relatively fine sized copper with xanthate collectors was possible and showed a higher recovery in the process of copper concentration with values higher than 80%.

**Keywords:** Hydrophobization, chalcopyrite, foaming flotation, reagents, collectors.



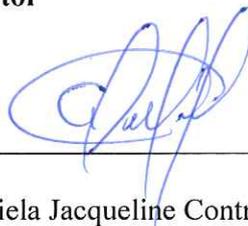
Fernando Tulio Valencia Guaricela

**Degree Work Director**



Jaime Alfonso Ampuero Franco

**Faculty Director**



Gabriela Jacqueline Contreras Sinchi

**Author**



Translated by

Ing. Paul Arpi

Gabriela Jacqueline Contreras Sinchi

Trabajo de Titulación

Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela. MSc

Febrero, 2018.

## **ESTUDIO DE LA HIDROFOBICIDAD DE CALCOPIRITA**

### **Hidrofobicidad selectiva de calcopirita con diferentes colectores**

#### **INTRODUCCIÓN**

El proceso de flotación espumante es un fenómeno físico-químico que tiene como objetivo la separación o concentración de especies minerales valiosas de las que no lo son (ganga), por medio de la adhesión selectiva de burbujas de aire inyectadas en una solución acuosa que captan a las partículas minerales de interés. Consiste en la separación de partículas sólidas hidrofóbicas (no forman enlaces iónicos con el agua) de partículas sólidas hidrofílicas (sí forman enlaces en la interfase sólido-agua produciéndose humectación o adsorción de agua). (Bravo Gálvez, 2004)

La separación de minerales ocurre en las interfases sólido/líquido, líquido/gas, sólido/gas, que depende de la adhesión de la partícula sólida a una burbuja de aire generada en la celda de flotación. Las partículas de la especie a flotar, se adhieren a las burbujas de aire concentrándose en la superficie de la pulpa en forma de espuma mineralizada. Para que pueda ocurrir tal fenómeno existen varios equipos que cumplen la función de promover el encuentro partícula-burbuja que contribuyen a controlar el equilibrio entre una alta recuperación del metal deseado y un alto tenor en el producto de la flotación. Este proceso involucra la intervención de hidrofobicidad a la superficie de la partícula que varía de acuerdo al mineral, por lo que, si esta propiedad que poseen ciertos minerales fuera baja, existe la necesidad de utilizar un reactivo colector. (Chau et al., 2009)

El objetivo de este trabajo de investigación es presentar el comportamiento de diferentes reactivos de flotación en la recuperación de cobre de una especie mineral que contiene sulfuros (hierro, cobre, zinc y plomo) optimizando el proceso de recuperación de mineral a través de flotación convencional, disminuyendo la cantidad de impurezas en un concentrado de cobre. Con base en la teoría de flotación de sulfuros y tomando en cuenta que no todos los procesos de flotación son iguales ya que dependen de la naturaleza del material (composición mineralógica) y del mineral que se requiera recuperar; es decir la cinética de flotación es diferente por la química de los componentes (colectores, espumantes, depresantes y activadores), se realiza un proceso de flotación espumante para recuperar cobre en el producto de la flotación, obteniendo altos porcentajes de recuperación en los concentrados y bajo contenido de cobre en las colas. (Méndez, 2009)

La separación y recuperación de Cobre por flotación de minerales que contienen calcopirita ( $\text{CuS}_2\text{Fe}$ ) y materiales sin valor primario como los sulfuros de hierro (pirita y la pirrotita) que, aunque son a menudo flotables y se encuentran en mayor cantidad en una especie mineral, pueden ser controlados. A pesar de las concentraciones altas, se puede trabajar con ella depresando dichos sulfuros que no son de interés económico y dejando en la superficie de la pulpa una espuma mineralizada rica de Cu. (Méndez, 2009)

Al determinar cuál es el escenario físico-químico más propicio se puede fijar un proceso o secuencia de flotación para minerales de cobre, donde se puede separar por hidrofobicidad inherente natural ya que la calcopirita posee un alto grado de repelo al agua, debido a esto, sería necesario depresar la pirita presente y regular al mismo tiempo el pH de la solución, como es fácilmente recogido por los reactivos de flotación, se emplea un proceso de flotación secuencial simple de dos etapas. (Ortiz et al., 2014)

Como primera etapa se prepara la pulpa para poder flotar el mineral, es así que se depresar hierro, donde se verifica que la superficie de la pirita no está activada con

iones de metal disueltos; esto quiere decir que no vaya a flotar hierro, ya que la pirita no flota en condiciones de pH (8 – 9), por lo tanto, para regular el pH y depresar los sulfuros se agrega cal en pequeñas cantidades. Algunas veces el cianuro, si puede utilizarse, se agrega para ayudar en la depresión de sulfuros de hierro, pero para mejores resultados de acondicionamiento rápido se utiliza cal. (Ortiz et al., 2014)

Controlar el pH es una etapa importante de acondicionamiento, ya que es el escenario en el que se va a trabajar, entonces, se debe establecer el pH inicial, y posterior a este, si no se encuentra a un valor óptimo en el que se pueda trabajar, sería necesario regularlo con cal o hidróxido de sodio.

En una segunda etapa de flotación, es necesario volver la superficie mineral hidrófoba, por lo que se activa la superficie con la adición de un colector. Como el objetivo es realizar algunas pruebas se utilizan cuatro reactivos colectores diferentes, de los cuales para que pueda efectuarse la flotación de cobre es necesario utilizar Xantatos, Ditiofosfatos o Tiocarbamatos. Estos colectores deben poder reaccionar en una solución acuosa más o menos alcalina (pH = 8 – 9), entonces éste valor sería constante como parte del procedimiento a seguir previamente establecido. (Bustamante Rúa M. O., 2017)

En estos escenarios físico-químicos la recuperación de cobre puede llegar a ser efectiva ya que, con las condiciones establecidas anteriormente, se garantiza que el mineral flotaría normalmente. Finalmente, se agrega un espumante MIBC, en cada prueba variando solo los colectores seleccionados; se obtienen varios concentrados en intervalos definidos que serán comparados con el objeto de observar que colector recuperó con mayor efectividad Cobre. El patrón de comparación en la flotación es el proceso que se realiza en la mina de donde se obtuvo la mena mineralizada.

Dentro del proceso de identificación de los escenarios físico-químicos ideales para la flotación se realiza inicialmente mediciones del ángulo de contacto entre la superficie mineral y los diferentes reactivos colectores. En este punto se identifica como es el

comportamiento de dichos reactivos al contacto con el mineral y se observan las propiedades hidrófobas de naturaleza propia que posee la calcopirita.

Los estudios de hidrofobicidad desde el punto de vista termodinámico generalmente preceden a los estudios de flotabilidad (procesos). En este sentido, variaciones de pH y reactivos alternativos pueden entrar al escenario y permitir la hidrofobicidad, que es lo que se desea estudiar. (Bustamante Rúa M. O., 2017)

La investigación nace a partir de visualizar la situación general de la industria minera subterránea e incluso a cielo abierto en el país, ya que se ha llevado a cabo la ejecución de la extracción de minerales metálicos, sin tener una completa asesoría técnica que olvida o deja a un lado temas como la existencia de contaminantes presentes en un concentrado de cobre, en comparación con otras industrias mundiales en minería que comercializan el mismo producto, pero se sobreponen por la calidad que ofrecen en sus productos. Por lo que el proyecto se direcciona a enlazar estudios previos como la posibilidad de la hidrofobización variando pH y evaluar nuevos reactivos, a través del análisis del ángulo que se forma al contacto partícula - burbuja en el proceso de flotación a escala laboratorio. Aprovechando la posibilidad de medir el ángulo de contacto y usando la ecuación de Young, se puede evaluar la hidrofobicidad y posterior flotación de calcopirita usando alternativas no convencionales.

## CAPÍTULO 1

### CONCEPTOS GENERALES

#### 1.1 El cobre

El cobre es un metal de transición que tiene un característico color rojizo y brillo metálico, que forma parte de la “familia del cobre” junto a la plata y al oro constituyéndose como los mejores conductores de electricidad. Éste metal no se oxida, no se degrada ni contamina y es reciclable indefinidamente. Comúnmente se lo denomina “metal rojo” por su coloración intensa, se utiliza de forma pura o en aleaciones con otros metales. En forma pura se lo utiliza para la fabricación de una amplia gama de productos, generalmente cables y tuberías, mientras que, combinado con otros metales forma aleaciones. Existe una amplia variedad de aleaciones de cobre, de cuyas composiciones dependen las características técnicas que se obtienen. El cobre forma aleaciones con elementos tales como: Zn, Sn, Al, Ni, Be, Si, Cd, Cr y otros en menor cuantía. El cobre tiene una alta capacidad de aleación metálica sin perder sus propiedades sino transmitiéndolas, es empleado para distintos usos industriales. Importante es mencionar que existen dos aleaciones que son reconocidas desde la antigüedad, éstas son el bronce (Cu-Sb) y el latón (Cu-Zn). (Codelco, 2017)

Se encuentra a menudo en forma nativa en la superficie de la tierra principalmente por su nobleza electroquímica, siendo uno de los metales nobles más barato detrás del platino, oro y la plata. El cobre se ha convertido en un metal difícil de sustituir ya que su resistencia a la corrosión es una de sus principales propiedades que le colocan por encima de los demás metales. Al ser un excelente Conductor Eléctrico ha ganado importancia en el mundo y actualmente se encuentra en un punto emergente en la industria minera, siendo así que ha aumentado su consumo de forma paralela con el desarrollo tecnológico del mundo con casi el 50 % del consumo mundial de cobre para la industria eléctrica. Gracias a su alta conductividad eléctrica, ductilidad y

maleabilidad es el material con mayor uso en la fabricación de cables eléctricos y otros componentes eléctricos y electrónicos. (Donoso Muñoz, 2013)

Siendo así en el mundo existen grandes productores de cobre y de concentrados de cobre principalmente, pero hoy en día nacen nuevas industrias en países que se están desarrollando para empezar una competencia en el mercado de comercialización del mismo. (Bazán et al., 2010) En Ecuador, hoy se encuentran ejecutando proyectos innovadores que ayudarán para que su economía salga a flote, es por eso que la importancia de ofrecer un producto de excelente calidad es necesario para llegar a formar parte de grandes comercializadores de cobre en el mundo, o por lo menos mantenerse dentro del mercado y ser considerados competidores.

Los compuestos que contienen cobre deben ser tratados debidamente para separar el metal del resto de los minerales, por dicha razón se clasifican en dos grupos de acuerdo con su composición química que pueden ser minerales sulfurados (mezcla de sulfuros de cobre y hierro y otros compuestos) y los minerales oxidados (descomposición y oxidación de los minerales sulfurados). Aproximadamente el 80 % del cobre se obtiene a partir de minerales sulfurados y un porcentaje menor de minerales oxidados. La mayoría de sulfuros se encuentran a profundidades considerables, constituyéndose como primarias calcosina ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) y covelina ( $\text{CuS}$ ); como secundarias calcopirita ( $\text{FeCuS}_2$ ), cuya explotación se ha convertido en la más rentable comparada con las anteriores mencionadas. (Donoso Muñoz, 2013)

Generalmente se encuentran formando parte de la naturaleza como grandes depósitos minerales que son explotados en minas a cielo abierto por las grandes extensiones que comprenden, pero los valores de ley de los yacimientos son relativamente bajos, por lo que es necesario manejar grandes masas de terreno lo que hace que surja la necesidad de eliminar las impurezas contenidas en estos grandes volúmenes de mineral.

El cobre al encontrarse presente en la naturaleza generalmente en depósitos de mineral pórfido, son sulfuros de cobre contenidos por sulfuros de hierro que son ocasionalmente fáciles de flotar cuando son liberados, ya que existen en la naturaleza minerales que poseen hidrofobicidad natural que ayuda al proceso de flotación, siendo así el estudio de los minerales Hidrófobos importante para determinar qué tipo de proceso de flotación se puede implementar, que reactivos químicos se necesitan y otros parámetros técnicos analizados que intervienen en la Flotación Mineral. (Maurice C. Fuerstenau, 2007)

La flotación espumante de minerales sulfurosos se ha venido dando a lo largo del desarrollo de la minería del mundo, donde las mayores potencias mineras son las que lideran la optimización del proceso de flotación.

## **1.2 Concentrados de Cobre**

La industria minera que lidera actualmente la producción de concentrados de cobre es Chile; seguida de otros países como Perú los mismos que tienen a China, Japón, entre otros, como uno de los principales consumidores de cobre. La producción de Cobre ha ido en aumento gracias a la alta demanda haciendo que incremente los precios lo que ha permitido que se reactiven proyectos mineros en la última década, con una fuerte inversión en nuevas tecnologías, investigación y desarrollo; Chile es un buen ejemplo del nuevo impulso que está teniendo la minería de cobre. (Donoso Muñoz, 2013)

La obtención del cobre es compleja y requiere de una serie de procesos para dejarlo en condiciones de ser comercializado ya que se encuentra de manera dispersa en grandes áreas conjuntamente con una gran cantidad de sales y otros elementos mineralógicos además de roca estéril. Llegar a conseguir un concentrado de cobre conlleva un tratamiento mineral previo en el que se trata una Mena de cobre, se lo procesa para liberar el mineral de interés y pasa a través de un procedimiento físico-químico en el que se crean escenarios con determinadas condiciones que dan como

producto final una solución rica en cobre que se constituye de la mayor cantidad de partículas minerales valiosas.

Entonces para la obtención del concentrado de cobre es necesario que la mena que contiene el mineral de interés sea tratada por una serie de procesos que liberen el mineral llevándolo hasta obtener partículas muy finas; a partir de esta etapa se aplica tratamiento físico-químico que comprende Flotación Espumante, en la que se concentra el mineral basándose en la hidrofobicidad selectiva separando unos minerales de otros, con la presencia de oxígeno y agua, junto con la adición de reactivos que ayudan a captar dicho mineral.

#### 1.2.1 Tratamiento Mineral de menas de cobre

Para recuperar cobre de los minerales sulfurados que vienen acompañados se ha venido realizando extensos estudios que han determinado diferentes procesos para su beneficio, entre estos procesos hidrometalúrgicos y pirometalúrgicos, pero la flotación ha sido mejor ya que otros demoran días en completarse, mientras que ésta solo minutos que representan menos consumo de energía. (Carmano, 2000)

La Calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) es una mena de cobre que se encuentra en forma masiva y más ampliamente distribuida, siendo la principal ya que contiene aproximadamente entre el 30 – 40 % de Cu. Es conocida como pirita de cobre muy común en los filones de sulfuros diseminados por las rocas ígneas. Casi dos tercios de su peso son de hierro y cobre, ambos metales de gran aplicación industrial, pero por su valor en el mercado es extraído el cobre con alto rendimiento económico. (Mineral Data Publishing, 2005)

Una mena que contiene porcentajes de cobre (calcopirita) se encuentra generalmente constituida en su mayoría por hierro; el hierro se ha convertido en el principal factor que dificulta la separación de las especies minerales valiosas que serían el cobre

como mineral de interés principal de las especies minerales consideradas como estériles. En el proceso de flotación de calcopirita que tenga un contenido de cobre recuperable puede contener otros minerales asociados que castigan al concentrar el cobre y perjudicar el proceso de comercialización, por lo tanto, existe la necesidad de preparar un escenario físico-químico que permita bajo ciertas condiciones extraer el cobre obteniendo un concentrado mineral con un mínimo porcentaje de contaminantes. (López & Reyes, 2005)

La adición de reactivos aporta iones que modifican la estructura superficial de los minerales dando paso a la adsorción de colectores para poder llegar a la flotación con un control de pH en la pulpa generada, respetando límites de potencial eléctrico que dependen del mineral tratado. (Mercedes & Suárez, 2013)

Los sulfuros metálicos tienen propiedades fuertemente hidrófobas, de manera que junto con los metales nativos son los minerales más fácilmente flotables. El gran problema que presenta la flotación de sulfuros es la separación entre ellos, es decir, la flotación selectiva de los sulfuros individuales a partir de concentrados colectivos. Otro problema que se presenta en la flotación de los sulfuros es la influencia de la oxidación superficial de éstos sobre su flotabilidad. La oxidación superficial se produce por erosión y oxidación por el aire y aguas presentes en los yacimientos, produciendo una película de óxidos, sulfatos o carbonatos sobre la superficie de éstos.

### **1.3 Concentración de Minerales**

La mineralurgia es una ciencia que comprende diversos métodos de concentración de minerales cuyo objetivo es obtener un producto enriquecido de una especie mineral valiosa que pueda ser considerado como concentrado, y un producto empobrecido en dicho mineral que toma el nombre de estéril o ganga, formando parte de un relave. La figura 1.1 muestra las etapas principales de la mineralurgia, que son la Liberación de minerales valiosos de la ganga (Trituración, Cribado, Molienda y Clasificación); y

la otra etapa que es la Separación de minerales valiosos conocida como Concentración. (Linares Gutiérrez, 2010)

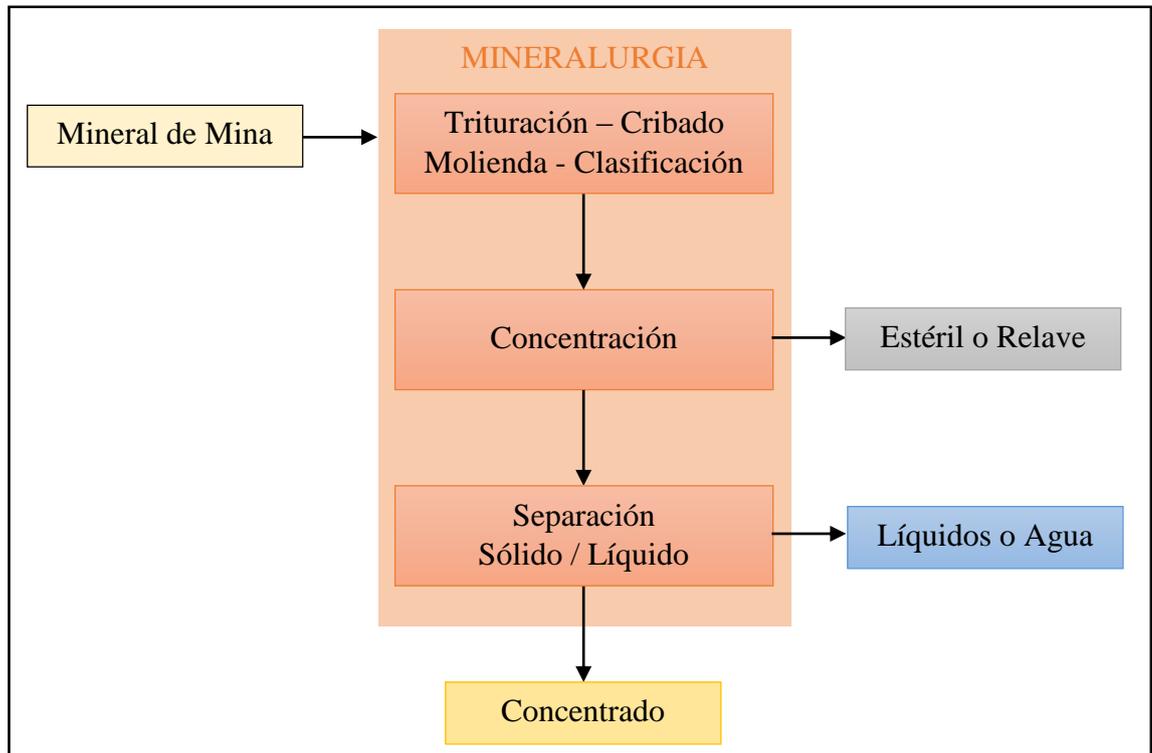


Figura 1. 1: Esquema de representación del Procesamiento Mineral.

Fuente: (Linares Gutiérrez, 2010)

La concentración de minerales es el procedimiento mediante el cual se eleva el tenor o concentración (en porcentaje) específicamente de una mena o mineral, mediante equipos de separación sólido-sólido produciéndose así la disociación de dos o más especies mineralógicas y generar una corriente enriquecida en un mineral de interés. Es decir, enriquecer el mineral eliminando ganga y minimizando las pérdidas de mineral útil en cuanto sea posible.

Para que se produzca una adecuada separación, debe existir entre dichos minerales alguna propiedad que tenga valores relativamente diferentes, que pueden ser la gravedad específica, susceptibilidad magnética, conductividad eléctrica o una respuesta fisicoquímica superficial. Esta propiedad se denominará propiedad diferencial. (Bustamante Rúa et al., 2008)

Por tal razón existen diferentes métodos de concentración que van de acuerdo a la propiedad diferencial que utilicen. En la tabla 1.1 se muestran los métodos de concentración, las propiedades que emplean para separación mineral y equipos que se emplean generalmente.

Tabla 1. 1: Diferentes métodos de Concentración de Minerales y algunos equipos empleados.

<b>Método</b>	<b>Propiedades que emplea para separar</b>	<b>Principales aparatos</b>
Concentración Gravitacional	Diferencia de velocidad de sedimentación de los minerales	Sedimentador, Hidrociclón, Jig, Canalón Canaletas, Mesa Vibratoria, Espiral, Conos de Separación Centrífugas, entre otros.
Concentración Magnética	Susceptibilidad magnética (atracción o no frente a un magneto o imán)	Separador magnético de tambor, Rodillos magnéticos, Separador magnético tipo “carrusel”, etc.
Concentración Eléctrica	Conductividad eléctrica	Separador eléctrico de alta intensidad.
Flotación Espumante	Hidrofobicidad y/o hidrofilidad del mineral (mojamiento o no)	Celdas de flotación y columnas de flotación.
Flotación Selectiva	Adsorción específica de un polímero y formación de un flóculo.	Sedimentador
Coagulación Selectiva	Adsorción específica de iones inorgánicos y formación de un coágulo.	Sedimentador

Fuente: (Bustamante Rúa et al., 2008)

Todos estos métodos tienen diferentes productos que se obtienen; concentrados y colas, aunque algunos generan un tercer producto; medios, pero no son una situación típica.

### 1.3.1 Tenor

En minería metálica es el valor que se asocia al porcentaje de mineral útil respecto a la masa mineral total extraída; es decir, el tenor de un mineral se define como la relación entre la cantidad de másica de mineral útil respecto a la cantidad másica o volumétrica en la mena, puede ser expresado en gramos de mineral útil por tonelada de material total, al igual que en porcentaje, en miligramos por metro cúbico de material total, etc. (Bustamante Rúa et al., 2008)

$$\text{Tenor } (t) = \frac{\text{Cantidad de mineral útil}}{\text{Cantidad total de minerales extraídos}} \quad (1.1)$$

### 1.3.2 Objetivo fundamental de la Concentración

De acuerdo a lo anterior, el objetivo fundamental de la concentración sería elevar el tenor de una especie mineralógica en una corriente que se denomina CONCENTRADO  $C$  cuyo tenor se denota como  $t_c$ . En la figura 1.2 se muestra esta corriente y de igual forma la segunda corriente que se forma denominada COLAS; en la que el tenor de la especie mineral de interés debe disminuir notoriamente o lo que sería lo mismo, el tenor de las especies minerales que acompañan el mineral de interés se eleva tomando la denominación  $t_t$ .

