



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**ESCUELA DE MINAS**

**“Concentración de oro mediante flotación en columna”**

**Trabajo de Graduación Previo a la obtención del Título de:**

**INGENIERO EN MINAS**

**Nombre del autor:**

**ANDRÉS BERNARDO VERGARA ESPINOSA**

**Nombre del director:**

**FERNANDO TULIO VALENCIA GUARICELA**

**CUENCA-ECUADOR**

**2019**

## **DEDICATORIA**

Con mucho cariño dedico este proyecto de titulación a mi padre Bernardo Vicente Vergara y a mi madre Patricia Espinosa, por su incondicional apoyo y confianza en el cumplimiento de mis metas.

A mis hermanos David y Damaris por todos los momentos compartidos en cada etapa de nuestras vidas y el cariño permanente.

## **AGRADECIMIENTO**

Le agradezco a Dios y a mis padres por el apoyo brindado en la culminación de este trabajo permitiéndome cumplir una meta más.

A la Universidad del Azuay, por todos los conocimientos impartidos que serán aplicados en el área profesional a futuro.

A los maestros que en el transcurso de estos años me guiaron en mi formación profesional de manera especial a Fernando Valencia, Juan Calderón y Federico Auquilla; quienes me ayudaron en el proceso de trabajo e investigación de este proyecto.

## INDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO .....	ii
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT .....	viii
CAPITULO I.....	2
CONCENTRACIÓN DE MINERALES – FLOTACIÓN.....	2
1.1. Planteamiento del Problema.....	2
1.2. Objetivos de la Investigación.....	2
1.2.1. Objetivo General .....	2
1.2.2. Objetivos Específicos .....	2
1.3. Alcance.....	2
1.4. Marco Teórico y Estado del Arte .....	3
1.5. Métodos de Separación .....	3
1.6. Propiedades Físicas de los Minerales .....	4
1.6.1. Peso Específico .....	4
1.6.2. Conductividad Eléctrica .....	5
1.6.3. Color .....	5
1.6.4. Susceptibilidad Magnética .....	5
1.7. Índices Metalúrgicos .....	5
1.8. Relación de Calidad .....	7
1.8.1. Recuperación.....	7
1.8.2. Razón de Enriquecimiento .....	8
1.8.3. Relación entre la Recuperación (R) y la Razón de Enriquecimiento (R.E.).....	9
1.9. Índices Metalúrgicos Ideales .....	9
1.10. Generalidades de la Flotación .....	10
1.10.1. Principios de la Flotación .....	12
1.10.2. Tipos de Hidrofobicidad.....	13
1.11. Ecuación de Young .....	14
1.12. Potencial Zeta.....	16
1.12.1. Adsorción.....	18
1.12.2. Coalescencia.....	18
1.12.3. Emulsificación .....	18
1.12.4. Ascenso Capilar .....	18
1.13. Flotación en columna .....	19

1.14.	Propiedades de los procesos de flotación en columna .....	20
1.14.1.	Propiedades interfaciales .....	20
1.14.2.	Adhesión de burbuja y partícula .....	21
1.14.3.	Colección de partículas por burbujas .....	21
1.15.	Zonas de la columna de flotación.....	21
1.15.1.	Zona de colección .....	21
1.15.2.	Tiempo de residencia medio de pulpa .....	22
1.15.3.	Zonas de la columna de flotación .....	22
1.15.4.	Aireación de la celda.....	23
1.15.5.	Agua de lavado.....	24
1.16.	Factores influyentes en la flotación Columnar .....	24
1.16.1.	Relación altura-diámetro .....	24
1.16.2.	Concentración de gas .....	25
1.16.3.	Tamaño de partícula y generación de burbujas.....	26
1.16.4.	Bias .....	26
1.16.5.	Caudal de aire.....	26
1.17.	Flotación Tipo Denver .....	27
CAPITULO II	.....	29
2.	DISEÑO-CONSTRUCCIÓN Y PARAMETROS OPERACIONALES.....	29
2.1.	Caracterización del material.....	29
2.2.	Selección del Mineral .....	29
2.3.	Trituración, molienda y clasificación del material .....	30
2.3.1.	Trituración Primaria .....	30
2.3.2.	Trituración Secundaria .....	31
2.3.3.	Molienda .....	31
2.3.4.	Cuarteo de material .....	31
2.3.5.	Análisis Granulométrico.....	32
2.3.6.	Análisis Mineralógico .....	32
2.4.	FLOTACIÓN EN CELDAS DENVER Y COLUMNAR .....	33
2.4.1.	Reactivos.....	33
2.4.2.	Preparación de reactivos.....	33
2.4.3.	Regulador de pH .....	38
2.4.4.	Cálculo de pulpa.....	38
2.5.	PRUEBAS DE LABORATORIO .....	40
2.5.1.	Celda Denver: .....	40
2.5.2.	Celda Columnar: .....	43

CAPITULO III .....	53
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS EXPERIMENTOS REALIZADOS .....	53
CONCLUSIONES.....	59
RECOMENDACIONES.....	61
REFERENCIAS .....	62
BIBLIOGRAFÍA .....	64
ANEXOS.....	66