Si se habla de un caso ideal, los valores del tenor de la especie mineral de interés en las colas ( $t_t$ ) deberá ser nulo o tendiendo a cero ( $t_t \rightarrow 0$ ), pero no es muy probable alcanzar dichos valores ideales. Por esa razón en las plantas de concentración se impone una meta de alcanzar un valor  $t_t$  mínimo que van de acuerdo a limitaciones tecnológicas y físicas de separación.

$$t_c > t_a > t_t \quad \text{con } t_t \rightarrow 0 \quad (1.2)$$

Dónde:

$t_a$  = tenor de alimento

$t_c$  = tenor de concentrado

$t_i$  = tenor de las colas

En la ecuación 1.2 se muestra la desigualdad general que debe existir entre el de alimento y el de los productos de concentración. En el caso de que algún elemento se transforme una igualdad, el separador se está comportando metalúrgicamente como un partidor de muestra simplemente. (Bustamante Rúa et al., 2008)

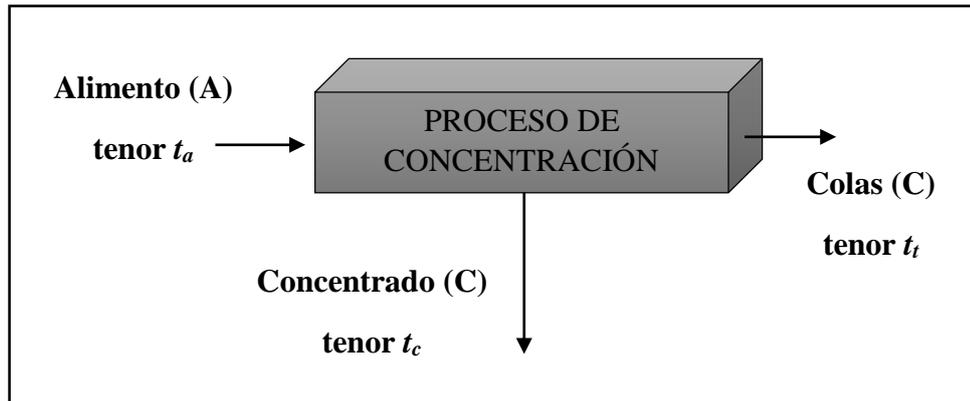


Figura 1. 2: Esquema general de separación en un concentrador. Corrientes de entrada (Alimento) y corrientes de salida (Concentrado y Colas).

Fuente: (Bustamante Rúa et al., 2008)

### 1.3.3 Importancia de la Concentración de Minerales en el ámbito minero – metalúrgico.

La concentración es la etapa en donde se recibe un material que haya alcanzado un grado de liberación aceptable, eleva su tenor y entrega a etapas posteriores que pueden ser a procesos pirometalúrgicos o hidrometalúrgicos según sea el caso. (Bustamante Rúa et al., 2008)

Algunos de los aspectos que marcan su importancia son los siguientes:

- Eliminación de minerales que no poseen riqueza alguna, más bien costos de manejo y tratamiento innecesarios del circuito de planta. A estos se los considera como gangas o minerales acompañantes de rechazo.

- Eliminación de minerales cuya presencia presenta consecuencias negativas particularmente pirritas, arenas de cuarzo y materia orgánica, etc., en el circuito de planta.
- Tratándose de lavado de carbones, el producto obtenido de la concentración ya es un material con valor industrial y comercial, donde su concentrado es el producto final de la planta, carbón sin estéril o arenas silíceas para fundición, etc.

Estos aspectos van relacionados directamente con el objetivo de la concentración que menciona los tenores de minerales extraídos de las minas que en general son muy bajos o sin valor comercial.

Así como el ejemplo del lavado de carbones, la concentración de minerales en ciertos casos puede llegar a ser la etapa final en el procesamiento de minerales industriales, tales como el talco, fluorita, roca fosfórica, arenas silíceas para fundición, concentrados de oro, etc. En sentido contrario, puede llegar a ser la primera etapa dentro del ámbito minero-metalúrgico ya que daría un valor agregado a los minerales extraídos.

Para evaluar la capacidad de concentración y analizar las colas que deben ser muy pobres en el proceso de concentración, se utiliza un conjunto de índices que proporcionan una idea de la eficacia de la separación y de la calidad de los productos obtenidos.

(Bustamante Rúa et al., 2008)

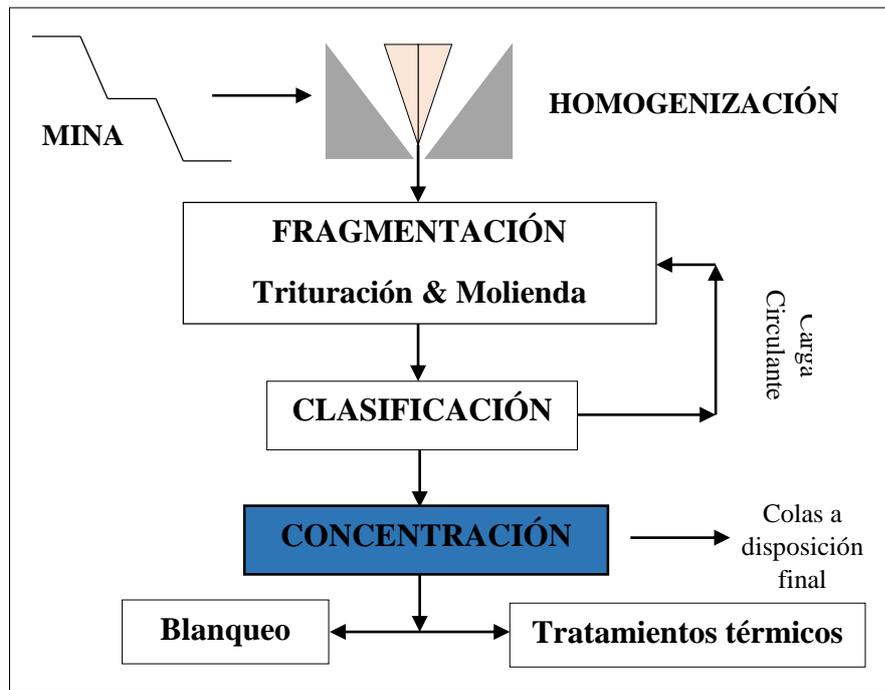


Figura 1. 3: Esquema Global de una Planta Concentradora de Minerales.

Fuente: (Bustamante Rúa et al., 2008)

#### 1.4 Índices Metalúrgicos

Son valores adimensionales que determinan calidad de separación de mineral de interés de la ganga en las diferentes etapas de concentración. Estos números son utilizados a escala laboratorio para posteriormente dimensionar equipos y plantas de concentración. Cada uno de estos valores en cada etapa de concentrado es obtenido a partir de un balance de masas, considerando la entrada o alimento de mineral, su ley o tenor, las pérdidas mínimas en cada proceso de flotación y las leyes finales obtenidas por concentración.

Como menciona Bustamante Rúa et al., (2008) se toma en cuenta que la separación y muestreo se realizan en estado estacionario, esto significa que todo lo que ingresa es igual a lo que debe salir durante el proceso. De este modo se garantiza que el muestreo está generando datos correctos y que son constantes en el tiempo.

1.4.1 Balances de masa en un Concentrador Estacionario

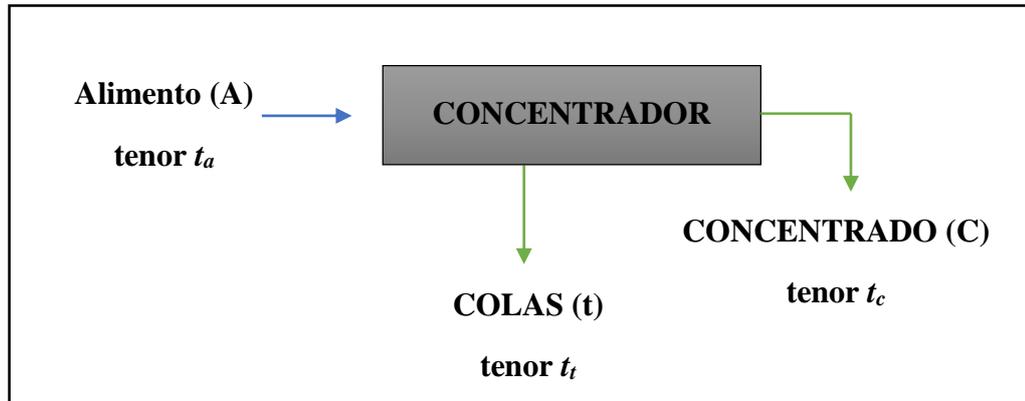


Figura 1. 4: Esquema de un Concentrador con dos Productos.

Fuente: (Bustamante Rúa et al., 2008)

En la figura 1.4 se representa un concentrador estacionario que tiene como productos un concentrado y las colas. Los flujos másicos del mineral deben mantenerse en un constante balance de masas de la siguiente manera:

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Flujo másico de mineral} \\ \text{que entra} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{Flujo másico de mineral} \\ \text{que sale} \end{array} \right] \quad (1.3)$$

Microscópicamente se tiene:

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Mineral de interés} \\ \text{que entra} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{Mineral de interés} \\ \text{que sale} \end{array} \right] \quad (1.4)$$

Es decir:

$$A = C + T \quad (1.5)$$

$$A * t_a = C * t_c + T * t_t \quad (1.6)$$

Como la ecuación 1.6 se expresa en términos del mineral de interés, el segundo término de la misma se asocia a pérdidas durante el proceso, es decir, al mineral de interés que abandona el proceso.

#### 1.4.2 Clasificación de los índices metalúrgicos

Existen diferentes índices o valores que representan calidad del proceso de concentrado en diferentes relaciones, así como también índices que relacionan capacidad del circuito de concentración, que son usados para escalamiento. (Bustamante Rúa et al., 2008)

##### 1.4.2.1 Índices de Calidad

Representan información de la calidad obtenida de los productos del proceso ya sea en la etapa de concentración o en toda la planta. (Bustamante Rúa et al., 2008)

- Recuperación ( $R$ ): Es la relación entre el peso del mineral de interés que hay en el concentrado obtenido, con respecto a la cantidad de mineral que ingresó como alimento.

$$R = \frac{\text{Peso de mineral de interés en concentrado}}{\text{Peso de mineral de interés en alimento}} \quad (1.7)$$

Si desglosamos el término del concentrado y de alimento de la ecuación 1.6 tenemos que:

$$\begin{bmatrix} \text{Peso del mineral} \\ \text{de interés en} \\ \text{Concentrado} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Peso} \\ \text{de} \\ \text{Concentrado} \end{bmatrix} * \begin{pmatrix} \text{Tenor} \\ \text{de} \\ \text{Concentrado} \end{pmatrix} = C * t_c \quad (1.8)$$

$$\begin{bmatrix} \text{Peso del mineral} \\ \text{de interés en} \\ \text{Alimento} \end{bmatrix} = A * t_a \quad (1.9)$$

Entonces, reemplazando 1.8 y 1.9 en 1.7, obtenemos:

$$R = \frac{C*t_c}{A*t_a} \quad (1.10)$$

- Razón de enriquecimiento ( $R_E$ ): Es la relación entre el tenor del mineral útil en el concentrado, respecto al tenor del mismo mineral de alimento. (Bustamante Rúa et al., 2008)

$$R_E = \frac{t_c}{t_a} \quad (1.11)$$

Este valor debe ser mayor a la unidad ya que en caso de que se iguale a la unidad la concentración no se da e iría en contra del objetivo que se habla en la ecuación 1.2. En cambio, mientras más lejano se encuentre de la unidad mejor será la concentración, mostrando un enriquecimiento del concentrado en aumento con respecto al alimento en términos de tenor.

#### 1.4.2.1.1 Relación entre la Recuperación y la Razón de Enriquecimiento

La Recuperación y la Razón de Enriquecimiento en un proceso de concentración normalmente son opuestos. En la figura 1.5 se observa que no se puede obtener valores altos para ambos índices ya que los dos interactúan entre sí manteniendo un margen de diferencia notable. Es posible alcanzar  $R$  y  $RE$  altas si la separación se efectúa por etapas porque no es posible en una única etapa alcanzar ambos objetivos. Siendo así se puede definir dicha relación a través de la siguiente figura.

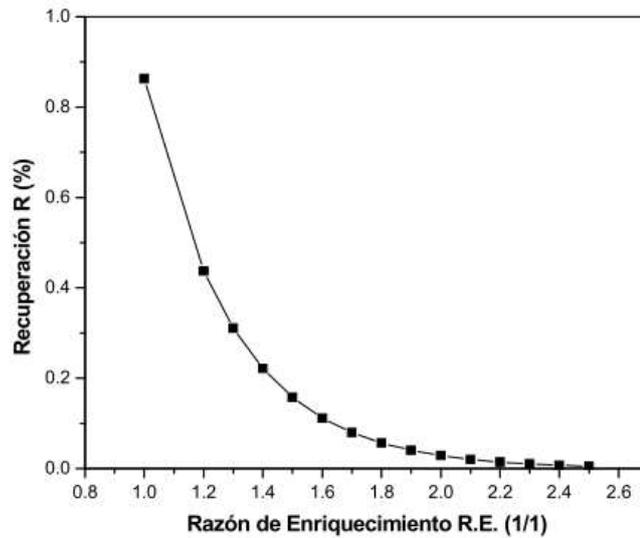


Figura 1. 5: Relación entre la Recuperación y la Razón de Enriquecimiento en una sola etapa en una operación de concentración.

Fuente: (Bustamante Rúa et al., 2008)

Dónde:

$$\frac{R}{R_E} = \frac{\frac{C * t_c}{A * t_a}}{\frac{t_c}{t_a}} \quad \rightarrow \quad \frac{R}{R_E} = \frac{t_a * C * t_c}{A * t_a * t_c}$$

Al eliminar términos semejantes tenemos la relación:

$$R * A = R_E * C$$

- Índice de selectividad (*I.S.*): Compara la calidad de separación entre dos especies que se desean separar, en el proceso de concentración. (Bustamante Rúa et al., 2008)

$$I.S. = \frac{t_a(A) * t_t(B)}{t_a(B) * t_t(A)} \tag{1.12}$$

Dónde:

$t_a (A)$  = tenor de la especie (A) en alimentación

$t_a(B)$  = tenor de la especie (B) en alimentación

$t_i(A)$  = tenor de la especie (A) en las colas

$t_i(B)$  = tenor de la especie (B) en las colas

#### 1.4.2.2 Índices de Capacidad

Son aquellos valores que proporcionan información para escalamiento, dimensionamiento y selección adecuada de equipos de concentración. (Bustamante Rúa et al., 2008)

- Razón de concentración ( $RC$ ): Es la relación entre el flujo másico de sólidos en la alimentación, con respecto al flujo de sólidos en el concentrado. Se obtiene solo información de capacidad que ayuda por ejemplo a calcular tonelaje de alimentación para producir 1 tonelada de concentrado.

$$RC = \frac{A}{C} \quad (1.13)$$

- Rendimiento de concentración ( $V$ ): Es la relación entre el flujo másico en el concentrado, respecto al flujo másico de sólidos en la alimentación. Es decir, es la inversa de  $RC$ , por tanto, proporciona igual información de tonelaje.

$$V = \frac{C}{A} = \frac{1}{RC} \quad (1.14)$$

- Eficiencia de separación ( $E$ ): Combina la información obtenida previamente de las ecuaciones 1.10 y 1.14.

$$E = \frac{R-V}{1-V_{IDEAL}} \quad (1.15)$$

Dónde:

$$V_{IDEAL} = \text{rendimiento ideal}$$

### 1.4.2.3 Índices Metalúrgicos ideales

Llegar a obtener una separación ideal no ha sido posible, porque para que se cumpla esto se debe llevar a cabo dos condiciones en el proceso de concentración en forma conjunta, eso quiere decir que si una de ellas no se cumple el proceso deja de ser ideal. Cada condición es independiente y no implica que el cumplimiento de la uno genere la otra. La primera condición es que el tenor de mineral de interés en las colas debe ser cero y la segunda condición nos dice que no debe existir la presencia de mineral de ganga o estéril en el concentrado final. En la tabla 2.1 se presentan los índices metalúrgicos ideales y en términos de tenores. (Bustamante Rúa et al., 2008)

Tabla 2. 1: Índices Metalúrgicos.

Índice Metalúrgico	Expresión del Índice Idealmente	Índices en Términos de tenores
Recuperación ( $R$ )	$R_{IDEAL} = 1.0$	$R = \left( \frac{t_a - t_t}{t_c - t_t} \right) \frac{t_c}{t_a}$
Razón de Enriquecimiento ( $R_E$ )	$R_{EIDEAL} = 1/t_a$	$R_E = \frac{t_c}{t_a}$
Índice de Selectividad ( $I.S.$ )	$I.S._{IDEAL} \rightarrow \infty$	$I.S. = \frac{t_a(A) * t_b(B)}{t_b(A) * t_a(B)}$
Razón de Concentración ( $RC$ )	$RC_{IDEAL} = 1/t_a$	$RC = \frac{t_c - t_t}{t_a - t_t}$
Rendimiento ( $V$ )	$V = t_a$	$V = \frac{t_a - t_t}{t_c - t_t}$
Eficiencia de Separación ( $E$ )	$E = 1.0$	$E = \frac{(t_a - t_t)(t_c - t_a)}{t_a(t_c - t_t)(1 - t_a)}$

Fuente: Bustamante Rúa et al., 2008.

## **1.5 Fundamentos de la Flotación de Minerales**

### 1.5.1 Flotación de Minerales

El proceso de flotación de minerales es un método físico-químico de concentración de minerales finos previamente tratados. Es un tratamiento químico de una pulpa de mineral que mediante condiciones favorables crea un escenario para adhesión de ciertas partículas de minerales hacia burbujas de aire, cuyo fin es la separación de especies minerales divididas a partir de la pulpa acuosa donde se aprovecha propiedades de afinidad por el agua (hidrofílico) o de repulsión por la misma (hidrofóbico).

En sí la flotación es una técnica de concentración que aprovecha la diferencia entre las propiedades superficiales o interfaciales del mineral útil y la ganga, basándose en la adhesión de algunos sólidos a burbujas de aire, las cuales transportan los sólidos a la superficie de la celda de flotación, donde son recolectados y recuperados como concentrado. La fracción que no se adhiere a las burbujas permanecen en la pulpa y constituyen las colas o relaves. Así, la condición de flotabilidad es una fuerte adhesión entre las partículas útiles y burbujas, que deben ser capaces de soportar la agitación y turbulencia de la celda de flotación. (Castro & García, 2012)

#### 1.5.1.1 Minerales Hidrofílicos

Minerales que pueden ser mojados por el agua ya que tienen cierta afinidad por ella, los constituyen los óxidos, sulfatos, silicatos y carbonatos. Estos representan en su mayoría a los minerales estériles conocidos como ganga dentro de un proceso de flotación espumante. Su afinidad hace que permanezcan en suspensión en la pulpa para posteriormente descender.

### 1.5.1.2 Minerales Hidrofóbicos

Son aquellos minerales que no se mojan con el agua, como los metales nativos, sulfuros de metales o especies como el grafito, carbón bituminoso, talco y otros. Esta propiedad evita el mojado de las partículas minerales y así puede adherirse a las burbujas de aire inducidas y finalmente ascender a la superficie.

El proceso de adhesión de partículas se beneficia del carácter hidrofílico de algunas partículas ya que se mojan por afinidad y permanecen en suspensión en la pulpa por un intervalo de tiempo y finalmente se hunden, y al mismo tiempo las partículas minerales que repelen el agua no se mojan y pueden adherirse a las burbujas acelerando el proceso y ascender. (Bravo Gálvez, 2004)

### 1.5.2 Proceso de Flotación Espumante

Los minerales que poseen propiedades hidrofóbicas por naturaleza son mucho más fácil de manejar, pero a la mayoría se le provoca dicho carácter mediante la adición de reactivos que reduzcan la tensión superficial de la interfase sólido-agua y permita la adsorción espontánea de burbujas de aire y así el sistema partícula-burbuja ascienda hasta la superficie formando una espuma mineralizada que se mantiene estable permitiendo por rebalse el abandono del sistema formando una corriente enriquecida.

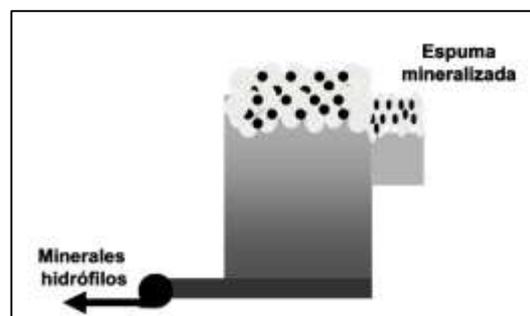


Figura 1. 6: Celda de Flotación Espumante.

Fuente: (Bustamante Rúa et al., 2008)

Los principios básicos en que se fundamenta el proceso de flotación espumante son los siguientes:

- Hidrofobicidad del mineral que permite adherencia de partículas sólidas finas a las burbujas aire.
- La formación de una espuma estable sobre la superficie del agua en la pulpa permitiendo mantener las partículas sobre la superficie.

El cumplimiento de estos principios depende del uso de reactivos químicos; entre estos están colectores, activadores, espumantes, depresantes y modificadores que hacen que la superficie del mineral repele agua, evitan que otros minerales se hagan repelentes al agua y forman la espuma estable. (Castro & García, 2012)

Al mismo tiempo, las partículas minerales hidrofílicas se humectan en el medio acuoso formando enlaces superficiales con los grupos iónicos del agua ( $H^+$  y  $OH^-$ ) sedimentándose en la parte inferior. Por lo tanto, en la flotación espumante se involucran las interfases líquido/gas, líquido/sólido, y sólido/gas como se muestra en la figura 1.6.

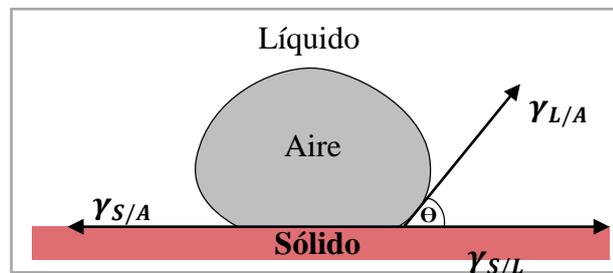


Figura 1. 7: Esquema de la interface gas-líquido-sólido.

Fuente: (Kawatra & Eisele, 1992)

Dónde:

$\gamma_{S/A}$  = energía de superficie entre la fase sólido – aire

$\gamma_{S/L}$  = energía de superficie entre la fase sólido – agua

$\gamma_{L/A}$  = energía de superficie entre la fase agua – aire

$\Theta$  = ángulo de contacto entre el sólido y burbuja de aire dentro de un líquido

Por lo tanto, el proceso de flotación es un sistema complejo de reactivos, parámetros del mineral (química de superficies) y parámetros del equipo, que conforman una estructura base del proceso de Flotación Espumante que se representa en la figura 1.8.

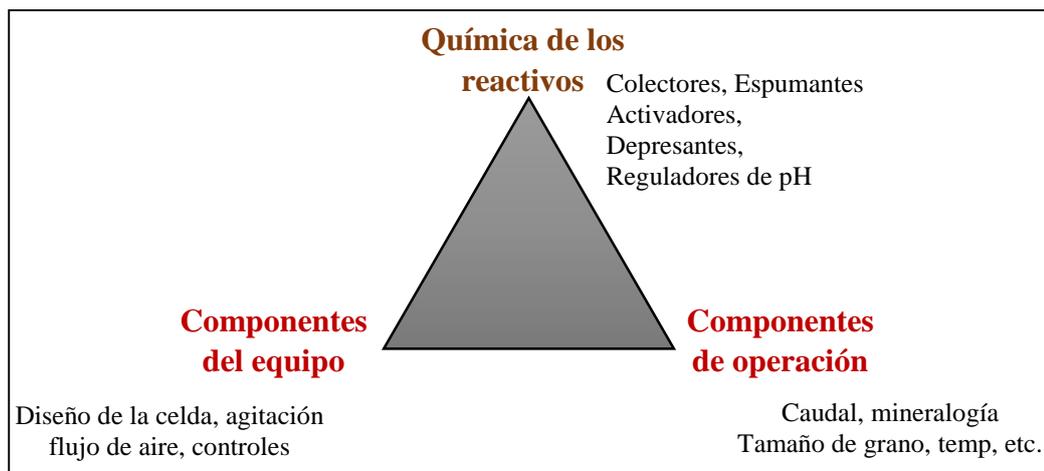


Figura 1. 8: Parámetros del sistema de operación de la Flotación Espumante.

Fuente: (Bustamante Rúa et al., 2008)

### 1.5.3 Hidrofobicidad

La hidrofobicidad significa implicar flotabilidad a un sistema; la existencia de este fenómeno nos dice que, en la mayoría de los minerales, un ángulo de contacto mayor que cero se consigue por acción de un colector conocida como hidrofobicidad inducida. Es decir que, el principio de hidrofobización se define a través del ángulo de contacto; ya que una superficie con un ángulo de contacto de  $90^\circ$ , flotaría. Contrario, podría suceder con un valor de  $10^\circ$  o  $20^\circ$  en el que puede flotar o no. Por lo tanto, se convierte en una limitación cinética y flotaría a largo plazo, pero como la flotación es un proceso dinámico el evento termodinámico podría no ocurrir. Se dice entonces que la flotación es una probabilidad, y aumenta cuando  $\Theta$  es mayor.

La acción de un colector modifica las propiedades superficiales de una partícula mineral, generando una transición selectiva entre partículas hidrofílicas nula con respecto a las partículas hidrofóbicas. (Castro & García, 2012)

La base de la flotación espumante es la diferencia en humectabilidad de diferentes minerales. Por lo tanto, como se menciona anteriormente, las partículas van desde aquellas que son fácilmente humectables con agua (hidrofílicas) hasta las que repelan el agua (hidrofóbicas). Las partículas pueden ser naturalmente hidrófobas, o la hidrofobicidad puede ser inducida por tratamientos químicos. Los materiales naturalmente hidrófobos incluyen hidrocarburos y sólidos no polares. Dichos tratamientos químicos que hacen que una superficie sea hidrófoba son esencialmente métodos para revestir selectivamente una superficie de partícula con una monocapa de aceite no polar.

En la figura 1.9 se muestra el proceso de adhesión de las burbujas de aire a la superficie de las partículas hidrofóbicas; es decir que la flotabilidad de las burbujas lleva a estas partículas a la superficie dejando atrás a las partículas hidrofílicas. Siendo así, esta unión o adhesión de burbujas a la superficie se encuentra determinada por energías interfaciales entre las fases sólida, líquida y gaseosa.

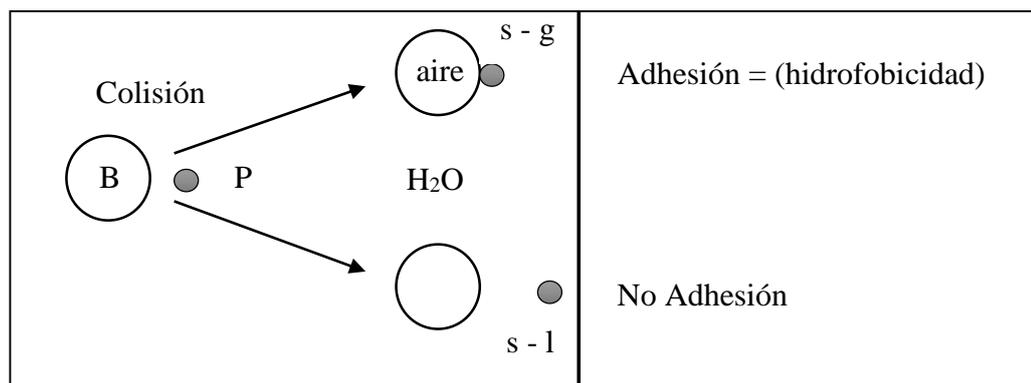


Figura 1. 9: Esquema de Adhesión Selectiva

Fuente: (Castro & García, 2012)

Dónde:

B = burbuja de aire

P = partícula

(s – g) = sólido – gas

(s – l) = sólido – líquido

#### 1.5.4 Ángulo de Contacto y la Ecuación de Young

En la figura 1.7 se representa un ángulo que se forma entre burbuja de aire y la superficie de un sólido inmerso en un líquido. Este valor se lo reconoce como Ángulo de Contacto ( $\Theta$ ). Dicho valor varía de acuerdo a las propiedades minerales de la partícula sólida y el líquido en el proceso de adhesión partícula – burbuja. (Bustamante Rúa et al., 2008)

La actividad de una superficie mineral en relación a los reactivos de flotación en el agua depende de las tensiones que actúan en la superficie. Para que sea factible la flotación de partículas sólidas o líquidas más densas que el líquido, es preciso que la adherencia de las partículas a las burbujas de gas sea mayor que la tendencia a establecer un contacto entre las partículas y el líquido. Este contacto entre un sólido y un líquido se determina mediante la medida del ángulo formado. En el equilibrio, las fuerzas interfaciales que conducen al desarrollo de un ángulo de contacto  $\Theta$ , son un parámetro termodinámico que se usa para describir la hidrofobicidad de las superficies minerales. (Bustamante Rúa et al., 2008)

Normalmente, el parámetro que suele emplearse para determinar el balance de fuerzas en las interfaces, es la tensión superficial ( $\gamma$ ) y la ecuación de Young que muestra dicho equilibrio de fuerzas. (Bustamante Rúa et al., 2008)

$$\gamma_{S/A} = \gamma_{S/L} + \gamma_{L/A} * \cos \theta \rightarrow \text{Equilibrio Punto Trifásico} \quad (1.15)$$

Despejando  $\cos \theta$  de la ecuación 1.15 tenemos la **Ecuación de Young** (Líquido):

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{S/A} - \gamma_{S/L}}{\gamma_{L/A}} \quad (\text{Se puede calcular } \gamma_{L/A}) \quad (1.16)$$

Thomas Young (1805) propuso estudiar el ángulo de contacto de una gota de líquido colocada sobre una superficie sólida plana, como un equilibrio de las tensiones interfaciales sólido – líquido, sólido – gas y líquido – gas.

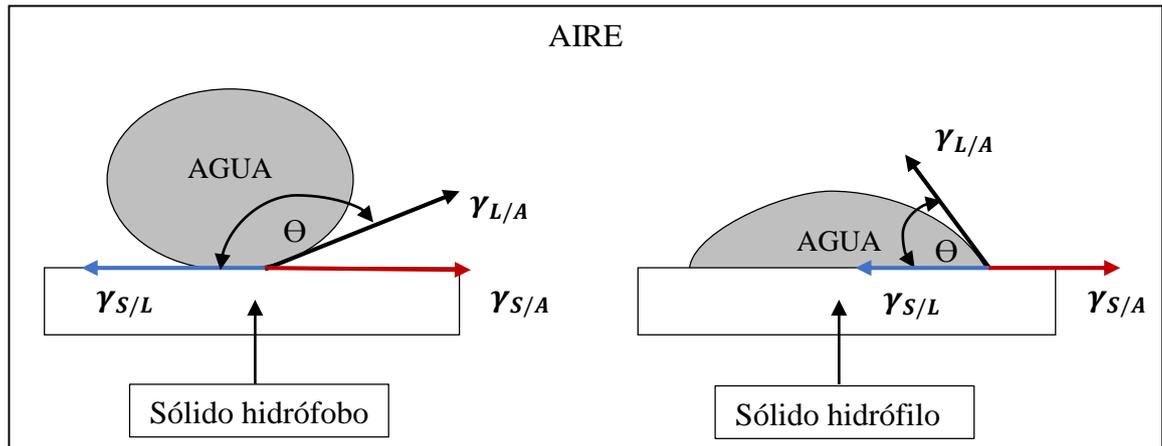


Figura 1. 10: Ángulo de Contacto y Ecuación de Young.

Fuente: (Linares Gutiérrez, 2010)

Dónde:

$\gamma_{S/A}$  = energía de superficie entre la fase sólido – aire

$\gamma_{S/L}$  = energía de superficie entre la fase sólido – agua

$\gamma_{L/A}$  = energía de superficie entre la fase agua – aire

$\theta$  = ángulo de contacto entre el sólido y burbuja de aire dentro de un líquido

Entonces, puede definirse como el ángulo formado por el plano tangente a la interfase líquido – aire y el plano formado por el sólido en un contacto trifásico S/L/A, indicando mojabilidad del sólido; es decir que cuando un líquido moja completamente a un sólido, el ángulo de contacto será igual a cero y un valor de  $\theta > 0^\circ$  indica mojabilidad parcial. Mientras mayor sea el ángulo de contacto, menor será

la mojabilidad, en consecuencia, mayor el grado de hidrofobicidad. (Linares Gutiérrez, 2010)

Si  $\Theta$  tiende a  $90^\circ$  se dice que la partícula es Hidrófoba, caso contrario si  $\Theta$  tiende a  $0^\circ$  la partícula es Hidrófila; es decir, la gota se levanta o lo contrario la gota se esparce en el sólido respectivamente. (Bustamante Rúa M. O., 2017)

Es posible aumentar  $\Theta$  con el uso de sustancias tensoactivas porque forman una película hidrófoba alrededor de las partículas, ya que éstas sustancias tienen en sus moléculas una parte no polar (hidrófoba) que es atraída por las burbujas de aire en ascensión y otra polar (hidrófila), atraída por la fase dispersa. Es importante destacar que el uso de espumantes forma una mezcla más estable de burbujas y partículas, reduciendo así el tamaño de las burbujas de aire, aumentando su superficie específica y proporcionando mayor capacidad de absorción y tiempo de contacto, porque las burbujas de aire pequeñas poseen menores velocidades ascensionales. (Bustamante Rúa et al., 2008)

## 1.5.5 Fisicoquímica de Superficies y Termodinámica de la Flotación

### 1.5.5.1 Tensión Superficial

La propiedad que controla la adhesión entre partícula y burbuja es la energía superficial, donde se establece un sistema trifásico (sólido - líquido - gas) que a su vez serían el mineral, agua y las burbujas de aire como se indica en la figura 1.11; a su vez estas tensiones superficiales llegan a establecer el Equilibrio Punto Trifásico.

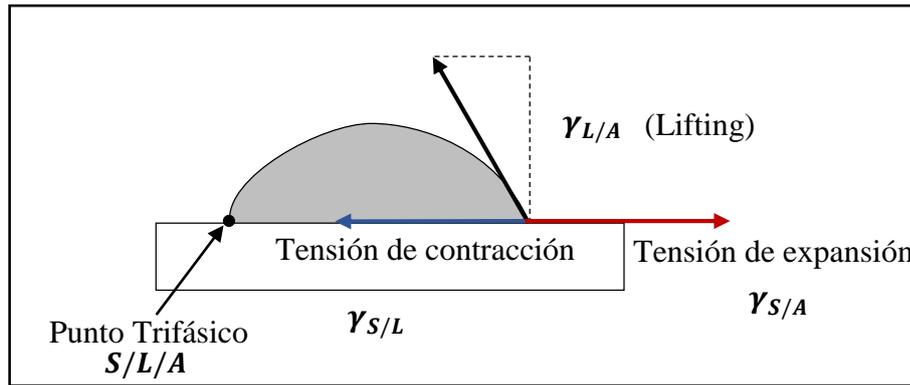


Figura 1. 11: Sistema de Equilibrio Trifásico.

Fuente: (Bustamante Rúa M. O., 2017)

Si dentro del sistema existen dos fases se establece un plano de separación física entre dos fases conocido como interfaz. Esta interfaz tiene distintas propiedades, pero una de las más importantes es la “Energía libre Interfacial” o “Energía Libre de Gibbs ( $G^S$ )”. Se aclara que estas propiedades son diferentes a las de cada fase que interviene. En el siguiente sistema de la figura 1.12 se representa la energía libre interfacial inicial y final.

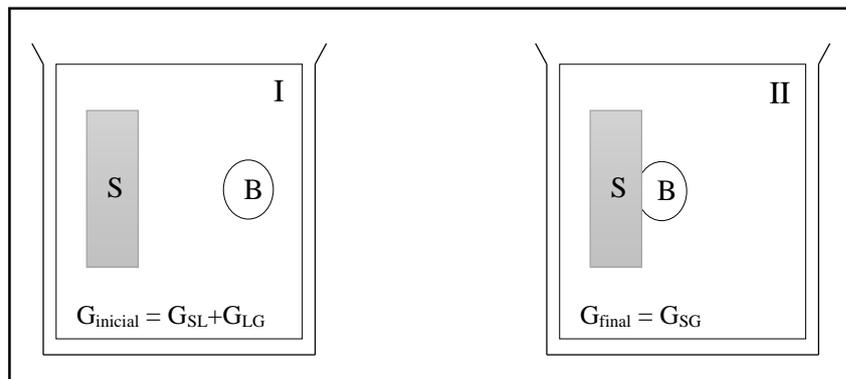


Figura 1. 12: Adhesión Partícula – Burbuja.

Fuente: (Bustamante Rúa M. O., 2017)

Por lo tanto, se puede derivar la ecuación fundamental de la química de superficie tomando en cuenta la figura 1.12, quedando de la siguiente manera:

$$\Delta G_{ADH} = G_{final} - G_{inicial} \quad (1.17)$$

$$\Delta G_{ADH} = G_{SG} - (G_{SL} + G_{LG}) \quad (1.18)$$

$$\Delta G_{ADH} = \gamma_{SG} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LG}) \quad (1.19)$$

Dónde:

$$\Delta G_{ADH} = \text{energía de adhesión}$$

Es decir, que la Tensión superficial ( $\gamma$ ) y la energía libre superficial se relacionan donde G es la energía libre y A el área de la interface.

$$dG = \gamma dA \quad (1.20)$$

Si despejamos la tensión superficial ( $\gamma$ ), ésta se convierte en una medida del trabajo requerido para aumentar la superficie en 1 cm<sup>2</sup>, con (T) temperatura, (P) presión y (n) número de moles, constantes. Siendo así tenemos:

$$\gamma = \left[ \frac{dG}{dA} \right]_{T,P,n} \quad (1.21)$$

Quiere decir entonces que,  $\gamma$  es la Tensión Superficial, y es numéricamente igual a la energía superficial si el área es unitaria. (Bustamante Rúa et al., 2008) Si reemplazo la ecuación 1.16 en 1.19 puedo obtener Energía Libre de Adhesión (1.22):

$$\gamma_{L/A} * \text{Cos } \theta = \gamma_{S/A} - \gamma_{S/L}$$

$$\Delta G_{ADH} = (\gamma_{SG} - \gamma_{SL}) - \gamma_{LG}$$

$$\Delta G_{ADH} = \gamma_{LG} * \text{Cos } \theta - \gamma_{LG}$$

$$\Delta G_{ADH} = \gamma_{LG} * (\text{Cos } \theta - 1) \quad (1.22)$$

La energía libre de la delgada capa que separa una partícula y una burbuja, referida a la película que produce desunión, puede cambiar a medida que la burbuja se aproxima a la superficie del mineral, por lo tanto, el proceso de adhesión de una partícula sólida a una burbuja durante el proceso de flotación se realiza en tres etapas.

- La aproximación de la burbuja a la partícula: predomina la hidrodinámica del proceso de flotación, donde la película de agua es completamente estable, su energía libre se incrementa a medida que la burbuja se aproxima al mineral.
- La reducción de la película de agua entre la burbuja y la partícula hasta la ruptura: predomina la intervención de fuerzas moleculares (Van der Waals y eléctricas) que se originan de la interacción de las dobles capas que hay en torno a las partículas y de hidratación de cualquier grupo hidrofílico existente sobre la superficie de la partícula. La película de agua es completamente inestable, la energía libre de la misma disminuye a medida que la burbuja se aproxima a la superficie del mineral.
- Ruptura de la película de agua: se establece el equilibrio de contacto en la que se define el ángulo de contacto.

(Mercedes & Suárez, 2013)

#### 1.5.5.2 Trabajo de Adhesión

La fuerza necesaria para romper la interfase partícula – burbuja se conoce como trabajo de adhesión ( $W_{adh}$ ), y es igual al trabajo necesario para separar la interfase sólido – aire y produce las interfases separadas aire – agua y sólido – agua. El trabajo de adhesión de burbujas sobre un sólido hidrófobo es termodinámicamente más factible; mientras mayor sea el ángulo de contacto más grande será el trabajo de adhesión entre la partícula y la burbuja, y el sistema es más elástico ante las fuerzas de rompimiento. La flotabilidad de un mineral aumenta con el ángulo de contacto y se dice que los minerales con alto ángulo de contacto son aerofílicos, es decir que tienen mayor afinidad por el aire que por el agua.

En un sistema heterogéneo con dos materiales el trabajo necesario para separar el sistema en dos interfaces es igual a la ecuación 1.23 en la que al inicio ( $G^I$ ) no existe ninguna interfaz.

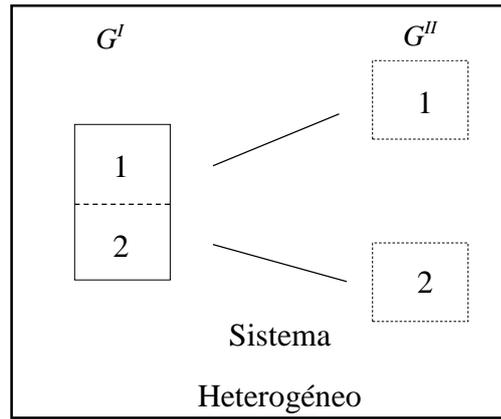


Figura 1. 13: Trabajo de Adhesión.

Fuente: (Bustamante Rúa O. , 2017)

Dónde:

$$W_{adh} = \Delta G_{adh} = G^{II} - G^I$$

$$W_{adh} = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \tag{1.23}$$

$\gamma_1$  = Tensión Superficial del material 1 de la interface separada

$\gamma_2$  = Tensión Superficial del material 2 de la interface separada

$\gamma_{12}$  = Tensión Superficial del material donde no existe interfaz

### 1.5.5.3 Adsorción

La adsorción es un Fenómeno Interfacial entre faces heterogéneas; es un proceso que puede ser descrito como distribución de especies entre dos fases en la interface. La acción de un colector (sustancia tensoactiva) es la unión o fijación de moléculas o iones del colector sobre la superficie del mineral.

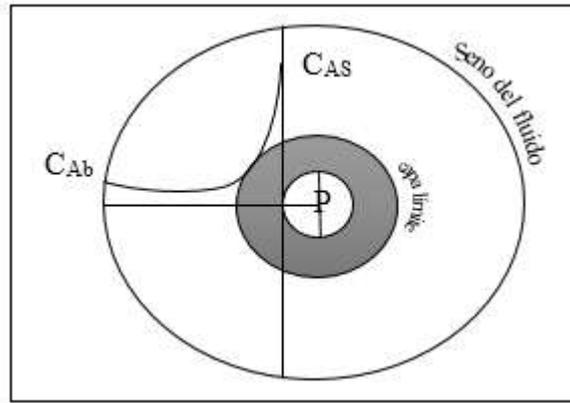


Figura 1. 14: Adsorción.

Fuente: (Bustamante Rúa M. O., 2017)

Dónde:

$P$  = partícula

$C_{AS}$  = concentración de A en la superficie

$C_{Ab}$  = concentración de A en el seno de la solución

La capa límite es la región que circula por la superficie del sólido, donde el sólido controla la capa límite. En el caso en el que existiera rugosidad aumenta la capa límite. Todas las concentraciones se miden en la región del seno de la solución ( $C_{Ab}$ ). (Bustamante Rúa M. O., 2017)

La adsorción de colectores sobre una superficie mineral depende de varios factores como la carga superficial y la composición química superficial del mineral, la química en solución del mineral, de los surfactantes y del solvente. Por ello hay dos tipos de Adsorción.

- Adsorción Física

Se presenta cuando los iones se adsorben por fuerzas electrostáticas y enlaces hidrófobos, es decir por Interacciones Débiles de Van Der Waals entre las cadenas hidrocarbúricas. La adsorción ocurre a través de diferencias individuales en la doble

capa eléctrica cuando la concentración del surfactante es baja. Es decir, como la adsorción es una manifestación de la tensión superficial, solo trabaja la componente de dispersión como una atracción física. Si se elimina la componente iónica de la tensión superficial la partícula se vuelve hidrófoba, como también se puede llegar a variar la componente iónica. Las características principales de la adsorción física se describen a continuación en la tabla 1.2. (Bustamante Rúa et al., 2008)

$$\gamma = \gamma^d + \gamma^i$$

↓

Componente de dispersión

→

Componente iónica  
(Componente Polar)

(1.24)

Tabla 1. 2: Características de la Adsorción Física (Fisiadsorción).

<b>ADSORCIÓN FÍSICA</b>	$\Delta H_{ads} < 10 \text{ Kcal/mol}$ (calor)
	Baja especificidad
	Energía de activación baja
	Posible adsorción en multicapas
	Fácil desorción (Reversible)

Fuente: (Bustamante Rúa M. O., 2017)

Es importante destacar que todos los procesos tienen una energía de activación; siendo la energía necesaria para que el proceso ocurra. Si ésta tiene un valor mínimo o llega a 0 el proceso se vuelve espontáneo.

La energía de activación es:

$$K_B T = \text{energía de activación} \tag{1.25}$$

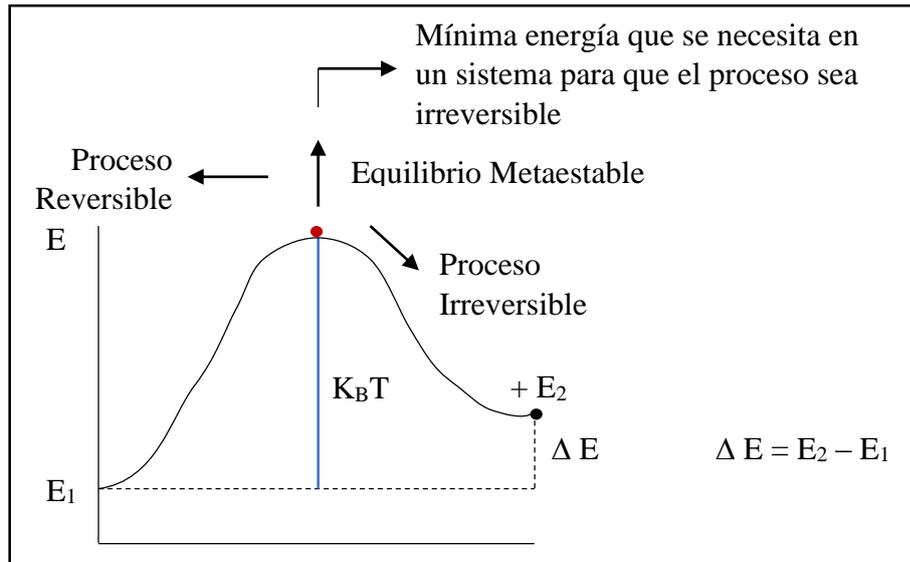


Figura 1. 15: Energía de Activación.

Fuente: (Bustamante Rúa M. O., 2017)

- Adsorción Química

Es la adsorción de un surfactante debida a la interacción entre uniones covalentes con la superficie del mineral. Se la conoce como quimisorción, cuya unión química entre el surfactante y el sólido es más específica que otras uniones. A través de la adsorción química o quimisorción se puede obtener selectividad si hay una reacción específica sobre un tipo de mineral o bien sobre un grupo de minerales.

Tabla 1. 3: Características de la Adsorción Química.

<b>ADSORCIÓN QUÍMICA</b>	$\Delta H_{ads} > 20$ Kcal/mol (calor)
	Alta especificidad
	Alta energía de activación
	Adsorción en monocapa
	Fuerza de enlace específicas
	Irreversible

Fuente: (Bustamante Rúa M. O., 2017)

#### 1.5.5.4 Teoría de la Doble Capa Eléctrica

Dentro de la flotación, en los aspectos físico-químicos de la superficie de una partícula mineral se habla de la doble capa eléctrica; la cual es un sistema en el que existe una separación de carga eléctrica en una interfaz donde hay una capa de carga positiva y una capa de carga negativa. El modelo de doble capa se utiliza frecuentemente, para visualizar el entorno o atmósfera iónica que se encuentra en las proximidades de un coloide cargado, y para explicar el funcionamiento de las fuerzas de repulsión eléctricas. El modelo de doble capa se entiende como una serie de etapas que tienen lugar en torno al coloide negativo; cuando los iones que se encuentran neutralizando las cargas, son separados espontáneamente. (La guía, 2011)

El sistema completo es eléctricamente neutro, por lo tanto, la carga superficial se balancea por un exceso de carga opuesta en la fase líquida. Debido a la atracción coulombiana los contraiones tienden a concentrarse junto a la superficie del sólido, mientras que los iones de carga similar se repelen.