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Índices de Concentración Ideales .....	10
Tabla 2.1: Cálculo de pulpa .....	39

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2.3.1 Cuarteo material.....	32
Ilustración 2.4.1 Xantato Amflico de Potasio Z-6 .....	36
Ilustración 2.4.2 Ditioposfato AR-1404 .....	37
Ilustración 2.4.3 Ditioposfato AR-1242 .....	38
Ilustración 2.5.1 Celda Denver de Laboratorio.....	41
Ilustración 2.5.2 Flotación celda Denver .....	42
Ilustración 2.5.3 Columna de Flotación.....	44
Ilustración 2.5.4 Ingreso de alimento de pulpa .....	45
Ilustración 2.5.5 Ingreso de aire comprimido .....	46
Ilustración 2.5.6 Recolección de muestra .....	46
Ilustración 2.5.7 Tanque de acondicionamiento .....	47
Ilustración 2.5.8 Bomba de sólidos.....	48
Ilustración 2.5.9 Compresor de aire.....	48
Ilustración 2.5.10 Instalación de equipos.....	49
Ilustración 2.5.11 Secado de muestra .....	51
Ilustración 3. 1: Modelo de recuperación de mineral de Oro. ....	56

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1: Esquema de concentración .....	6
Figura 1. 2: Relación de Recuperación vs Relación de Enriquecimiento.....	9
Figura 1. 3: Esquema de adhesión selectiva .....	14
Figura 1. 4: Ángulo de contacto de las fases aire, agua y superficie mineral .....	15
Figura 1. 5: Zonas de la columna de flotación.....	23
Figura 1. 6: Medida de la presión del gas y dirección de flujo celda-columna .....	23
Figura 1. 7: Celda Denver.....	28
Figura 2. 1: Circuito de Selección Mineral.....	30

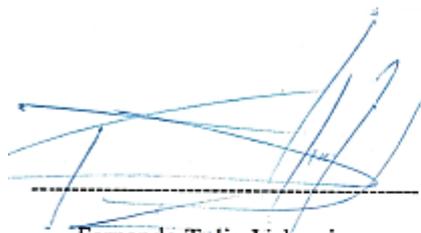
# CONCENTRACIÓN DE ORO MEDIANTE FLOTACIÓN EN COLUMNA

## RESUMEN

Esta investigación comprende la determinación de las recuperaciones obtenidas en el proceso de concentración metalúrgica mediante flotación espumante de una mena polimetálica en donde el mineral de interés es el oro (Au). Para ello se diseñó, construyó y experimentó en una columna de flotación a escala de laboratorio y paralelamente se realizaron los ensayos en una celda tipo Denver. Las variables operacionales como colectores (Xantato Z-6, Ditiofosfato AR-1404, Ditiofosfato AR-1242), espumante (ER-350), tipo de material, densidad de la pulpa y ph en el proceso de flotación se mantuvieron constantes para los ensayos en ambos equipos.

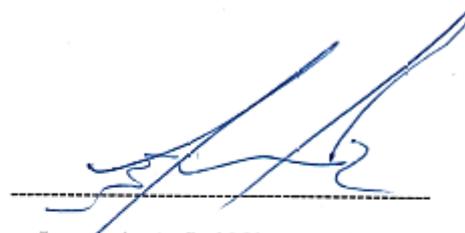
Los resultados muestran una recuperación metalúrgica de oro ligeramente superior para la columna de flotación. (R= 70,33%)

**Palabras clave:** concentración de minerales, columna, flotación, hidrofobización, Denver.



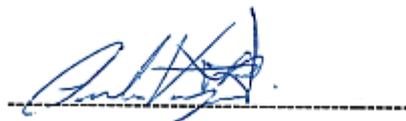
Fernando Tulio Valencia

**Thesis Director**



Leonardo Aníbal Núñez Rodas

**Faculty Coordinator**



Andrés Bernardo Vergara Espinosa

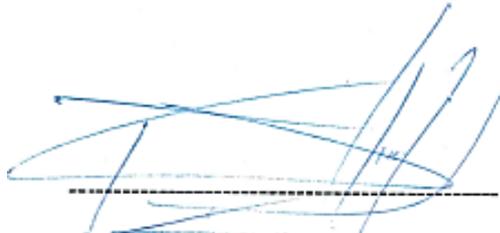
**Author**

## GOLD CONCENTRATION THROUGH COLUMN FLOTATION

### ABSTRACT

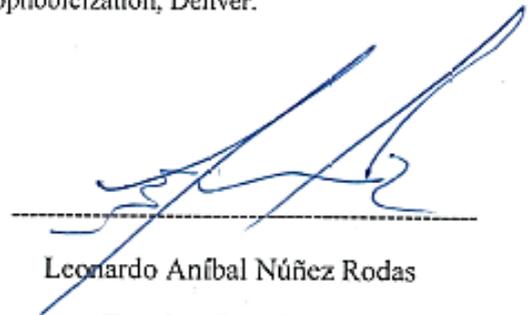
This investigation determined the recoveries obtained from metallurgical concentration by foaming flotation of a polymetallic ore where the mineral of interest was gold (Au). For this reason, a flotation column was designed, constructed and tested on a laboratory scale. At the same time, tests were carried out in a Denver-type cell. The operational variables such as collectors (Z-6 Xanthate, AR-1404 Dithiophosphate and AR-1242 Dithiophosphate), foaming (ER-350), type of material, density of the pulp and pH were kept constant in the flotation process for the tests on both equipment. The results show a slightly higher metallurgical gold recovery for the flotation column (R = 70.33%).