Al desarrollarse la carga superficial, la superficie del sólido adquiere un potencial con respecto a la solución. La carga se compensa por una distribución de carga igual en la fase acuosa. Los iones determinantes de potencial son los que establecen la carga superficial, éstos incluyen: iones que componen el sólido, iones  $H^+$  y  $OH^-$  y los iones capaces de formar complejos con las especies superficiales. Los contraiones son aquellos que no tienen afinidad especial por la superficie y son adsorbidos por atracción electrostática. La figura 1.16 muestra el modelo de Stern de la doble capa eléctrica. (Bustamante Rúa & Gaviria Cartagena, 2008)

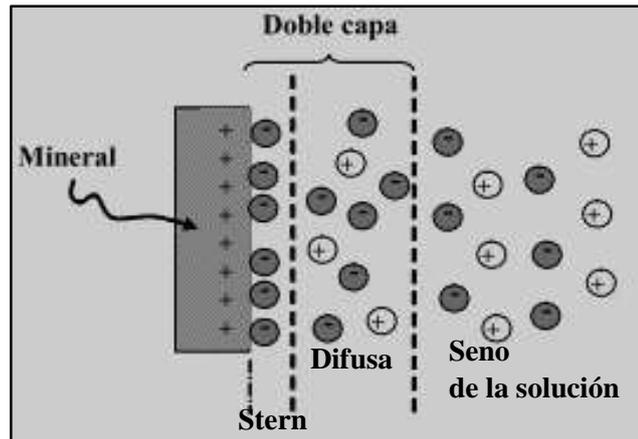


Figura 1. 16: Modelo de Stern – Doble Capa Eléctrica

Fuente: (Linares Gutiérrez, 2011)

#### 1.5.5.5 Potencial Zeta

Es una medida que indica el potencial necesario para poder penetrar la capa iónica que se encuentra alrededor de una partícula, con la finalidad de desestabilizarla. Así podemos decir, que el potencial zeta es considerado como potencia electrostática que hay entre las capas que se encuentran situadas en torno a la partícula. En el modelo de doble capa, se conoce como potencial zeta, al punto donde se unen las dos capas, la capa Difusa y la capa de Stern. Debido a que en dicho modelo no podemos medir la carga superficial, ni tampoco el potencial, entonces se utiliza la potencial zeta como medio útil y efectivo de medida para controlar al coloide, pues consigue indicar los posibles cambios que se producen en el potencial de la superficie, así como en las fuerzas de repulsión existente entre los coloides. En la figura 1. 17 se muestra este punto particular que es el potencial Z donde se unen la capa Difusa y la de Stern.

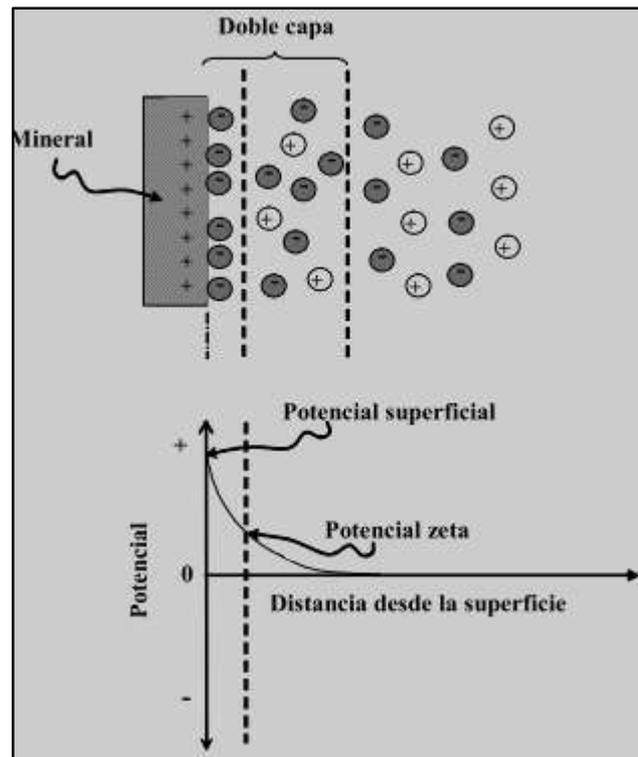


Figura 1. 17: Potencial Zeta

Fuente: (Linares Gutiérrez, 2011)

Existe una relación destacable entre el potencial zeta y el potencial de superficie, relación que depende de la cantidad de iones presentes en la solución. En el caso del agua, la doble capa provoca que el potencial zeta tenga una aproximación aceptable del potencial de superficie.

La capa de Stern, en el modelo de la doble capa, hace referencia a la atracción que sufre el coloide negativo de la solución, la cual inicialmente provoca que algunos iones positivos se dispongan conformando una capa rígida, la cual se sitúa rodeando la superficie del coloide y es conocida como Capa de Stern. (La guía, 2011)

Hay iones positivos que se encuentran atraídos por el coloide negativo, pero a su vez son rechazados por la capa de Stern, al mismo tiempo que otros iones con igual carga, intenta acercarse al coloide creando un equilibrio dinámico. Este equilibrio existe como resultado de la formación de una capa, conocida como Difusa, de

contraiones (iones que acompañan a los iones con la finalidad de mantener la neutralidad en sus cargas), los cuales tiene una presencia alta en la superficie, concentración que va disminuyendo a medida que se agranda la distancia, hasta conseguir de nuevo un equilibrio. (La guía, 2011)

## **1.6 Variables que intervienen en la Flotación**

En el proceso de flotación se toma en cuenta ciertos aspectos operacionales que son relevantes, ya que, si uno de ellos se modifica, puede cambiar el proceso completamente. Algunas de las variables de mayor importancia para el proceso de flotación se describen a continuación.

- Granulometría

El tamaño de las partículas tiene gran importancia ya que la flotación requiere que las especies minerales útiles tengan un grado de liberación adecuado para su concentración.

- Tipo de reactivo

Existen varios reactivos que se pueden utilizar para el proceso de flotación, por lo que se clasifican en colectores, espumantes y modificadores, cada uno de ellos con diferentes características y funciones. Entonces, dependen de la naturaleza del mineral a tratar y el mineral de interés que se requiere concentrar y recuperar. La eficiencia del proceso dependerá de la selección de la mejor fórmula de reactivos.

- Dosis de reactivo

La cantidad a utilizar de cada reactivo seleccionado depende del tonelaje con el que voy a trabajar y de las pruebas metalúrgicas que se pueden hacer preliminarmente; cada reactivo cuenta con una descripción de sus características dosificaciones de trabajo y en el medio en el que se debe desarrollar el proceso de flotación para que se pueda efectuar la flotación satisfactoriamente.

- Porcentaje de sólido

En general, si se va a trabajar a una escala de laboratorio, se puede utilizar la relación (20 - 30%) de sólido y el resto del líquido, tomando en cuenta en que celda se va realizar la flotación. Una manera de calcular este porcentaje es a través de la concentración de porcentaje peso/peso (P/P) o con la densidad del material. La concentración de las soluciones es la cantidad de soluto contenido en una cantidad determinada de solvente o solución; en este caso sería el peso del sólido la incógnita que corresponde al porcentaje de sólido utilizado en el proceso de flotación.

$$\% p/p = \frac{\text{peso del sólido}}{\text{peso del sólido} + \text{peso del fluido}(H_2O)} \quad (1.26)$$

De la ecuación de la concentración de porcentaje peso/peso se despeja como incógnita al peso del sólido requerido para mantener la condición establecida. Al obtener ya la cantidad de muestra requerida (300 g) se la vierte seguida del líquido, se enciende el equipo regulando la velocidad en un intervalo de 1000 rpm constantes y el agitador empieza a trabajar para mantener los sólidos en suspensión.

- Regulación de pH

Al ser un proceso físico-químico, la flotación es sumamente sensible al pH, especialmente cuando se trata de flotación selectiva. Cada fórmula de reactivos tiene un pH óptimo ambiente en el cual se obtendrá el mejor resultado operacional.

- Tiempo de Residencia o Flotación

El tiempo de residencia dependerá de la cinética de flotación de los minerales de la cinética de acción de reactivos, del volumen de las celdas, del porcentaje de sólidos de las pulpas en las celdas y de las cargas circundantes.

(Gonzalez Arias, 2016)

## 1.7 Cinética de Flotación

La cinética de flotación estudia la velocidad a la cual flotan las partículas; es decir, la variación del contenido de mineral de interés recuperado en el concentrado en función del tiempo. Existe una relación directa entre la velocidad de las partículas y la capacidad del sistema. Dos son los modelos más usados para ajuste de datos experimentales y cálculo de los parámetros cinéticos de flotación:

- Modelo de García-Zúñiga
- Modelo de Klimpel

(Bustamante Rúa M. O., 2017)

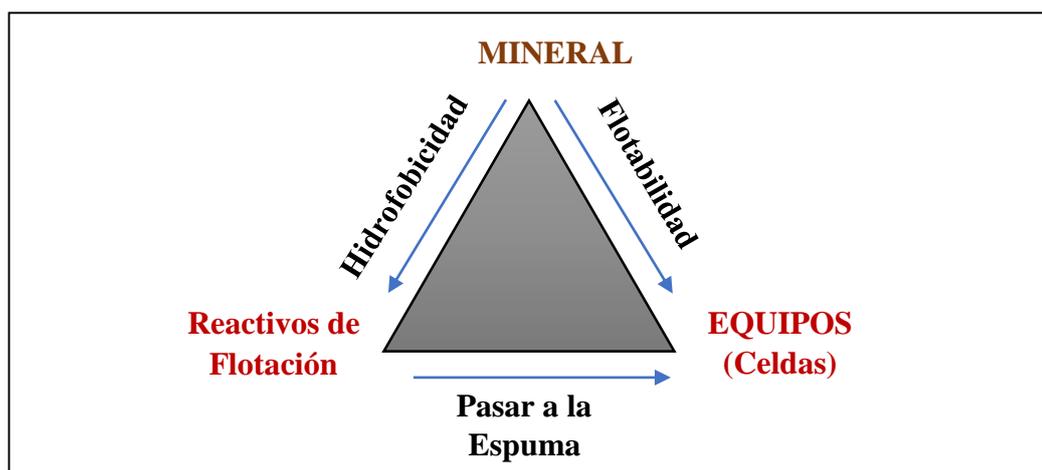


Figura 1. 18: Principio de Flotación

Fuente: (Bustamante Rúa M. O., 2017)

El sistema de flotación está formado por los tres componentes que se observan en la figura 1.18, cada uno cumple su función dentro del sistema y se fijan en los aspectos termodinámicos, pero cuando se habla de cinética o de la velocidad de flotación del mineral hidrófobo, realmente desde el punto de vista industrial sería una variable que determina capacidad, por lo tanto, se habla de Índice Metalúrgico de Recuperación.

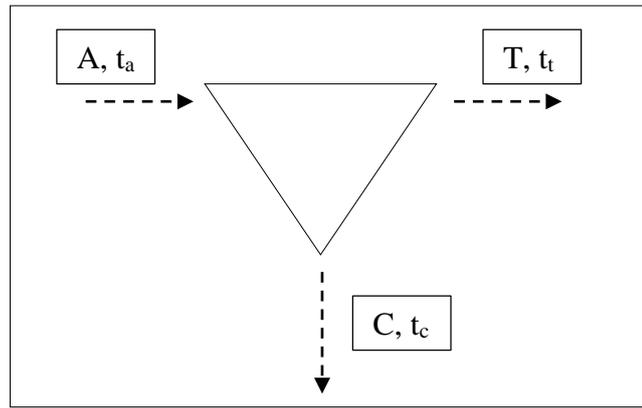


Figura 1. 19: Índice Metalúrgico de Recuperación

Fuente: (Bustamante Rúa M. O., 2017)

Dónde:

$t_a$  = tenor de alimento

$A$  = mineral de alimento

$t_t$  = tenor de las colas

$T$  = colas

$t_c$  = tenor de concentrado

$C$  = concentrado

Y de acuerdo a la figura anterior, la recuperación se expresa en la ecuación 1.10. En estado estacionario  $A$  y  $t_a$  son fijas en el tiempo  $t$ , pero  $C$  y  $t_c$  dependen del tiempo.

$$R = \frac{C \cdot t_c}{A \cdot t_a} \tag{1.10}$$

### 1.7.1 Modelo Cinético García – Zúñiga y Cálculo de Parámetros Cinéticos

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Velocidad} \\ \text{de} \\ \text{Flotación} \end{array} \right] = \frac{dR(t)}{dt} \quad R(t) = \frac{C(t) \cdot t_c(t)}{A \cdot t_a} \tag{1.27}$$

Dónde:

$t$  = tiempo

$R(t)$  = recuperación en función del tiempo

$C(t)$  = concentrado en función del tiempo

A = alimentación

$t_a$  = tenor de alimento

En la figura 1.20 se determinan tres partes importantes:

- La recuperación al inicio aumenta muy rápidamente (pendiente de la recta AB)
- Posteriormente baja su velocidad (pendiente de la recta CD)
- Finalmente alcanza un “plateau” cuando la recuperación se hace asíntota a un valor máximo (recuperación infinita) R.

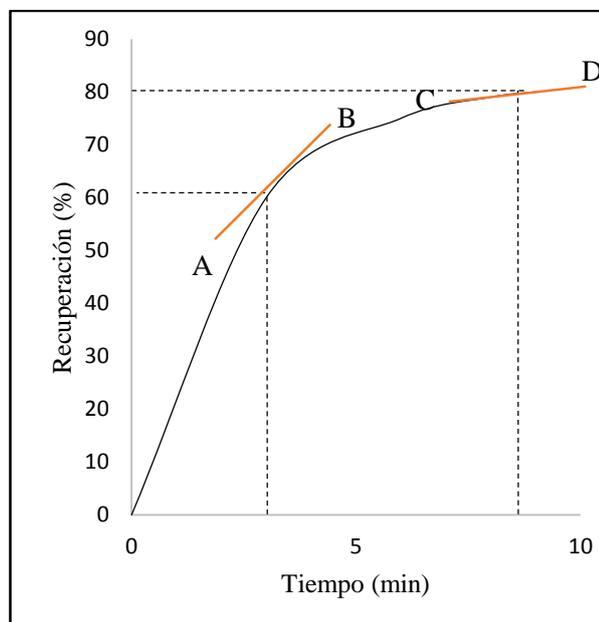


Figura 1. 20: Recuperación vs Tiempo

Fuente: (Bustamante Rúa M. O., 2017)

Se considera a la velocidad una variable dentro del sistema que determina:



En el caso de aumentar los Tiempos de Flotación, recupero mineral, pero al mismo tiempo la ganga también estaría flotando en este punto; es decir que en diferentes Tiempos de Flotación mi producto CONCENTRADO se puede contaminar. Ahora bien, en las celdas de flotación ocurre lo siguiente:

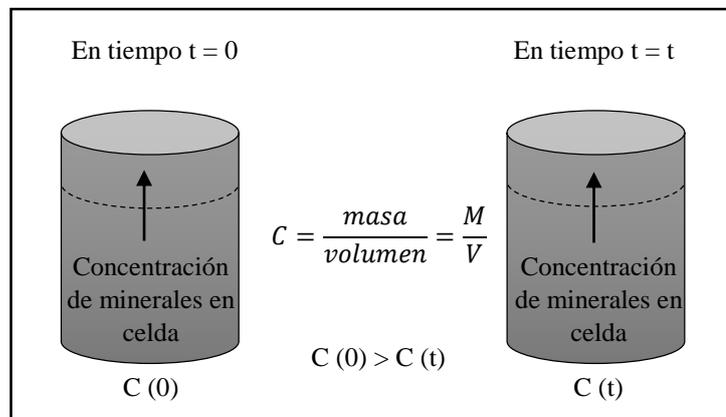


Figura 1. 21: Cinética de Flotación en las Celdas de Flotación

Fuente: (Bustamante Rúa M. O., 2017)

Dónde:

$C (t)$  = concentración de mineral útil en la celda en el tiempo  $(t)$

$C (0)$  = concentración de mineral útil en la celda en el tiempo  $(0)$

$t$  = tiempo

1.7.2 Potencial Químico y Constante Cinética de Flotación

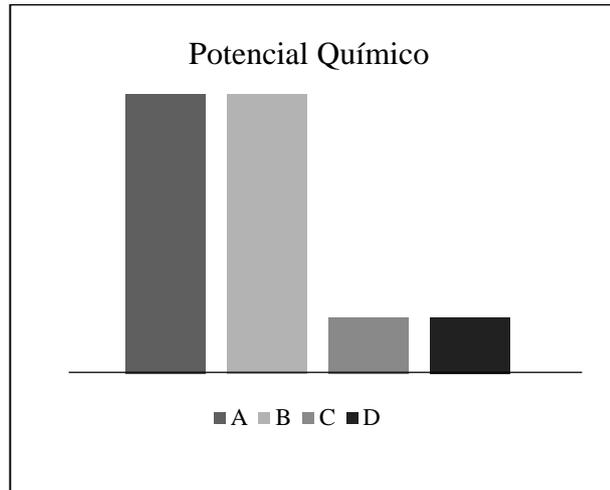


Figura 1. 22: Ejemplo de Potencial Químico

Fuente: (Bustamante Rúa M. O., 2017)

En este caso se representa el potencial químico en la figura 1.22 para entender el comportamiento de la velocidad. Esto es, si el edificio A es más alto desaparece más rápido; si tiende a 0 es más lenta (C); es decir:



$$\frac{-d[A]}{dt} \propto [A] \tag{1.30}$$

Por lo tanto, la velocidad de desaparición de:

$$\frac{-dC(t)}{dt} \propto [C(t)]^n \tag{1.31}$$

Si partimos de la ecuación 1.31 tenemos:

$$\frac{dC(t)}{dt} = k [C(t)]^n \tag{1.32}$$

Dónde:

$n$  = orden de flotación

$K$  = constante cinética de flotación

(Bustamante Rúa M. O., 2017)

Muchos sistemas metalúrgicos consideran a  $n = 1.0$ . Si la cinética de flotación es de orden 1 ( $n = 1.0$ ) tenemos:

$$\frac{dC(t)}{dt} = -k C(t) \quad (1.33)$$

Según Bustamante (2017) a raíz de esto, surgen las siguientes Condiciones de Contorno:

$$t = 0, \quad C(t) = C(0)$$

$$t = t, \quad C(t) = C(t)$$

$$\int_{C(0)}^{C(t)} \frac{dC(t)}{C(t)} = \int_{t=0}^{t=t} -k dt \quad (1.34)$$

$$[\ln C(t)]_{C(0)}^{C(t)} = [-kt]_0^t \quad (1.35)$$

$$\ln C(t) - \ln C(0) = -k(t - 0) \quad (1.36)$$

$$\ln \frac{C(t)}{C(0)} = -kt \quad (1.37)$$

Si se considera que:

$$a = \ln b \quad \rightarrow \quad e^a = b \quad (1.38)$$

$$\therefore \log e^a = \log b \quad (1.39)$$

$$a \log e = \log b \quad (1.40)$$

$$a = \frac{\log b}{\log e} \tag{1.41}$$

Reemplazando 1.38 en 1.41 se obtiene:

$$\log b = \frac{\log b}{\log e} \tag{1.42}$$

En plantas y el diseño de las mismas se trabaja en tiempos cortos para permanecer dentro del sistema. (Bustamante Rúa M. O., 2017)

$$\log \frac{C(t)}{C(0)} = \frac{\log \frac{C(t)}{C(0)}}{\log e} = -kt \tag{1.43}$$

$$\therefore \log \frac{C(t)}{C(0)} = -(k * \log e)t \tag{1.44}$$

$$y = mx + CTE \tag{1.45}$$

Dónde:

CTE = semi – log

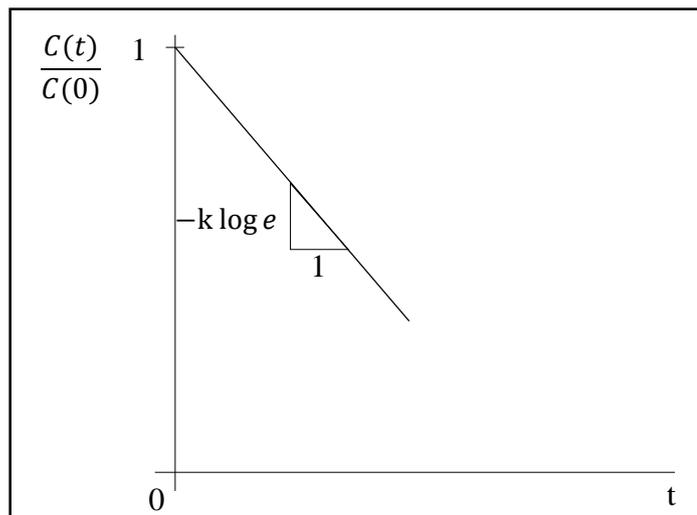


Figura 1. 23: Cálculo de la constante Cinética de Flotación

Fuente: (Bustamante Rúa M. O., 2017)

$$\ln \left[ \frac{C(t) - C_{\infty}}{C(0) - C_{\infty}} \right] = -(k \log e)t \tag{1.46}$$

$$\log e = \frac{1}{2.3} = \left( \frac{k}{2.3} \right) t \tag{1.47}$$

1.7.3 Ecuación Cinética García – Zúñiga

En la figura a continuación se describe la variación de la concentración del mineral de interés en un determinado tiempo (t); entonces se parte desde la velocidad de desaparición (1.48) y se desglosa cada término que interviene en la cinética de flotación.

$$\text{velocidad de desaparición} = -\frac{dC(t)}{dt} = k(C(t))^{1.0} \tag{1.48}$$

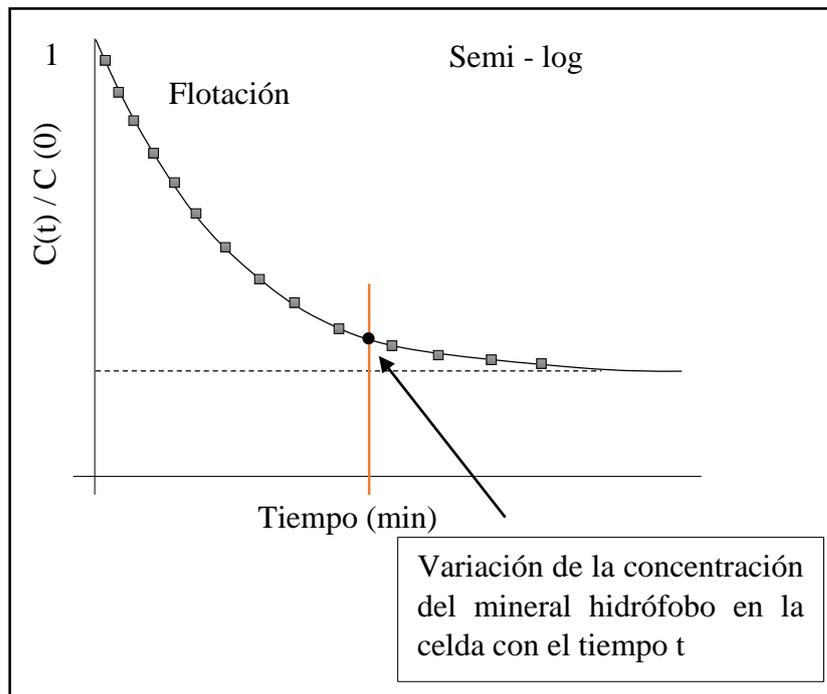


Figura 1. 24: Modelo para tiempo corto de flotación.

Fuente: (Bustamante Rúa M. O., 2017)

Se debe hacer una corrección para considerar la región lineal que se forma partir de este valor:

$$\log \left[ \frac{C(t)}{C(0)} \right] \rightarrow \ln \left[ \frac{C(t)-C_{\infty}}{C(0)-C_{\infty}} \right] \quad (1.49)$$

Por consecuencia, son modelos para tiempos cortos que dependen del material y donde la región es lineal. (Bustamante Rúa M. O., 2017)

Usando la definición de concentración  $C = M/V$

$$C(0) = \frac{\text{Masa de material flotable en el tiempo } t=0 \text{ en la celda}}{\text{Volumen de la celda}} = \frac{M(0)}{V} \quad (1.50)$$

$$C(\infty) = \frac{\text{Masa en } t \rightarrow \infty \text{ en la celda}}{\text{Volumen de la celda}} = \frac{M_{\infty}}{V} \quad (1.51)$$

Si se toma en cuenta la figura 1.21 la concentración en tiempo  $t = t$  y la ecuación 1.49 tendríamos de acuerdo a Bustamante (2017) lo siguiente:

$$\ln \left[ \frac{C(t)-C_{\infty}}{C(0)-C_{\infty}} \right] = -kt \quad (1.52)$$

Considerando las ecuaciones 1.50 y 1.51 tenemos:

$$C(t) = \frac{M(t)}{V} \quad C(0) = \frac{M(0)}{V} \quad C_{\infty} = \frac{M(t \rightarrow \infty)}{V} = \frac{M_{\infty}}{V} \quad (1.53)$$

Se puede reescribir como:

$$\ln \frac{\frac{M(t)}{V} - \frac{M_{\infty}}{V}}{\frac{M(0)}{V} - \frac{M_{\infty}}{V}} = -kt \quad k [=]_{\text{min}^{-1}} \quad (1.54)$$

$$\ln \frac{M(t)-M_{\infty}}{M(0)-M_{\infty}} = -kt \quad (1.55)$$

Dónde:

$$[ = ]_{\text{min}^{-1}} = \text{unidades específicas}$$

Considerando la recuperación R de mineral en la espuma:

$$R(t) = \frac{\text{Masa de mineral en espuma}}{\text{Masa de mineral de Alimento}} \quad (1.56)$$

$$R(t) = \frac{M(0)-M(t)}{M(0)} \quad (1.57)$$

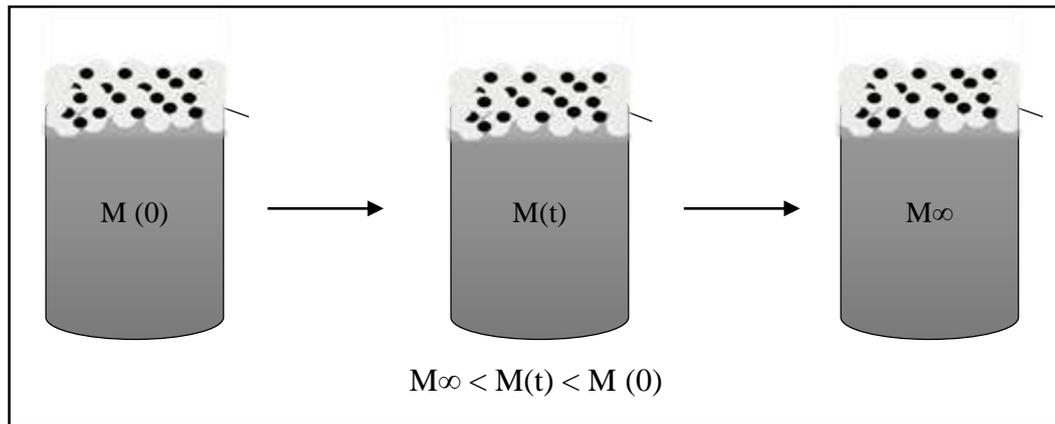


Figura 1. 25: Recuperación de mineral en la espuma

Fuente: (Bustamante Rúa M. O., 2017)

$$R(t \rightarrow \infty) = R_{\infty} = \frac{M(0)-M(\infty)}{M(0)} \quad (1.58)$$

A partir de la ecuación 1.55:

$$\ln \frac{M(t)-M_{\infty}+M(0)-M(0)}{M(0)-M_{\infty}} = kt \quad (1.59)$$

Reagrupando términos:

$$\ln \frac{[M(0)-M_{\infty}]-[M(0)-M(t)]}{M(0)-M_{\infty}} = -kt \quad (1.60)$$

Dividiendo para M (0):

$$\ln \frac{\left[\frac{M(0)-M_{\infty}}{M(0)}\right]-\left[\frac{M(0)-M(t)}{M(0)}\right]}{\left[\frac{M(0)-M_{\infty}}{M(0)}\right]} = -kt \quad (1.61)$$

$$\ln \frac{R_{\infty}-R(t)}{R_{\infty}} = -kt \quad (1.62)$$

$$\frac{R_{\infty}-R(t)}{R_{\infty}} = e^{-kt} \tag{1.63}$$

$$1 - \frac{R(t)}{R_{\infty}} = \exp(-kt) \tag{1.64}$$

Despejando R (t):

$$\frac{R(t)}{R_{\infty}} = 1 - \exp(-kt) \tag{1.65}$$

Finalmente, se obtiene la Ecuación cinética de García – Zúñiga

$$R(t) = R_{\infty} [ 1 - \exp(-kt) ]$$

(1.66)

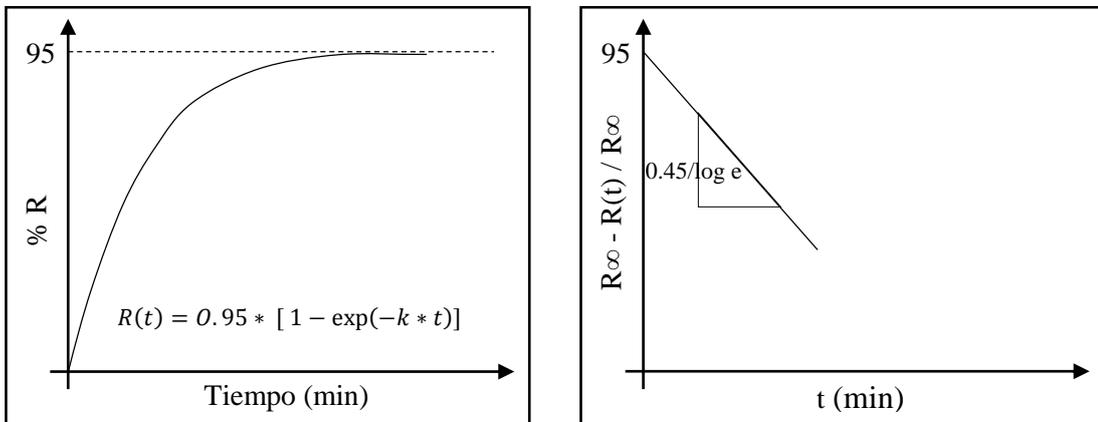


Figura 1. 26: Aplicación de ecuación García – Zúñiga

Fuente: (Bustamante Rúa M. O., 2017)

$$\left[ 1 - \frac{R(t)}{R_{\infty}} \right] = \exp(-kt) \qquad \ln \left[ 1 - \frac{R(t)}{R_{\infty}} \right] = -kt$$

$$\log \left[ 1 - \frac{R(t)}{R_{\infty}} \right] = - \frac{k}{2.3} t$$

$$y = mx + CTE$$

↓  
(- k / 2.3)

### 1.7.4 Tiempo óptimo de Flotación

Cuando se habla de Tiempo óptimo sería aquel tiempo en el que la separación entre Mineral Hidrófobo y Mineral Hidrofílico es máxima.

Criterio 1. Flotar hasta el punto donde la separación entre curvas sea máxima.

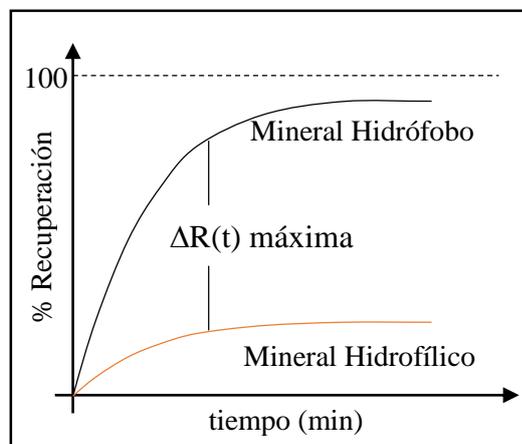


Figura 1. 27: Tiempo Óptimo de Flotación

Fuente: (Bustamante Rúa M. O., 2017)

Entonces se tiene:

$$d \frac{(\Delta R(t))}{dt} = 0 \tag{1.67}$$

$$\frac{d}{dt} [R_{hidrófobo} - R_{hidrofílico}] = 0 \quad (1.68)$$

Resolviendo el tiempo óptimo a escala laboratorio será:

$$t_{\text{ópt}} = \frac{1}{(k_{HFOBO} - R_{HFILO})} * \ln \left[ \frac{K_{HFOBO} * R_{HFOBO}^{\infty}}{K_{HFILO} * R_{HFILO}^{\infty}} \right] \quad (1.69)$$

Mientras que el tiempo óptimo a escala Industrial será:

$$t_{\text{ópt industrial}} \rightarrow 2.0 - 2.5 t_{\text{ópt laboratorio}} \quad (1.70)$$

## 1.8 Reactivos de Flotación

Para una flotación de minerales es importante utilizar los reactivos correctos para llegar a una recuperación de alta calidad, claro que no se puede llegar a obtener resultados del 100% pero si muy aproximados; existen diferentes tipos de reactivos, por ello se clasifican de acuerdo a su papel en la flotación: colectores, espumantes, activadores, depresores, reguladores del pH y los floculantes. (Novoa & Vargas, 2013)

### 1.8.1 Reactivos Colectores

Como la mayoría de minerales son Hidrofílicos es necesario transformar selectivamente su superficie en hidrofóbica; dicha transformación se alcanza regulando la química de la solución y agregando reactivos que se adsorban selectivamente conocidos como colectores. (Bustamante Rúa et al., 2008)

La adsorción de colectores sobre la superficie mineral depende de factores tales como: la carga superficial, la composición química superficial del mineral y los reactivos. Las principales fuerzas involucradas en la adsorción tienen que ver con: atracción electrostática, uniones covalentes, uniones por puente de hidrógeno y

uniones no polares entre el reactivo y el mineral, así como la atracción lateral entre las especies adsorbidas. (Bustamante Rúa et al., 2008)

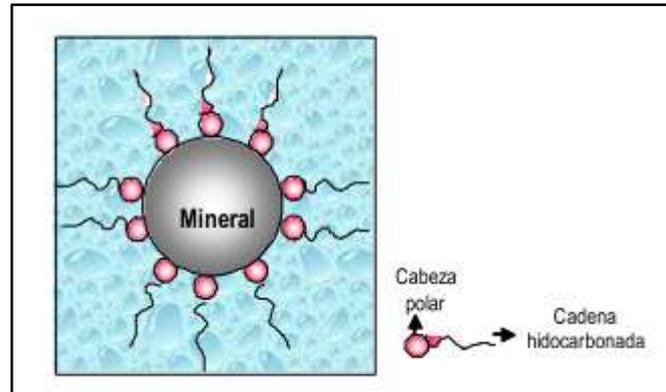


Figura 1. 28. Adsorción del colector sobre la superficie mineral en la interfase sólido-líquido

Fuente: (Bustamante Rúa et al., 2008)

Los colectores son reactivos que inducen o proporcionan hidrofobicidad selectivamente a las superficies de los minerales. Su función principal es la hidrofobización selectiva de la superficie de las partículas de ciertos minerales, para crear condiciones favorables de adherencia mineral-burbuja. Los colectores disminuyen la humectación de las partículas del mineral y aumentan su capacidad de adherencia a las burbujas.

Los iones colectores pueden adsorberse en la interfase mineral – solución de forma individual en concentraciones bajas o contrario a esto en concentraciones altas en hemimicelas. Es decir, cuando se logra una concentración de reactivo produciéndose la asociación de las cadenas de hidrocarbónes del colector (CMC – concentración micelar crítica); las micelas por hidrofobicidad salen de la pulpa tomando el nombre de hemimicelas al llegar a la superficie del mineral, donde los iones colectores son adsorbidos. (Bulatovic, 2014)

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

- Colectores iónicos que se disocian en iones.
- Colectores no iónicos que actúan en forma molecular.

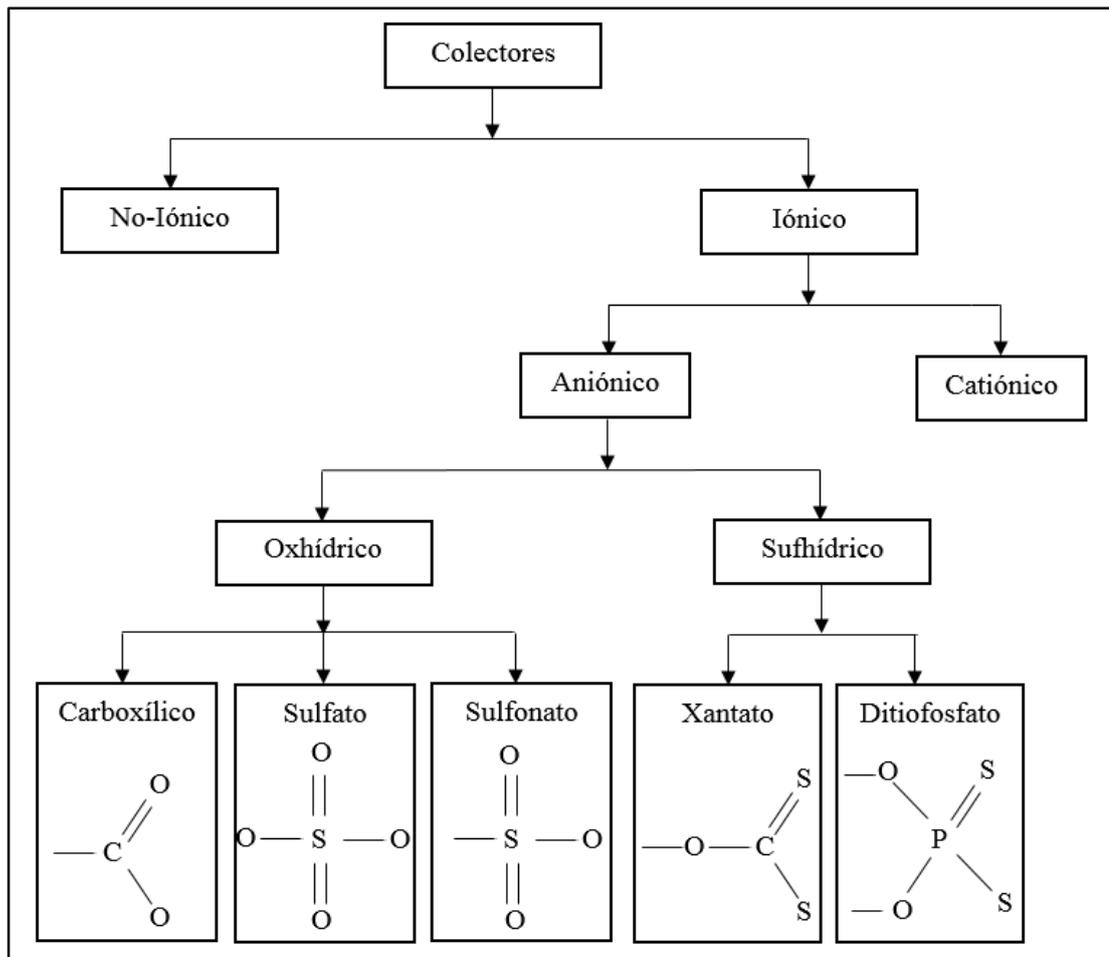


Figura 1. 29: Clasificación de los Colectores

Fuente: (Bulatovic, 2014)

### 1.8.1.1 Colectores Iónicos

Contienen un grupo funcional polar hidrofílico unido a una cadena de hidrocarburos. En la figura 1.21 se representa la clasificación de los colectores dividida en dos grupos importantes, siendo estos colectores aniónicos y catiónicos que se describen a continuación.

#### 1.8.1.1.1 Colectores Aniónicos

Estos constituyen la mayoría y se disocian de modo que sus radicales junto con el grupo polar constituyen un anión (-), dejando en la solución un catión que puede ser  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^+$  o el mismo hidrógeno. En este grupo tenemos a los colectores Sulfhídricos y colectores Oxhídricos.

## COLECTORES SULFHÍDRICOS

Los tiocolectores (tio = sulfuro) pertenecen al grupo de colectores aniónicos; entre los más destacados tenemos:

- Xantatos
- Ditiófosfatos

### Xantatos

Los Xantatos son sales del ácido Xantático, que se producen al reaccionar un alcohol con disulfuro de carbono. Son colectores sólidos usados en la flotación de minerales sulfurados y metálicos. Se encuentran compuestos por Bisulfuro de Carbono, la Sosa o Potasa Cáustica y un determinado Alcohol que le otorga las propiedades colectoras en el circuito de Flotación para los minerales metálicos y poli metálicos. (Novoa & Vargas, 2013)

Estos reactivos son ampliamente usados para todos los minerales sulfurados, con una tendencia fuerte a flotar sulfuros de hierro, si no se usa depresores y no son empleados en circuitos muy ácidos porque tienden a descomponerse. Dentro de sus características principales se encuentran las descritas a continuación (Tabla 1.4). (Renasa S. A., 2012)

Tabla 1. 4: Características de los Xantatos

Xantatos	
Solubilidad	Solubles en agua
Selectividad	Buena selectividad
Potencia Colectora	Fuertes propiedades colectoras
Uso	Reactivos fundamentalmente para flotación de sulfuros comunes (Cu, Zn, Pb, Fe, Co – Ni, etc.), para metales nativos (Cu, Ag, Au) y para minerales oxidados previamente sulfidizados.

	Se descomponen a pH bajos. Se usan en circuitos a pH alcalino o neutro.
Dosificación usual	10 – 100 g/T Alimentación en solución 10 – 20% en peso.
Características adicionales	Bajo costo, aprox. 1.1 – 1.2 \$/kg Son sólidos

Fuente: (Universidad de Chile, 2010)

Dentro de este grupo tenemos:

- Xantato Etilico de Potasio

Es el reactivo de mayor selectividad por su corta cadena carbonada. Generalmente es empleado en menas complejas de Ag/Pb o Zinc.

- Xantato Isopropílico de Sodio

Es un colector que se presenta en forma sólida como cilindros pequeños de color amarillento con un olor escaso. Es soluble en agua (450 g/l) a 25° C con un porcentaje de volatilidad del 14% y se considera un material estable. Este reactivo tiene selectividad fuerte, muy parecido al anterior por su cadena carbonada y es el más usado en Perú para el tratamiento polimetálico.

- Xantato Isobutílico de Sodio

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

- Xantato Sec-Butílico de Sodio

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

- Xantato Amílico de Potasio

Es un reactivo poderoso y el menos selectivo, usado generalmente en circuitos de acción rápida y sobre todo en el tratamiento de minerales de Zinc marmatíticos.

Es usado también en circuitos de flotación con una acidez moderada.

(Renasa S. A., 2012)

### Ditiofosfatos

Los colectores Ditiofosfatos son éteres secundarios del ácido ditiofosfórico y se preparan haciendo reaccionar pentasulfuro de fósforo y alcoholes. En la tabla 1.5 se especifican las principales características que poseen los Ditiofosfatos. (Novoa & Vargas, 2013)

Tabla 1. 5: Características de los Ditiofosfatos.

Ditiofosfatos	
Solubilidad	Líquidos diluidos (5 – 20%) o sin diluir dependiendo de cuál se trate (poco solubles).
Selectividad	Mayores selectivos que los Xantatos.
Potencia Colectora	Colectores de menor potencia que los Xantatos.
Uso	Flotación de sulfuros (Cu, Pb, Zn), algunos de ellos en la flotación de sulfuros de Fe, metales preciosos y óxidos no metálicos. Se recomienda agregar en la molienda o en el acondicionamiento.
Dosificación usual	25 – 100 g/T
Características adicionales	Algunos colectores poseen propiedades espumantes.

Fuente: (Universidad de Chile, 2010)

Los colectores AEROPHINE, AERO y AEROFLOAT (promotores) son Ditiofosfatos que se utilizan ampliamente para la flotación de minerales sulfurosos incluyendo cobre, oro, plomo, zinc, níquel, hierro y muchos otros que proporcionan un rendimiento mejorado y mayor selectividad que los colectores de sulfuro más tradicionales y mejor rendimiento metalúrgico en general. Generalmente su nombre cambia dependiendo el proveedor; algunos de estos colectores se describen a continuación.

- Aerophine 3418A

Aerophine es un colector de tipo colector sulfuro – tiocolelector, que se encuentra formado por un ácido + base  $\rightarrow$  Sal + H<sub>2</sub>O. Es una Sal de ditiofosfato en agua que está compuesta por Ditiofosfato diisobutil sódico (45 – 55 %) e Hidróxido de sodio en menores cantidades (0.5 -1.0 %). El promotor Aerophine 3418A del grupo promotor CYTEC es un colector desarrollado para la flotación de cobre y minerales de zinc activados. Tiene propiedades selectivas en minerales complejos, polimetálicos y sulfuros masivos; como también selectividad contra sulfuros de hierro, esfalerita no activada y elementos de penalización. Entre sus características se tiene:

- Bajo nivel de espuma, incluso en minerales que contienen minerales de arcilla
- Cinética de flotación rápida y recuperación estable de la ley del mineral
- Buena colección de partículas medianas gruesas
- Altamente estable y resistente a hidrólisis y oxidación
- Bajo impacto ambiental

Este colector usualmente flota selectivamente ciertos metales preciosos y básicos en presencia de hierro, arsénico y minerales de zinc no activados. Los circuitos de flotación que operan a pH neutro a ligeramente alcalino, se benefician de este colector a partir de la reducción de la dosis o la eliminación de cianuro de sodio para el rechazo de ciertos minerales de sulfuro de ganga, incluidos As, Sb, Bi y Fe. (CYTEC SOLVAY GROUP, 2002)

- AP 3477 (Aeropromotor)

Este colector corresponde al diisobutil ditiofosfato de sodio. Se presenta generalmente como un líquido (solución acuosa alcalina) con una gravedad específica de 1,10 y una densidad aparente de 11.6 g/ml. Es soluble en agua con un color amarillo pálido. Es un colector con una pureza de 50% de diisobutil ditiofosfato de sodio. El AP-3477 se utiliza como un colector fuerte de sulfuros de cobre, molibdeno, zinc, plomo y metales nativos, presentando buena selectividad frente a la pirita mejorando la espuma. Puede ser usado en un amplio rango de pH, especialmente en el rango alcalino. Las dosificaciones típicas varían en el rango de

10 a 100 gr/ton dependiendo del contenido de finos en la cabeza y del empleo de otros colectores en la fórmula colector. Presenta una buena dispersabilidad por cuanto puede ser agregado tanto en la molienda, en el acondicionador o directamente en las celdas, pudiendo ser agregado en la forma que se presenta o diluido en agua (5 - 20%). (Academia, 2017)

## COLECTORES OXHÍDRICOS

Son colectores del grupo Aniónico que comprenden a los colectores Carboxílicos, sulfatos y sulfonatos. (Universidad de Chile, 2010)

- Carboxílicos

Son ácidos grasos y jabones que tienen fuertes propiedades colectoras que son poco selectivos, por lo que impide una eficiente separación de los sulfuros de sus gangas. Generalmente son usados en la flotación de minerales oxidados, sales y no metálicos, especialmente en la flotación de minerales de manganeso y hierro, y de malaquita. Estos colectores tienen mayor consumo en comparación con los colectores sulfhídricos; es decir, los ácidos grasos en intervalos de 250 – 1000 g/t y los jabones de 100 – 1000 g/t.

- Sulfatos y Sulfonatos

Estos colectores se usan en la flotación selectiva de minerales que contienen calcio, al igual que para la flotación de sales solubles (Cloruros y Sulfatos). Pueden flotar Sulfuros, pero con menor eficiencia si se compara con los Xantatos y su consumo es mayor. Si se trata de flotar óxidos lo hacen, pero con un consumo muy elevado. Son usados en circuitos ácidos. (Universidad de Chile, 2010)

### 1.8.1.1.2 Colectores Catiónicos

Corresponden a las aminas y sales cuaternarias de amonio, derivados del amoníaco con hidrógenos reemplazados por radicales. Los radicales con el nitrógeno forman el catión (+) mientras el anión es un hidroxilo. Colectores de fácil adsorción y desorción, su selectividad es menor que los colectores aniónicos. Se emplean en la

flotación de talco, micas secundarias, sericita y caolinita, incluyendo micas primarias, zirconio, cuarzo, silicatos, aluminosilicatos, silita y óxidos, todos estos en menor proporción. Son poco selectivos y muy sensibles a las lamas ya que baja su recuperación, el aumento de temperatura en la pulpa favorece la recuperación y se puede usar en aguas duras. (Universidad de Chile, 2010)

#### 1.8.1.2 Colectores No Iónicos

Este grupo no posee grupos polares como los hidrocarburos saturados o no saturados, fuel oil, kerosén. Hacen al mineral repelente frente al agua al cubrir su superficie con una fina película. Al ser fuertemente hidrófobos son utilizados en la flotación de carbón, grafito, azufre y de molibdenita.

#### 1.8.2 Reactivos Modificadores

Un modificador es aquel reactivo cuya función es crear condiciones favorables en la superficie de los minerales, principalmente para el funcionamiento selectivo de los colectores.

Tabla 1. 6: Características de Reactivos Modificadores.

<b>Modificador</b>	<b>Forma de Adición</b>	<b>Aplicaciones Típicas</b>
<b>CaO</b>	Suspensión	Depresa Pirita y otros sulfuros de Fe
<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>		
<b>Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	Seca	Dispersa gangas en limos
<b>NaOH</b>	5 – 10 % S/n	
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	10 % S/n	

Fuente: (Bustamante Rúa M. O., 2017)

### 1.8.2.1 Activadores

Reactivos que aumentan la adsorción de los colectores sobre la superficie del mineral o a su vez para fortalecer el enlace entre la superficie y el colector. (Universidad de Chile, 2010)

Existen distintas maneras de activar una superficie, por ejemplo:

- Proceso secundario de oxidación para limpiar la superficie del mineral afectado agregando algún ácido para disolver capas oxidadas de los sulfuros.
- Formación de una capa que sea favorable para la adsorción del colector (Sulfidización NaSH).
- Reemplazo en la red cristalina a los iones metálicos por otros que formen un compuesto más firme con el colector (Activación de esfalerita).

### 1.8.2.2 Depresantes

Estos reactivos sirven para disminuir la flotabilidad de un mineral haciendo su superficie más hidrofílica o impidiendo la adsorción de colectores que puedan hidrofobizarla. Este efecto se puede lograr introduciendo en la pulpa un ion que compite con el ion del colector por la superficie del mineral. (Universidad de Chile, 2010)

- Sulfito de Sodio (NaSH)

Deprime a los sulfuros, se usa en la flotación selectiva de Cu – Mo (deprime sulfuros de Cu).

- Cianuro de Sodio (NaCN)

Puede deprimir blenda, pirita y calcopirita con dosificaciones de 50 – 500 g/t.

- Cal (CaO)

La cal viva deprime a la pirita, con dosificaciones que varían entre 1 – 3 kg/T. Este reactivo también actúa sobre el oro.

- Cromatos y bicromatos ( $K_2Cr_2O_7$ )

Solo deprime galena, no a los sulfuros de Cu ni blenda.

### 1.8.2.3 Reguladores de pH

El regulador de pH cumple la función de llevar la pulpa o solución a un valor de pH de trabajo entre 0 – 14, dependiendo del medio en que voy a trabajar, sea este ácido o básico. (Universidad de Chile, 2010)

- Cal (CaO)

El más utilizado para operar en medio alcalino es la cal, la que puede agregarse como cal viva o como cal apagada, y se prefiere la cal principalmente por su menor costo.

- Soda ash ( $Na_2CO_3$ ) y (NaOH)

En medio alcalino se agrega en seco y la soda cáustica como solución. En medio ácido se utiliza una solución de ácido sulfúrico.

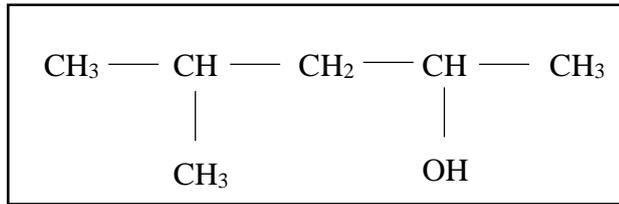
### 1.8.3 Espumantes

Son reactivos que modifican la tensión superficial de un mineral, cuya función es proveer estabilidad de las burbujas, evitar coalescencia reduciendo la Tensión Interfacial Líquido-Aire (L/A) y permitir el paso de partículas hidrófobas a la zona de espuma. Los ácidos, aminas y alcoholes son los espumantes más usados; pero se prefieren los alcoholes porque no tienen propiedades colectoras y así facilitan la flotación selectiva. (Linares Gutiérrez, 2011)

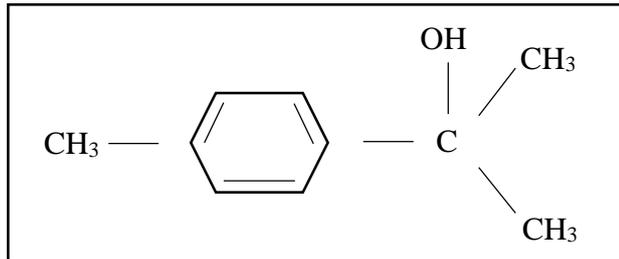
- MIBC (Metil Isobutil Carbinol)

Es un espumante que se utiliza en la flotación de minerales sulfurados de cobre y en la flotación de oro y plata. La espumación del MIBC es mayor que la de otros reactivos, permitiendo un excelente control del proceso de flotación al no poseer

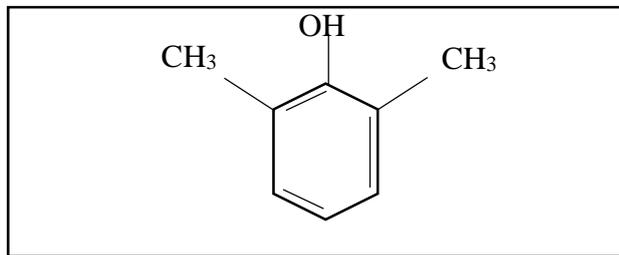
propiedades colectoras. Es el más utilizado en la industria y su bajo peso molecular lo hace muy volátil y tiende a evaporarse. (Linares Gutiérrez, 2011)



- Terpinol (Aceite de Pino)

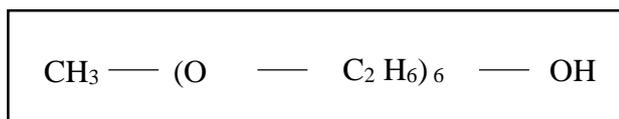
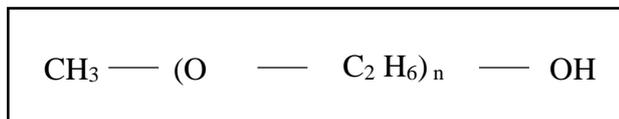


- Cresol (Ácido Cresílico)



- Éter Glicol Polipropinel

Éter poliglicólico que tienen mayor peso molecular que el MIBC, por tanto, es menos volátil y genera una espuma muy estable favoreciendo el arrastre del agua.



## 1.9 Equipos de Flotación de Minerales

### 1.9.1 Celda de Flotación Denver D12

La concentración de un mineral por flotación se puede realizar por medio de unidades que son continuas llamadas celdas, de las cuales existen varios modelos, cada una de ellas poseen elementos básicos, entre ellos tenemos:

- Vías de entrada y salida de pulpa
- Rebose de espuma o concentrado.
- Mecanismo para la dispersión del sólido para mantenerlo en suspensión.
- Mecanismo para la dispersión del flujo de aire en burbujas de tamaño adecuado.
- La celda tradicional es la mecánica constituida por un depósito en forma de paralelepípedo, de distintas capacidades.
- En la operación de una celda se pueden distinguir tres zonas típicas: una zona de alta turbulencia a nivel del mecanismo, de relativa calma, y una superior.

(Luna Méndez, 2016)

El proceso de flotación depende de los diferentes equipos o celdas de flotación que se utilicen, pero en general su fin es cumplir con las siguientes funciones. Entre ellas tenemos:

- Mantener los sólidos o partículas en suspensión, evitando que los sólidos se sedimenten en el fondo del recipiente ya sea por su densidad o tamaño.
- Formar y distribuir las burbujas de aire por toda la celda, a través de una boquilla por donde ingresa el aire para continuar con el proceso de flotación en su etapa final espumante.
- Permitir que las partículas minerales de interés tomen contacto y se adhieran a las burbujas de aire inyectadas para que puedan ser atrapadas.
- Permitir que las partículas que poseen minerales de interés puedan ser atrapadas por los diferentes reactivos como: colectores, agentes espumantes, depresores, etc.

- Generar espumas mineralizadas estables que sobrepasen la celda de concentración para obtener un concentrado de buena calidad.

(Luna Méndez, 2016)

La figura 1.30 es una Celda Denver D12, la descripción de sus componentes está a continuación, al igual que sus características y sus especificaciones técnicas en la tabla 1.7 y 1.8 respectivamente.

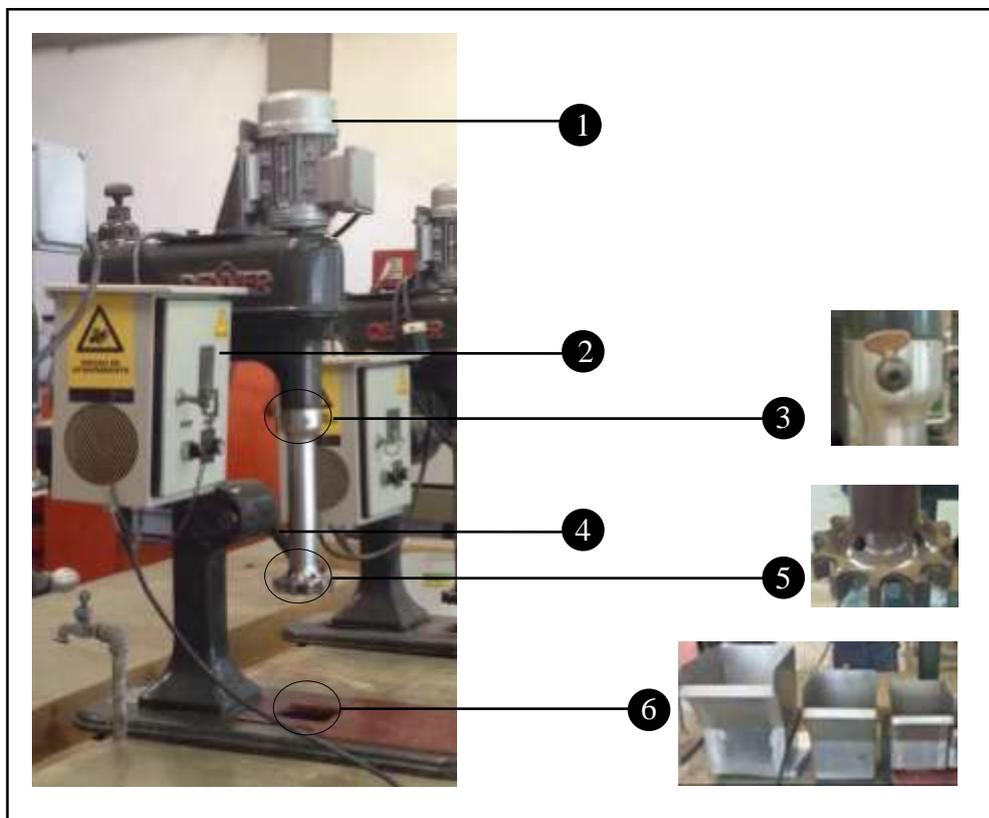


Figura 1. 30: Celda de Flotación Denver.

Dónde:

1. Motor
2. Control de velocidad del agitador (rpm)
3. Entrada de aire (tornillo de control de flujo)
4. Manija para nivelar la altura del agitador

5. Cámara de inyección de aire (aspas del agitador que mantienen las partículas en suspensión)
6. Soporte para ajustar la celda al agitador.

Tabla 1. 7: Dimensiones de Celda de Flotación Modelo Denver D12.

Dimensiones (m)			Peso (lb)
Largo	Ancho	Altura	
0.90	0.22	0.73	246

Fuente: (Luna Méndez, 2016)

Tabla 1. 8: Especificaciones técnicas de una celda de flotación.

MOTOR				
Voltaje	Hp	Hz	KW	Rpm
230/400	0.25	50	0.18	1350

Fuente: (Luna Méndez, 2016)

### 1.9.2 Medidor de ángulo de contacto OCA 15 PLUS

Es un sistema análisis de contorno y medición de ángulo de contacto sobre superficies. Con sistemas mecánicos de alta precisión, controladores electrónicos inteligentes y cámaras de video de alta resolución que garantizan una imagen precisa de una gota de líquido dispensada controlada a través del programa desde el computador.



Figura 1. 31: sistema de medición de ángulo de contacto y análisis de contorno Oca 15 plus

Fuente: (Dataphysics Instruments GmbH, 2017)

## CAPITULO 2

### TRATAMIENTO DEL MINERAL

El material con el que se trabajó proviene de una mina de cobre y oro, ubicada en el municipio de Carmen de Atrato en Choco, Colombia; es un mineral de sulfuro con un tamaño de grano relativamente grande para trabajar en laboratorio, por lo que se realizó un proceso previo de conminución que comprende trituración primaria para llegar a un tamaño adecuado para pulverización y finalmente pasar por molienda, y así llevarlo a tamaño de grano fino de 75 micras (malla 200).



Figura 2. 1: Muestra del sulfuro mineral.

Para el presente estudio se utilizó la metodología descrita a continuación:

#### 2.1 Caracterización del mineral

La muestra de mineral fue caracterizada a través de diferentes análisis en el laboratorio del I.M CIMEX de la Universidad Nacional de Colombia.

- El análisis granulométrico se realiza directamente reduciendo el tamaño de grano grueso a fino por medio de Conminución. La reducción del tamaño de

grano de la especie mineral en roca a tamaño de grano fino de 75  $\mu\text{m}$  (micras) que sea pasante malla 200 se obtuvo a través de un vibrador mecánico Ro – Tap y una serie de tamices ASTM (#50 - #200).

- Análisis Químico de una muestra representativa de la especie mineral mediante Espectrofotómetro de Adsorción Atómica para medir la cantidad de cobre y otros minerales en la solución.
- Caracterización físico-química de la superficie de la calcopirita con el fin de determinar la Hidrofobicidad selectiva del mineral a través de la medición de ángulo de contacto a cuatro muestras en roca representativas con diferentes colectores. La medida del ángulo de contacto se realizó en un equipo OCA 15 PLUS con el software SCA 20.
- Análisis Químico de una muestra representativa de la especie mineral para determinar el tenor de alimento o ley mediante Espectrofotómetro de Adsorción Atómica; de igual forma el tenor de concentrado de cada flotación para determinar la concentración de cobre presente.

#### 2.1.1 Selección de muestras de mineral en roca

Previo al proceso de conminución se seleccionan 4 muestras de mineral en roca representativas de tamaño relativamente grande (20 – 50 mm); a cada muestra que contiene mineral (calcopirita) se le obtiene una cara plana, tratando de obtener lo más pulida posible. Cada muestra contiene una parte de color amarillo metálico que indica la presencia de calcopirita.



Figura 2. 2: Pulido de Muestra # 2 – Calcopirita.

### 2.1.2 Reducción de tamaño

Para obtener una buena flotación es necesario trabajar con un material fino, ya que de acuerdo a la literatura la reducción de tamaño de grano grueso a finos es importante para que el proceso de adhesión pueda ocurrir, caso contrario el mineral no puede ascender hacia la superficie de la celda de flotación.

Por medio de Trituración Primaria, Pulverización y Molienda se redujo el tamaño de grano grueso de 6 kg de muestra mineral en roca a tamaño de grano fino de  $75\ \mu\text{m}$  (micras) que sea pasante malla 200 y se obtuvo la granulometría adecuada a través de un vibrador mecánico Ro – Tap y una serie de tamices ASTM (#50 - #200).



Figura 2. 3: Mineral fino posterior a Conminución

### 2.1.3 Análisis Químico para obtener Tenor de Alimento

Antes de realizar el proceso de flotaciones la especie mineral tiene una caracterización química para determinar el valor del tenor de alimento.

De la muestra total de finos se cuartea hasta obtener 10 gr de muestra representativa y así determinar la concentración de algunos minerales; esto se realizó en el laboratorio del IM. CIMEX de la Universidad Nacional de Colombia, con los siguientes valores indicados en la tabla 2.1 que muestra los resultados de análisis de 10 g.

Tabla 2. 1: Análisis Químico de 10 gr de Calcopirita.

<b>Mineral</b>	<b>ppm</b>	<b>%</b>	<b>Aforo (ml)</b>
Cu	944.35	8.38	250
Fe	3553.7	31.54	250
Zn	14.735	0.13	250

### 2.1.4 Medición del Ángulo de Contacto

Para el rendimiento eficaz de un proceso de flotación espumante es necesario la utilización de reactivos, como los colectores, que favorecen la adhesión de las partículas minerales a las burbujas de aire; es así que de acuerdo al análisis bibliográfico se seleccionan los reactivos colectores para crear el escenario físico-químico adecuado que presente recuperaciones altas de Cu en el producto de la flotación evitando desperdicio de mineral en las colas. Dentro del proceso de identificación de los escenarios físico-químicos ideales para la flotación se realizan mediciones del ángulo de contacto entre la superficie mineral y los diferentes reactivos colectores.



Figura 2. 4: Gota de reactivo sobre la superficie mineral

Como los estudios de hidrofobicidad preceden a los de flotabilidad se mide el ángulo de contacto de los colectores, aquí se incluye el parámetro de comparación como protocolo de flotación establecido, analizando los reactivos Aero 3477 – Aero 3418. En este punto se identifica como es el comportamiento del reactivo al contacto con el mineral y se observan las propiedades hidrófobas de naturaleza propia que posee la calcopirita. Adicionalmente, se seleccionan dos colectores Xantatos, se observa su comportamiento al contacto con el mineral y la diferencia que existe entre los reactivos incluyendo el comportamiento del agua.

## 2.2 Protocolo de Flotación

Desde el punto de vista termodinámico, en un escenario físico-químico las variaciones de pH y reactivos alternativos permiten la hidrofobicidad; el proceso de flotación requiere entonces de una secuencia ordenada; cabe mencionar que el patrón de comparación en la flotación es el proceso que se realiza en la mina de donde se obtuvo la mena de cobre. En este caso, se sigue un protocolo ya establecido descrito a continuación:

Tabla 2. 2: Protocolo de Flotación

PARÁMETRO	Intervalo	Valor establecido
Preparación de la suspensión	20 – 30 % sólido	<b>30 % sólido</b>
Introducción Control de pH (cal)	8.0 – 9.0	<b>9.0</b>
Colectores	80 – 100 g/ton	<b>80 g/ton (4 gotas)</b>
Tiempo de Acondicionamiento	10 – 15 min	<b>15 min</b>
Tiempo de Residencia	Corto – Largo	<b>Corto (2 min)</b> <b>Largo (10 min)</b>
Espumante (MIBC)	80 g/ton	<b>80g/ton (4 gotas)</b>

### 2.3 Pruebas Propuestas

Como el objetivo primordial de la flotación espumante es llegar a elevar el tenor de una especie mineral; se realizan flotaciones a escala laboratorio con una mena de cobre con sulfuros para estudiar el comportamiento de los reactivos colectores que aportan a la selectividad y analizar la hidrofobicidad natural de la calcopirita con una flotación selectiva dentro de un escenario físico-químico adecuado, desechando hacia las colas el material estéril y el resto de sulfuros del mineral de interés, obteniendo un concentrado mineralizado; variando pH en una solución acuosa al 30% de sólido con condiciones de trabajo establecidas para obtener concentrados de cobre de alta ley.

#### 2.3.1 Parámetros Experimentales

El reactivo colector es el parámetro que varía en el proceso dejando a los demás como constantes. Se destaca el tiempo de residencia ya que de acuerdo al protocolo establecido se determina 2 intervalos; un intervalo corto del orden de 2 minutos y un intervalo largo del orden de 10 minutos. Como comprobación se realiza una prueba duplicada de la flotación #1 obteniendo valores muy similares, manteniendo las mismas condiciones de trabajo. Cada prueba experimental sigue el protocolo inicial siguiendo el orden a continuación:

Tabla 2. 3: Diseño Experimental para las pruebas de flotación

FACTORES	NIVELES
Tipo de Reactivo	Aero 3477
	Aero 3418
	Aero 3477 – Aero 3418
	X. Isopropílico de Sodio
	X. Amílico de Potasio
Tiempo de Acondicionamiento	15 minutos
Tiempo de Residencia (Flotación)	2 min (intervalo corto)
	10 min (intervalo largo)

### 2.3.2 Hipótesis

Como el objetivo del proyecto es estudiar el comportamiento de los reactivos colectores, la eficiencia del proceso de recuperación y la hidrofobicidad natural de la calcopirita, se plantea la siguiente hipótesis tomando en cuenta los índices metalúrgicos que expresan la cantidad y calidad de recuperación en cada flotación. En la tabla 1.1 se describe cada índice metalúrgico que indica si el proceso de flotación es eficiente, tomando en cuenta valores de los tenores de cada concentrado. Se supone que el comportamiento de los colectores Xantatos frente a colectores Ditiofosfatos son superiores según lo estudiado, ya que son reactivos más selectivos y potentes si se los compara, donde se aprovecha la propiedad natural de hidrofobicidad de la calcopirita y además la eficiencia del proceso de recuperación será superior.

Tabla 2. 4: Variables

	Variable	Índice metalúrgico
Factor A	Ditiofosfatos	R – R <sub>E</sub> – I.S – RC – V – E
Factor B	Xantatos	

Siendo así, se plantean 2 hipótesis para cada factor analizado:

Hipótesis 1:

$$\text{Tenor (\%)}_{\text{factor A}} > \text{Tenor (\%)}_{\text{factor B}}$$

$$\text{Recuperación (R)}_{\text{factor A}} > \text{Recuperación (R)}_{\text{factor B}}$$

$$\text{Razón de enriquecim. (R}_E\text{)}_{\text{factor A}} > \text{Razón de enriquecim. (R}_E\text{)}_{\text{factor B}}$$

$$\text{RC}_{\text{factor A}} > \text{RC}_{\text{factor B}}$$

$$\text{Rendimiento (V)}_{\text{factor A}} > \text{Rendimiento (V)}_{\text{factor B}}$$

$$\text{Eficiencia de separac. (E)}_{\text{factor A}} > \text{Eficiencia de separac. (E)}_{\text{factor B}}$$

Hipótesis 2:

$$\text{Tenor (\%)}_{\text{factor A}} < \text{Tenor (\%)}_{\text{factor B}}$$

$$\text{Recuperación (R)}_{\text{factor A}} < \text{Recuperación (R)}_{\text{factor B}}$$

$$\text{Razón de enriquecim. (R}_E\text{)}_{\text{factor A}} < \text{Razón de enriquecim. (R}_E\text{)}_{\text{factor B}}$$

$$\text{RC}_{\text{factor A}} < \text{RC}_{\text{factor B}}$$

$$\text{Rendimiento (V)}_{\text{factor A}} < \text{Rendimiento (V)}_{\text{factor B}}$$

$$\text{Eficiencia de separac. (E)}_{\text{factor A}} < \text{Eficiencia de separac. (E)}_{\text{factor B}}$$

## 2.4 Proceso de Flotación espumante

La flotación espumante se describe en dos etapas importantes que muestran el comportamiento físico-químico de una especie mineral en un tiempo determinado, en el que la muestra se encuentra en suspensión estableciendo las condiciones de trabajo y posteriormente la flotación de la especie mineral obteniendo la espuma mineralizada en diferentes intervalos de tiempo.

#### 2.4.1 Preparación de la suspensión (pulpa)

La muestra debe tener un tamaño de grano fino de 75  $\mu\text{m}$  pasante malla #200 completamente seca y de acuerdo a lo estudiado, el porcentaje de sólidos con que se trabaja en flotación tiene un intervalo definido; en general, en escala laboratorio, se utiliza la relación (20 - 30%) de sólido y el resto es líquido, tomando en cuenta en que celda de flotación. En este caso, se prepara la pulpa en una celda de flotación de 1 litro, el porcentaje de sólidos se define con una dilución del 30% de muestra sólida y el 70% de líquido. Para saber cuánto mineral empleo, se puede calcular con la concentración de porcentaje peso/peso (P/P) o con la densidad del material. La concentración de las soluciones es la cantidad de soluto contenido en una cantidad determinada de solvente o solución. Si trabajo con la condición de 30 % de sólido, se toma como referencia los 1000 ml de la celda, donde el 70 % del fluido serían los 700 ml de agua medidos por medio de una probeta de 1000ml.

$$\% p/p = \frac{\text{peso del sólido}}{\text{peso del sólido} + \text{peso del fluido}(H_2O)} \quad (2.1)$$

$$\therefore \% \text{ en peso} = \frac{\text{peso del sólido}}{1000 \text{ g}} \rightarrow 0.3 = \frac{\text{peso del sólido}}{\text{peso del sólido} + 700 \text{ g}}$$

$$p. \text{sólido} = 0.3 * (p. \text{sólido} + 700 \text{ g})$$

$$p. \text{sólido} - 0.3 p. \text{sólido} = 210 \text{ g}$$

$$p. \text{sólido} = 300 \text{ g}$$

De la ecuación de la concentración de porcentaje peso/peso se despeja como incógnita al peso del sólido requerido para mantener la condición establecida. Al obtener ya la cantidad de muestra requerida (300 g) se la vierte seguida del líquido,

se enciende el equipo regulando la velocidad en un intervalo de 1000 rpm constantes y el agitador empieza a trabajar para mantener los sólidos en suspensión.

La densidad del material es importante, y se la calcula utilizando una probeta de 1000 ml; se toma una cantidad de muestra y se pesa, se agrega una cierta cantidad del líquido en la probeta y se observa el incremento al agregar la muestra.

La densidad de la mena de cobre es de 2.6 – 2.7 g/ml.



Figura 2. 5: Celda de Flotación de 1 litro – Porcentaje de Sólido (30%) y Líquido (70%) en suspensión.

#### 2.4.2 Control de pH

Se introduce el control pH, al inicio se determina el valor de pH natural y se adiciona una cantidad variable de cal necesaria para que la pulpa pueda llegar al pH deseado (alcalino 8 – 9), la cantidad de cal es mínima. Se mide el valor del pH con tiras de papel indicador directamente en la pulpa y se relaciona con el pH-metro (tabla posterior). Al alcanzar un valor alcalino, el tiempo de acondicionamiento determinado comienza.



Figura 2. 6: Control de pH de la pulpa.

#### 2.4.3 Tiempo de Acondicionamiento

Posteriormente, al alcanzar el valor de pH, existe un intervalo de acondicionamiento de 15 min en el que se procede a adicionar los reactivos colectores y espumante MIBC en intervalos de 5 minutos para que puedan actuar en las partículas minerales.

#### 2.4.4 Dosificación de reactivos

Regulador de pH: La cal se la agrega en mínimas cantidades hasta alcanzar las condiciones de trabajo con valores de pH alcalino (8 – 9) durante la etapa inicial de preparación de la pulpa.

Colectores: se adiciona a la solución entre 80 – 100 g/ton, como se trabaja con reactivos en líquido, se pesa cada gota en una balanza analítica, este valor es equivalente entre 2 – 4 gotas. Se adiciona el colector transcurrido el tiempo determinado desde que el valor de pH alcanzado sea 9.

Espumante: se adicionan 80 gr/ton de MIBC; del mismo modo se trabaja con espumante liquido adicionando entre 2 – 4 gotas. Al tiempo establecido se adiciona el espumante.



Figura 2. 7: Adición de reactivos a la pulpa

#### 2.4.5 Concentrados y colas

El tiempo de flotación o residencia se establece en intervalos muy pequeños del orden de 2 minutos hasta intervalos largos del orden de 10 minutos. En el intervalo de 2 min se recoge concentrados a los 15 segundos, 30 segundos, 1 minuto y a los 2 minutos en bandejas separadas, terminando con una bandeja de colas al final de la flotación. Al igual que en el intervalo corto, se toma los concentrados en distintos tiempos, a los 2 minutos, 5 minutos, 10 minutos y finalmente las colas, cumpliendo con el intervalo largo.

#### 2.4.6 Análisis Químico del Laboratorio

Luego de obtener el material flotado previamente secado tanto del concentrado como de las colas, se pesa cada uno para determinar si la cantidad de pérdidas en el proceso no supere el 5% de los 300 g de alimento.

El peso de las pérdidas es igual a la diferencia entre el peso de alimento y el peso total posterior a la flotación que incluye los concentrados y colas.

$$\% \text{ pérdida} = \frac{\text{peso de alimento}}{\text{peso de pérdidas}} * 100 \%$$



Figura 2. 8: Etiquetado y pesado de concentrados

Cada concentrado y colas de las diferentes flotaciones debe pasar -200 mallas y obtener a través de cuarteo 10 g de muestra representativa, cada muestra debe estar respectivamente etiquetada por flotación e intervalo para evitar confusiones.



Figura 2. 9: 10 g de muestra de los concentrados y colas de una flotación.

Entonces de cada flotación se obtienen los datos de la tabla 2.7; en el análisis químico del laboratorio se obtiene la tabla 2.8.

Tabla 2. 5: Peso de concentrado de t (intervalo 0 - 2 min) flotación con colector Aero 3418

FLOTACION 3 Aero 3418	<b>Peso Concentrado</b>	<b>g</b>	<b>%</b>
	2 min	30.00	0.10
	5 min	33.68	0.11
	10 min	17.00	0.06
	COLAS	212.5	0.72
	TOTAL	293.20	1.00

Tabla 2. 6: Lectura de análisis químico de laboratorio de Concentrado de t (intervalo 0 - 2 min) flotación con colector Aero 3418

<b>Tenores Concentrado</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>ppm (mg/l)</b>	<b>Aforo (ml)</b>	<b>% Cu</b>	<b>% Cu Real</b>
2 min	1.00640	796.250	250	19.780	19.780
5 min	1.08006	638.900	250	14.789	17.196
10 min	1.05251	300.921	250	7.148	13.827
COLAS	1.07496	200.627	250	4.666	-

Para obtener el % de Cu en cada concentrado se transforma los datos de ppm del laboratorio a valores de porcentaje (tenor) partiendo desde gramos de Cu, finalmente para cada intervalo de flotación se expresa su recuperación por medio de la ecuación 2.4; cada valor obtenido se representa en una gráfica de acuerdo a los tiempos de flotación correspondientes y se observa su comportamiento a través del proceso.

$$\text{tenor Cu en corriente} = \text{ppm} * \text{aforo} \rightarrow \text{g Cu}$$

$$\therefore \text{ten}/_{t=x} = \frac{\text{g Cu}}{\text{peso del concentrado}} * 100\% \tag{2.2}$$

$$\therefore \text{Peso de Cu en corriente} = \text{peso concentrado} * \frac{g \text{ Cu}}{\text{peso del concentrado}} \quad (2.3)$$

$$R(t=x) = \frac{\text{peso de Cu en corriente}}{\text{peso de alimento} * \left(\frac{ten/t=x}{100}\right)} * 100\% \quad (2.4)$$

## 2.5 Proceso Experimental

Las pruebas de flotación se llevaron a cabo en celdas Denver de capacidad de 1 litro en el laboratorio del IM. CIMEX de la Universidad Nacional de Colombia; se tuvo en cuenta los siguientes parámetros:

Tabla 2. 7: Parámetros que influyen en las flotaciones

Volumen de la pulpa	1 litro
% de sólidos	30 %
pH de la pulpa	9
Velocidad de agitación (cte.)	1000 – 1200 rpm
Tiempo de Acondicionamiento	15 min
Tiempo de Flotación	2 min
	10 min

Después de la preparación de la pulpa y las condiciones de trabajo con pH de 9 se mantiene la pulpa en suspensión con una agitación de 1000 rpm. Se acondiciona por 5 min y se agrega el colector seleccionado y se deja acondicionar por 5 min con la misma agitación. Transcurrido este tiempo se adiciona el espumante MIBC (el mismo para todas las flotaciones) y a los posteriores 5 min de actuar el reactivo, se abre la entrada de aire para iniciar la flotación.

Existen dos tiempos de flotación, cada uno dividido en intervalos. En el intervalo corto se recoge la espuma a los 15 segundos transcurridos, 30 segundos, 1 min y 2

min en bandejas separadas y respectivamente etiquetadas, incluyendo una bandeja para las colas. En el caso del intervalo largo se sigue el mismo procedimiento, solo que en esta ocasión la espuma es recogida a los 2 min, 5 min, 10 min y las colas.



Figura 2. 10: Concentrados y Colas de Flotación

## CAPÍTULO 3

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se muestran e interpretan los resultados obtenidos durante el desarrollo experimental de la caracterización de la especie mineral y los resultados de las diferentes pruebas de flotación.

#### 3.1 Caracterización Mineral

##### 3.1.1 Análisis Químico

Dentro de la caracterización de la especie mineral partiendo con una granulometría de finos (-200 mallas) en su totalidad, se realiza un análisis químico de 10 g de muestra en la que se evidencia la presencia de cobre y de otros minerales en valores de ppm, obteniendo un tenor de alimento del 8.38 % presente. Con este valor se trabaja posteriormente en un balance de masas que involucra los índices metalúrgicos descritos anteriormente para determinar la eficiencia del proceso de flotación.

Tabla 3. 1: Lectura de análisis químico de 10 g de muestra de calcopirita (Tenor de Alimento)

Tenor de Alimento	(ta)
%	8,38
g	10

##### 3.1.2 Medición de ángulo de contacto sobre la superficie de calcopirita

Previo a las pruebas de flotación se realizaron mediciones del ángulo de contacto con la superficie de calcopirita con diferentes colectores con un tiempo de acondicionamiento de 30 segundos.

Estas mediciones se realizaron en el laboratorio del IM. CIMEX en el equipo OCA 15 PLUS. Los resultados obtenidos permiten identificar el comportamiento del reactivo y determinar cuál induce mayor hidrofobicidad a las partículas de calcopirita. Se trabaja con cuatro muestras de mineral y con los diferentes colectores incluyendo agua, cuyas mediciones se las realiza a los 30 segundos de haber caído la gota y tener contacto con la superficie mineral (método de la gota en reposo).

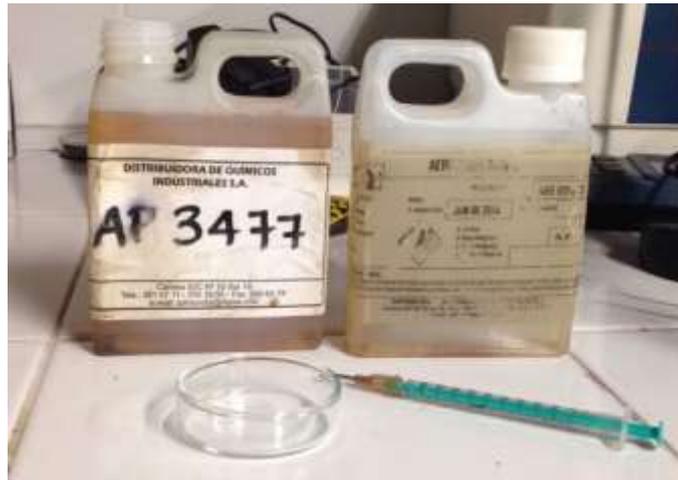


Figura 3. 1: Reactivos e instrumentos utilizados para medición

La tabla 3.2 indica los valores obtenidos con cada reactivo y con agua; se realizó un duplicado de cada medición como verificación de datos obtenidos bajo las mismas condiciones de trabajo.

La gota de agua al entrar en contacto con el mineral en cada medición indica la hidrofobicidad natural de la calcopirita, ya que hace a la gota repeler la superficie mineral, obteniendo valores de ángulo de contacto en un intervalo comprendido entre  $68^\circ$  y  $74^\circ$ , que serían valores tendientes a  $90^\circ$  indicando hidrofobicidad positiva. Según la literatura nos dice que los colectores inducen hidrofobicidad a las partículas minerales, por lo tanto, se entiende que éstos deben ser Hidrofílicos para que se puedan adherir a la superficie hidrófoba en el caso de la calcopirita probando su propiedad natural.

Tabla 3. 2: Valores del ángulo de contacto con la superficie del mineral

Muestra	Colector				
	H <sub>2</sub> O	Aero 3418A	Aero 3477	X. Isopropílico de Na	X. Amílico de K
1	69.65°	22.90°	18.80°	71.15°	76.45°
2	69.20°	25.35°	18.20°	74.15°	79.00°
3	73.40°	26.6°	18.65°	78.5°	73.30°
4	68.05°	26.95°	18.90°	80.9°	76.20°

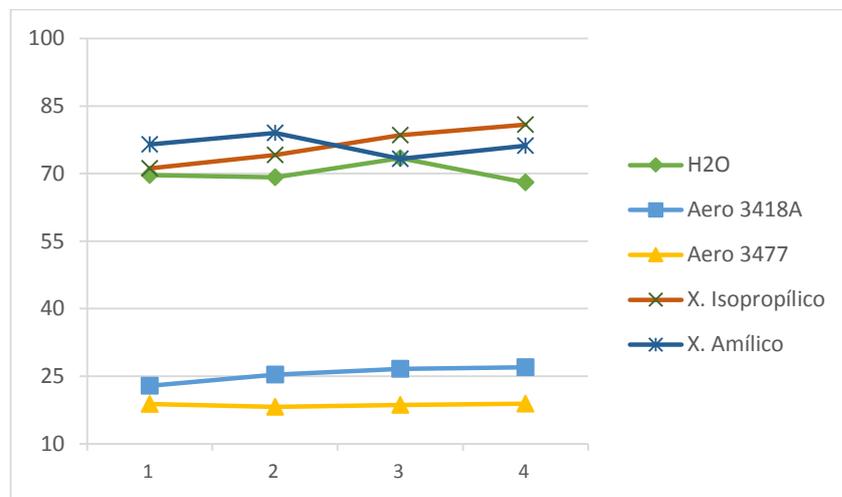
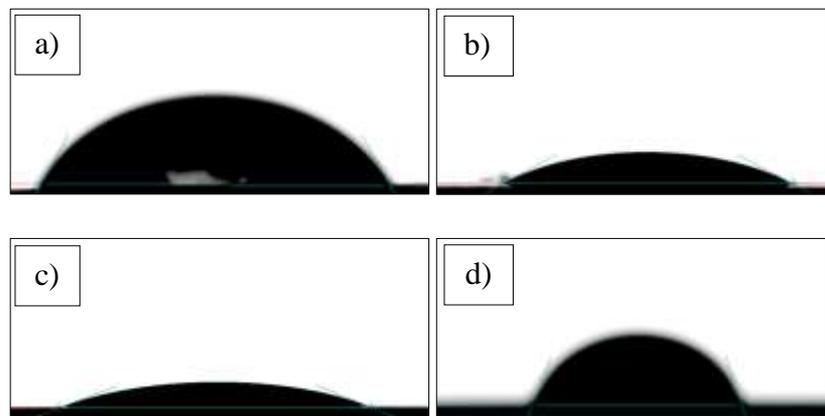


Figura 3. 2: Valores del ángulo de contacto para la superficie de calcopirita con diferentes colectores

En las siguientes figuras se aprecia la gota de agua y de los reactivos Ditiofosfatos y Xantatos, siendo así el de mejor comportamiento el colector Xantato Amílico de Potasio en las mediciones de ángulo de contacto.



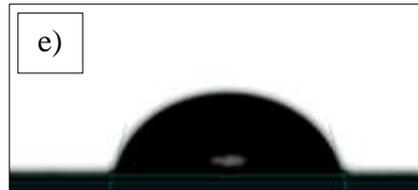


Figura 3. 3: Ángulo de Contacto a) Agua, b) Colector Aero 3414A, c) Colector Aero 3477, d) Colector X. Isopropílico, e) X. Amfílico

El factor A que serían los Ditiósfatos (Aero 3418A – Aero 3477) toman valores dentro del rango comprendido entre  $22^\circ - 27^\circ$  y  $18^\circ - 19^\circ$ , respectivamente. Lo que indica que los colectores son Hidrofílicos y se adhieren con mayor facilidad a la superficie mineral.

En el caso del factor B, los Xantatos analizados toman valores muy altos reflejando el comportamiento del reactivo sobre la superficie de la calcopirita aportando hidrofobicidad con valores que tienden a  $90^\circ$ . Los resultados de las mediciones de ángulo de contacto muestran que el reactivo X. Amfílico de Potasio tiene un mejor comportamiento, ya que el mayor valor obtenido indica que es el colector que induce mayor hidrofobicidad selectiva a la superficie del cobre. El X. Isopropílico de Sodio también presenta buenos resultados con valores cercanos a los del Amfílico.

Adicional a las muestras de calcopirita, se tomó una muestra de ganga a la que se puso en contacto con una gota de agua y se observa en la figura 3.3 que se adhiere con mayor facilidad a la superficie analizada, por lo tanto, la influencia de una propiedad natural de hidrofobicidad es apreciable e indispensable aprovechar en un proceso de flotación.

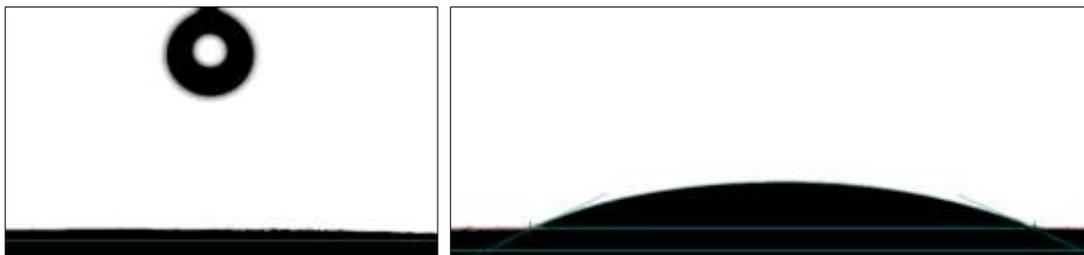


Figura 3. 4: Gota de agua sobre la superficie de una muestra de ganga

### 3.2 Pruebas de flotación

Los resultados de estas pruebas permiten establecer el comportamiento en flotación selectiva de cobre de cada uno de los reactivos colectores seleccionados con base en la literatura analizada. Manteniendo las condiciones de flotación antes mencionadas se obtiene los siguientes resultados.

En la tabla 3.3 se presenta los valores de concentrado con cada colector y con tiempos de flotación diferentes que muestran cómo se concentra más mineral al principio de cada prueba; es decir, al inicio del proceso se produce un comportamiento de concentración espontáneo y mayor que disminuye conforme para el tiempo.

Tabla 3. 3: Resultados Pruebas de flotación con diferentes colectores

Colector	Espumante	Tiempo de flotación (min)	pH	% Cu real (Tenor)
Aero 3418A	MIBC	2	9	19,780
Aero 3418A	MIBC	5	9	17,196
Aero 3418A	MIBC	10	9	13,827
Aero 3477	MIBC	2	9	18,114
Aero 3477	MIBC	5	9	16,562
Aero 3477	MIBC	10	9	13,835
Aero 3418A - 3477	MIBC	2	9	18,490
Aero 3418A - 3477	MIBC	5	9	16,016
Aero 3418A - 3477	MIBC	10	9	13,344
X. Isopropílico de Na	MIBC	0,25	9	18,818
X. Isopropílico de Na	MIBC	0,5	9	18,169
X. Isopropílico de Na	MIBC	1	9	17,490
X. Isopropílico de Na	MIBC	2	9	17,253
X. Isopropílico de Na	MIBC	5	9	16,580
X. Isopropílico de Na	MIBC	10	9	14,428

X. Amílico de k	MIBC	0,25	9	17,138
X. Amílico de k	MIBC	0,5	9	16,967
X. Amílico de k	MIBC	1	9	16,018
X. Amílico de k	MIBC	2	9	15,393
X. Amílico de k	MIBC	5	9	14,450
X. Amílico de k	MIBC	10	9	12,641

Los valores del tenor real en cada concentrado reflejan que el mejor resultado obtenido es con el colector Aero 3418A a los 2 min de flotación con pH = 9 con 19.78% de Cu presente. Adicionalmente el colector X. Isopropílico de sodio consigue un valor de 18.818% Cu en un concentrado obtenido a los 15 segundos de flotación.

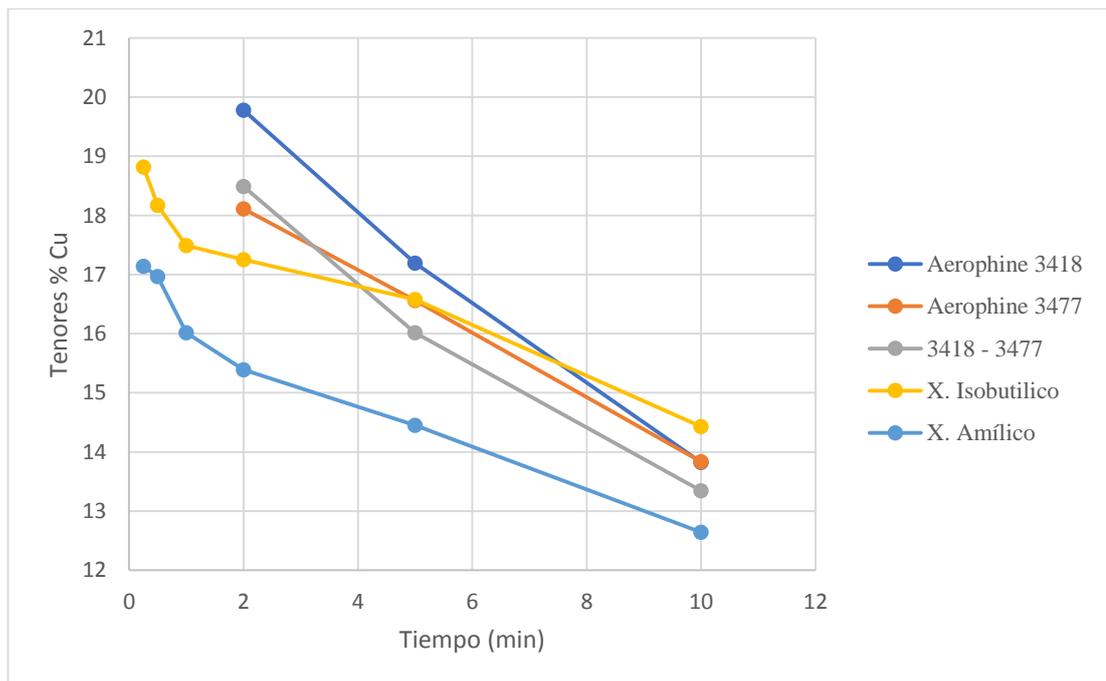


Figura 3. 5: Tenores de concentrados de Cu a diferentes intervalos de tiempo

Inicialmente se propuso realizar flotaciones con 15 min de residencia o flotación con un acondicionamiento de 15 min a pH = 9 variando solo los reactivos colectores, pero se disminuyó el tiempo de flotación a 10 minutos.

Tabla 3. 4: Intervalos de tiempo y concentraciones de Cu de primeras pruebas

Intervalo	Colector	Espumante	Tiempo de flotación (min)	pH	% Cu real (Tenor)
Corto	Aero 3418A	MIBC	0.25	9	22,010
	Aero 3418A	MIBC	0.50	9	20,434
	Aero 3418A	MIBC	1	9	17,878
	Aero 3418A	MIBC	2	9	15,503
Corto	Aero 3477	MIBC	0.25	9	24,610
	Aero 3477	MIBC	0.50	9	22,427
	Aero 3477	MIBC	1	9	21,024
	Aero 3477	MIBC	2	9	19,564
Largo	Aero 3418A	MIBC	2	9	19,780
	Aero 3418A	MIBC	5	9	17,196
	Aero 3418A	MIBC	10	9	13,827
Largo	Aero 3477	MIBC	2	9	18,114
	Aero 3477	MIBC	5	9	16,562
	Aero 3477	MIBC	10	9	13,835

Como el objetivo es analizar el rendimiento del proceso de flotación se realiza los balances de masa para obtener la recuperación en cada flotación realizada a diferentes intervalos de tiempo para analizar si se sigue manteniendo el mismo resultado con los colectores, especialmente con los que se obtuvo los mejores tenores.

Según la literatura cada índice metalúrgico se va analizando para determinar cómo fue el proceso de flotación y el comportamiento de cada reactivo en todas las pruebas. De esto se obtienen los valores a continuación.

Tabla 3. 5: Resultados de Recuperación de cada prueba de flotación con diferentes tiempos de flotación

Colector	Espumante	Tiempo de flotación (min)	pH	% R
Aero 3418A	MIBC	2	9	58.004
Aero 3418A	MIBC	5	9	60.825
Aero 3418A	MIBC	10	9	66.895
Aero 3477	MIBC	2	9	72.181
Aero 3477	MIBC	5	9	73.838
Aero 3477	MIBC	10	9	77.956
Aero 3418A - 3477	MIBC	2	9	54.554
Aero 3418A - 3477	MIBC	5	9	57.923
Aero 3418A - 3477	MIBC	10	9	63.826
X. Isopropílico de Na	MIBC	0,25	9	84.727
X. Isopropílico de Na	MIBC	0,5	9	85.099
X. Isopropílico de Na	MIBC	1	9	85.523
X. Isopropílico de Na	MIBC	2	9	85.680
X. Isopropílico de Na	MIBC	5	9	86.153
X. Isopropílico de Na	MIBC	10	9	88.010
X. Amílico de k	MIBC	0,25	9	93.308
X. Amílico de k	MIBC	0,5	9	93.369
X. Amílico de k	MIBC	1	9	93.728
X. Amílico de k	MIBC	2	9	93.991
X. Amílico de k	MIBC	5	9	94.433
X. Amílico de k	MIBC	10	9	95.483

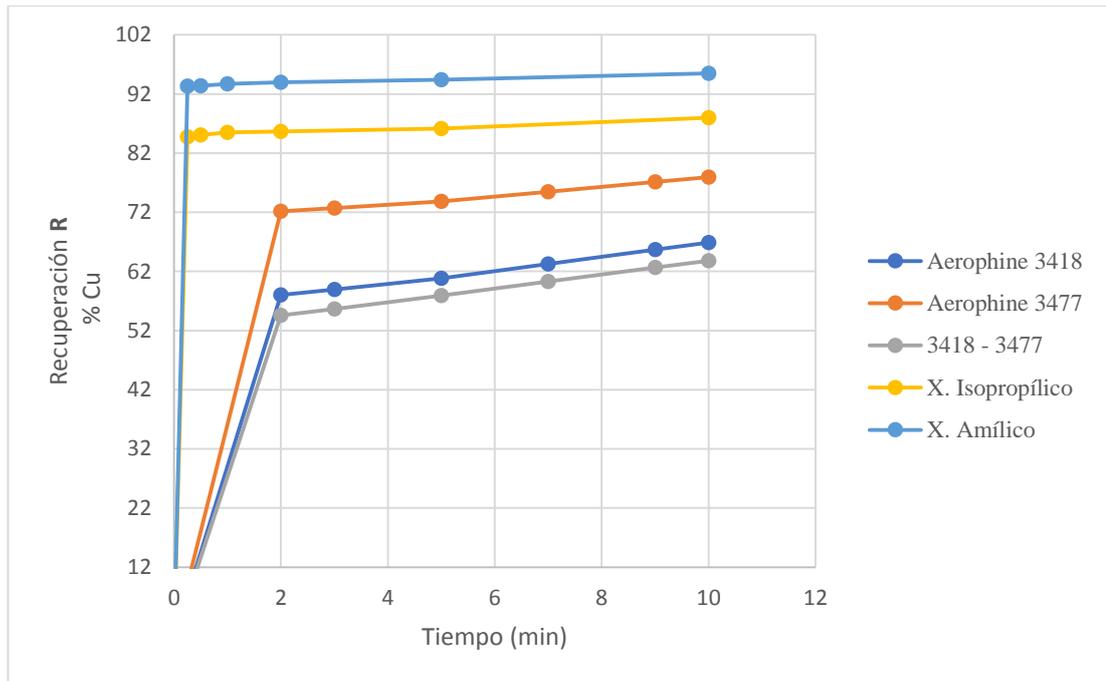


Figura 3. 6: Valores de recuperación (R) de Cu de los diferentes colectores

La razón de enriquecimiento ( $R_E$ ) nos indica si se obtuvo un concentrado con un tenor mayor al tenor de alimento, si este valor se encuentra más lejano a la unidad mejor será la concentración; en la tabla 3.6 los valores se encuentran por encima de la unidad donde la mayoría se acerca al valor de 2 o lo sobrepasan.

Tabla 3. 6: Valores de la Razón de Enriquecimiento

Colector	Tiempo de flotación (min)	$R_E$
Aero 3418A	2	2.36
Aero 3418A	5	2.05
Aero 3418A	10	1.65
Aero 3477	2	2.13
Aero 3477	5	1.98
Aero 3477	10	1.65
Aero 3418A - 3477	2	2.21
Aero 3418A - 3477	5	1.91

Aero 3418A - 3477	10	1.59
X. Isopropílico de Na	0,25	2.25
X. Isopropílico de Na	0,5	2.17
X. Isopropílico de Na	1	2.09
X. Isopropílico de Na	2	2.06
X. Isopropílico de Na	5	1.98
X. Isopropílico de Na	10	1.72
X. Amílico de k	0,25	2.05
X. Amílico de k	0,5	2.03
X. Amílico de k	1	1.91
X. Amílico de k	2	1.83
X. Amílico de k	5	1.72
X. Amílico de k	10	1.51

En el caso de los índices de capacidad los valores proporcionan información para escalamiento, dimensionamiento y selección de equipos de concentración; la razón de concentración (*RC*) nos indica la relación entre el flujo másico de sólidos en la alimentación, con respecto al flujo de sólidos en el concentrado.

Tabla 3. 7: Razón de Concentración

Colector	Tiempo de flotación (min)	RC
Aero 3418A	2	4.07
Aero 3418A	5	3.37
Aero 3418A	10	2.47
Aero 3477	2	2.99
Aero 3477	5	2.68
Aero 3477	10	2.12
Aero 3418A - 3477	2	4.05
Aero 3418A - 3477	5	3.30
Aero 3418A - 3477	10	2.50

X. Isopropílico de Na	0,25	2.65
X. Isopropílico de Na	0,5	2.55
X. Isopropílico de Na	1	2.44
X. Isopropílico de Na	2	2.40
X. Isopropílico de Na	5	2.30
X. Isopropílico de Na	10	1.96
X. Amílico de k	0,25	2.19
X. Amílico de k	0,5	2.17
X. Amílico de k	1	2.04
X. Amílico de k	2	1.95
X. Amílico de k	5	1.83
X. Amílico de k	10	1.58

Al ser el Rendimiento de concentración ( $V$ ) el valor inverso de la RC se tiene el rendimiento entre el flujo másico en el concentrado con respecto al flujo másico en la alimentación.

Tabla 3. 8: Rendimiento de Concentración

Colector	Tiempo de flotación (min)	$V$
Aero 3418A	2	0.25
Aero 3418A	5	0.30
Aero 3418A	10	0.40
Aero 3477	2	0.33
Aero 3477	5	0.38
Aero 3477	10	0.48
Aero 3418A - 3477	2	0.25
Aero 3418A - 3477	5	0.30
Aero 3418A - 3477	10	0.40
X. Isopropílico de Na	0,25	0.38
X. Isopropílico de Na	0,5	0.39
X. Isopropílico de Na	1	0.41
X. Isopropílico de Na	2	0.42

X. Isopropílico de Na	5	0.44
X. Isopropílico de Na	10	0.51
X. Amílico de k	0,25	0.45
X. Amílico de k	0,5	0.46
X. Amílico de k	1	0.49
X. Amílico de k	2	0.51
X. Amílico de k	5	0.55
X. Amílico de k	10	0.63

En este caso los valores más altos con  $V = 0.45$ , los tiene los colectores del factor B, especialmente el X. Amílico de potasio seguido del X. Isopropílico de sodio con un valor de  $V = 0.38$ , en el intervalo inicial de flotación analizado.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones:

Los reactivos de flotación que se adhieren a la superficie de una partícula, la modifican poniendo como una condición que favorece a la flotabilidad de la especie mineral, a pesar de que ya posee una propiedad hidrofóbica sin la necesidad de un colector; al mismo tiempo favorece la adherencia de las partículas a las burbujas de aire así garantizando una flotación espumante selectiva. Los reactivos seleccionados permiten adicionar hidrofobicidad selectiva de cobre en menas que contienen sulfuros como parte de su composición, especialmente las que contienen calcopirita.

Las mediciones de ángulo de contacto de la superficie de calcopirita sin la adición de un colector permiten deducir a la naturaleza hidrofóbica de la superficie de la misma como evidente, dando a conocer que a pesar de no estar en contacto con un colector ya repele al agua. Los datos obtenidos en las pruebas experimentales de la medición de ángulo de contacto sin colector presentan un valor relativamente comprendido entre  $69^\circ$  y  $74^\circ$ . Sin embargo, la adición de un colector es necesario ya que existe la presencia de otros minerales dentro de la composición de la especie mineral tratada, entonces, dos tipos de colectores que favorecen la flotación de sulfuros especialmente de la calcopirita para obtener un concentrado de Cu son los Ditiofosfatos como también los Xantatos. Siendo así el ángulo de contacto puede variar dependiendo del tipo de reactivo que se utiliza, consiguiendo valores altos entre  $71^\circ$  y  $81^\circ$  con el colector Xantato Isopropílico y en un intervalo de  $73^\circ$  y  $77^\circ$  con el Xantato Amílico de Potasio.

Es importante mencionar que inicialmente se propuso realizar flotaciones con 15 min de residencia o flotación con un acondicionamiento de 15 min a  $\text{pH} = 9$  variando solo los reactivos colectores; al momento de realizar las primeras pruebas se observó que el proceso era muy espontáneo; por lo tanto, se disminuyó el tiempo de flotación a 10 minutos estableciéndolo como intervalo largo de 2 min – 10 min, y añadiendo un

intervalo corto de flotación 0 – 2 min para analizar el comportamiento de la curva de recuperación y concentración en ese tiempo.

Al notar que, a pesar de la diferencia de tiempos de flotación en cada prueba, los resultados del proceso tienen el mismo comportamiento de concentración y recuperación ya sea a los 15 segundos de haber sido flotado o a los 2 minutos en el intervalo largo; es así que se toma los datos independientemente del intervalo corto o largo, según sea el caso para efectos de comparación de resultados.

En este caso se observa que la recuperación en cada prueba varía y asciende tendiendo a tomar valores hacia el infinito; es importante recalcar que en este caso cambió el comportamiento de los reactivos, ya que los mejores resultados son de los Xantatos, cuyo valor de recuperación del 93.31 % (amílico) y 84.72 % (Isopropílico) se sobreponen frente a los Ditiofosfatos.

En la razón de enriquecimiento los valores más altos recaen sobre el colector Aero 3418A con un valor de 2.36 mientras que el colector X. Isopropílico de sodio tiene un valor muy próximo de 2.25, apareciendo un valor adicional de 2.21 por parte de la mezcla de colectores del factor A. Por ello no existe mucha diferencia en la razón de enriquecimiento ya que ésta es mínima.

De acuerdo con las pruebas de flotación en la celda Denver, se observa que en general, el tamaño de partícula favorece a la recuperación y al objetivo principal del proceso de flotación espumante porque en este tamaño es mucho más fácil la adhesión de las partículas minerales de la calcopirita permitiendo ascender hacia la superficie formando la espuma mineralizada que se recoge como concentrado al final del proceso. El tiempo de flotación de una mena de calcopirita se desarrolla de manera muy espontánea manteniéndose en el orden de 2 minutos, ya que con tiempos mayores ponen en riesgo la selectividad del proceso y generan una disminución de tenor de Cu en los concentrados que salen en la espuma de flotación. Sin embargo, se observa que no necesariamente el tenor o ley de los concentrados

debe ser alto para obtener una recuperación igual, ya que si tomamos el caso de los colectores del factor A, los tenores tienen valores altos pero en las colas todavía existe la presencia de partículas de Cu que llegan a ser pérdidas importantes disminuyendo la recuperación; mientras que al analizar los colectores del factor B, sucede lo contrario, los tenores son menores pero su recuperación es más alta ya que al observar los valores del tenor de las colas es muy bajo optimizando el proceso de flotación, ya que no se generan muchas pérdidas generales.

Por ello, las hipótesis planteadas varían de acuerdo a los datos obtenidos en cada prueba de flotación, pero se toma en cuenta la medición de ángulo de contacto como un factor influyente para la selección de colectores que beneficien o aporten mayor hidrofobicidad a una superficie mineral.

La recuperación de Cu bajo la condición de un escenario físico-químico de flotabilidad se puede lograr gracias a la inducción de hidrofobicidad selectiva que demuestra que los colectores Xantatos generan una alta recuperación al comparar con colectores Ditiófosfatos ya que los Xantatos son más selectivos en el proceso de flotación, manteniéndose en un escalón más alto que los Ditiófosfatos al concentrar Cu de una mena de sulfuros.

Recomendaciones:

Los escenarios físico-químicos son relevantes en la flotación ya que cada uno tiene variables que cumplen funciones que no pueden ser modificadas sin tener una base teórica sustentable. La caracterización mineral de la especie a tratar es el principal estudio que se debe realizar antes de proponer un escenario de flotabilidad, ya que de esta depende los análisis y estudios posteriores para realizar un proceso de flotación espumante.

Para obtener una buena recuperación de un mineral, es necesario seleccionar adecuadamente los reactivos de flotación de acuerdo a la composición de la especie mineral tratada, caso contrario, se puede trabajar con un reactivo de buena calidad pero que no es apto para el mineral de interés que no produce ningún efecto positivo al momento de concentrar o recuperarlo.

Antes de realizar las pruebas planteadas, se recomienda tomar como un recurso adicional, flotaciones extras que comprueben que se obtienen resultados similares, o que condicionen a un patrón de flotación evitando gasto innecesario de energía, materiales y tiempo. Por ello se realizó una flotación igual con cierto colector al inicio para determinar si se obtenían los mismos resultados manteniendo las mismas condiciones de trabajo.

Para la concentración de calcopirita de esta mena de cobre se recomienda el uso de colectores Xantatos que recuperen solo los minerales de interés y que concentre la calcopirita evitando pérdidas en las colas ya que estos colectores, especialmente el Xantato Amfílico de Potasio y el Xantato Isopropílico de Sodio muestran un rendimiento eficaz en el proceso de flotación espumante.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Academia. (2017). Aeropromotores (Xantatos) - Terpinol. Obtenido de [http://www.academia.edu/11165460/Aeropromotores\\_xantatos\\_-Terpinol](http://www.academia.edu/11165460/Aeropromotores_xantatos_-Terpinol)
- Bazán, V., Sarquis, P., Brandaleze, E., & Orozco, I. (Diciembre de 2010). CARACTERIZACIÓN DE CONCENTRADOS DE COBRE PRODUCIDOS EN ARGENTINA PARA ANALIZAR LA FACTIBILIDAD DE LA INSTALACIÓN DE UNA PLANTA PIROMETALÚRGICA. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 18(3), 343-349. Obtenido de [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-33052010000300008](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052010000300008)
- Bravo Gálvez, A. C. (2004). *Manual de Flotación de Minerales*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/162775688/Manual-Flotacion-de-Minerales>
- Bulatovic, S. M. (2014). *Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice. Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice* (Vol. 3). <https://doi.org/10.1016/C2009-0-17332-4>
- Bustamante Rúa, M. O. (2017). *Apuntes de Flotación de Minerales*. Medellín, Antioquia, Colombia.
- Bustamante Rúa, M. O., & Gaviria Cartagena, A. C. (2008). *Teoría de la Doble Capa Eléctrica*. 17. Medellín, Antioquia, Colombia.
- Bustamante Rúa, M. O., Gaviria Cartagena, A. C., & Restrepo Baena, J. O. (2008). Concentración De Minerales, 83. Retrieved from [http://minas.medellin.unal.edu.co/centro-editorial/cuadernos/download/24\\_5a1004a32dcbd619453c3eed562725f0](http://minas.medellin.unal.edu.co/centro-editorial/cuadernos/download/24_5a1004a32dcbd619453c3eed562725f0)

Carmano, C. Y. (2000). Activación de la flotación de minerales mixtos oxidados de cobre por precipitación gaseosa. (J. O. Valderama, Ed.) *CIT CENTRO DE INFORMACIÓN TECNOLÓGICAS*, 11, 192.

Castro, S., & García, J. A. (2012). *FLOTACION Fundamentos y Aplicaciones*. 181.

Codelco. (2017). *Cobre*. Obtenido de Codelco Educa: <https://www.codelcoeduca.cl/cobre/queeselcobre.asp>

CYTEC SOLVAY GROUP. (2002). AEROPHINE (R) 3418A promoter. Obtenido de <http://www.cytec.com/businesses/in-process-separation/mining-chemicals/product/aerophine-3418A>

Dataphysics Instruments GmbH. (2017). *Dataphysics Understanding Interfaces*. Obtenido de <http://www.dataphysics.de/2/start/products/contact-angle-measuring-and-contour-analysis-systems/oca-measuring-instruments/oca-15ec/>

Donoso Muñoz, M. J. (2013). El mercado del cobre a nivel mundial: evolución, riesgos, características y potencialidades futuras. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 21(2), 248-261. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052013000200008>

Gonzalez Arias, S. D. (2016). *Concentración (“up grading”) de minerales de níquel a partir de lateritas, usando flotación espumante. repositorio*. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/54297/>

Kawatra, S. K., & Eisele, T. C. (1992). 1 Froth Flotation - Fundamental Principles. *Recovery of Pyrite in Coal Flotation: Entrainment or Flotation*, 1–30.

Kelly, E., & Spottiswood, D. (1990). *Introducción al Procesamiento de Minerales* (Español ed.). México: Limusa S.A. Obtenido de Scrib: <https://es.scribd.com/doc/303748853/E-G-Kelly-D-J-Spottiswood-Introduccion-Al-Procesamiento-de-Minerales>

La guía. (21 de Enero de 2011). Potencial Zeta. Obtenido de <https://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/potencial-zeta>

Linares Gutiérrez, N. (2010). *Principios de la Flotación de Minerales*. Obtenido de SlideShare: <https://es.slideshare.net/nlinaresg/capitulo-i-principios-de-la-flotacion-de-minerales>

Linares Gutiérrez, N. (2011). Fundamentos de flotación de minerales, 216.

López, A., & Reyes, J. L. (2005). Flotación de calcopirita , piritita y molibdenita en minerales de cobre tipo pórfidos, 1–29.

Luna Méndez, E. A. (2016). *Elaboración de guías prácticas de procesos metalúrgicos para el laboratorio de minas de la Universidad del Azuay*. Universidad del Azuay.

Maurice C. Fuerstenau, G. J.-H. (2007). *Froth Flotation: A Century of Innovation* (Ilustrada ed.). (SME, Ed.) Obtenido de <https://books.google.ca/books?id=8zpjAhBViC0C>

Méndez, E. (2009). Flotación Selectiva de Enargita desde un Concentrado Final de Sulfuros de Cobre de Collahuasi, 262. Retrieved from [http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2009/mendez\\_e/sources/mendez\\_e.pdf](http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2009/mendez_e/sources/mendez_e.pdf)

Mercedes, C., & Suárez, T. (2013). Estudio de la Hidrofobicidad de Oro Nativo y su Efecto en la Flotación Espumante Directa, 88.

Mineral Data Publishing. (2005). Chalcopyrite. 1. Obtenido de <http://rruff.info/doclib/hom/chalcopyrite.pdf>

Morral, F. R., Jimeno, E., & Molera, P. (1985). *Metalurgia General* (Vol. 2). Reverte. Obtenido de [https://books.google.com.ec/books?id=I-hsKRVkzsAC&dq=el+cobre+y+sus+FORMAS&hl=es&source=gbs\\_navlink\\_s\\_s](https://books.google.com.ec/books?id=I-hsKRVkzsAC&dq=el+cobre+y+sus+FORMAS&hl=es&source=gbs_navlink_s_s)

Novoa, G., & Vargas, L. (2013). *VARIABLES Y PROPIEDADES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE FLOTACIÓN*. Obtenido de Academia: [http://www.academia.edu/14081794/VARIABLES\\_Y\\_PROPIEDADES\\_QUE\\_INFLUYEN\\_EN\\_EL\\_PROCESO\\_DE\\_FLOTACION](http://www.academia.edu/14081794/VARIABLES_Y_PROPIEDADES_QUE_INFLUYEN_EN_EL_PROCESO_DE_FLOTACION)

Ortiz, A. A., Rojas, V. A., Lavado, J. Q., Santibañez, L. P., Sandoval, M. C., Sing, W. R., ... Valdivia, J. D. D. Q. (2014). FLOTACION DE MINERALES POLIMETÁLICOS SULFURADOS DE Pb, Cu y Zn. *Revista Del Instituto de Investigaciones de La Facultad de Geología, Minas, Metalurgia Y Ciencias Geográfica*, 13, 20. Retrieved from <http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/429>

Pávez, O. (2005). *Apuntes de Concentración de Minerales I*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/58507012/Concentracion-de-minerales>

Pavez, O. (2005). *Apuntes de Concentración de Minerales II*. Obtenido de *Apuntes de Concentración de Minerales II*: [http://www.mineriacatamarca.gob.ar/LinkEducativo/InformacionAcademica/AreaProcesamiento\\_Minerales/Apuntes\\_de\\_Concentracion\\_de\\_Minerales.pdf](http://www.mineriacatamarca.gob.ar/LinkEducativo/InformacionAcademica/AreaProcesamiento_Minerales/Apuntes_de_Concentracion_de_Minerales.pdf)

Quiñones, L. & Lourdes, J., (2010) Mineralurgia mineral polimetálico sulfurado de Pb, Cu, y Zn, Informe Técnico. Lima, Perú, 4(1), 28-31.

Renasa S. A. (2012). Xantatos. Obtenido de <http://www.renasa.com.pe/xantatos.htm>

T. T. Chau, W. J. Bruckard, P. T. L. Koh, and a V Nguyen, “A review of factors that affect contact angle and implications for flotation practice.,” *Advances in colloid and interface science*, vol. 150, no. 2, pp. 106–15, Sep. 2009.

Universidad de Chile, I. civil de minas. (2010). Reactivos de flotación II, 42,43.