**Keywords:** mineral concentration, column, flotation, hydrophobicization, Denver.



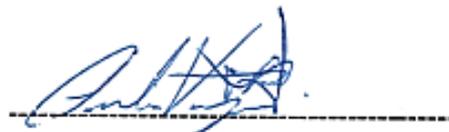
Fernando Tulio Valencia

**Thesis Director**



Leonardo Anibal Núñez Rodas

**Faculty Coordinator**



Andrés Bernardo Vergara Espinosa

**Author**

## INTRODUCCIÓN

Los procesos de flotación han generado a lo largo de los años gran interés debido a la eficiencia que tienen las burbujas de aire para atrapar en forma selectiva las partículas mineralizadas. Las partículas que son capaces de ser colectadas se denominan flotables y pasarán a una zona de espuma para luego llegar al concentrado. Por otra parte, las partículas que no son flotables serán enviadas a los relaves.

De acuerdo a Jiménez y Prieto (2001), la búsqueda de métodos de separación tiene como finalidad implementar un proceso que nos brinde resultados óptimos en la obtención de minerales, partiendo desde un análisis de laboratorio de la mena metálica y el grado de recuperación de la técnica aplicada.

La flotación es un proceso metalúrgico de separación de materias de distinto origen que se efectúa desde sus pulpas acuosas por medio de burbujas de gas y a base de sus propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas, donde tiene mucha importancia la máquina de flotación. La flotación es un proceso donde intervienen muchas variables donde influye el estudio de la cinética de la flotación es decir la recuperación de especies minerales en la espuma en relación con el tiempo de obtención.

La eficiencia de un proceso de flotación está en relación al tonelaje que puedo procesar por unidad de masa, la calidad del producto obtenido, el consumo de energía, cantidad de reactivos, los gastos de mantenimiento y gasto de operación de la maquinaria. (Rodríguez, 2011)

Álvarez (2015) nos dice que la flotación ha sido probada para separar el oro libre de concentrados de sulfuros, reemplazando de esta manera la amalgamación. La flotación nos dice que sería efectiva en el caso de que los granos tengan un tamaño limitado pues debido a que el oro más grueso tendría una masa más grande esta no flotaría con tanta facilidad.

El modelo de flotación en columna a desarrollarse en esta tesis es una técnica atractiva para la flotación de minerales, permite una alta concentración de partículas finas logrando obtener en este caso una mayor recuperación de Au, disminuyendo los costos de energía, los reactivos y gastos en su construcción en relación con las máquinas de flotación convencionales.

## CAPITULO I

### CONCENTRACIÓN DE MINERALES – FLOTACIÓN

#### 1.1. Planteamiento del Problema

En la industria minera actualmente la flotación es de gran importancia, ya que ha permitido la explotación de yacimientos de baja ley.

La concentración del mineral debe ir en relación con el gasto económico que éste implica pues si el costo de producción del mineral es elevado, este no representaría factible producir. La adición de colectores para la generación de burbujas en sistemas de flotación comunes implica gastos, así como también el uso necesario de un agitador mecánico; a diferencia de la flotación en columna en donde la generación de burbujas se produce por inducción de aire mediante difusores que se encuentran en la base tubular.

El dimensionamiento de las plantas de beneficio es esencial, pues a futuro su puede implementar nuevas tecnologías en los procesos, como se evidencia en la industria minera los equipos de flotación en celdas Denver ocupan gran cantidad de espacio a comparación de la flotación columna.

#### 1.2. Objetivos de la Investigación

##### 1.2.1. Objetivo General

Determinar la recuperación de la columna de flotación variando el caudal de aire y pulpa.

##### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Realizar el diseño y construcción del equipo de flotación en columna.
- Establecer los caudales de aire para la óptima formación de burbujas.
- Determinar los índices metalúrgicos del proceso de flotación en columna.
- Comparar los valores de recuperación de la flotación en columna contra la flotación en celdas Denver.

#### 1.3. Alcance

Mediante la elaboración del proyecto con base en la información recopilada, se realizará un análisis y caracterización de la mena polimetálica compleja. A partir de estudios en la mena, se procederá a emplear el mejor pre tratamiento, con ensayos y comparaciones, de acuerdo a

los resultados.

Se diseñará y construirá la columna de flotación de manera que los experimentos a realizarse permitan una concentración óptima del mineral de interés.

#### **1.4. Marco Teórico y Estado del Arte**

La aplicación de este proyecto permitirá la concentración de minerales de interés, evolucionando procesos que permitan optimizar los resultados que se pretende conseguir, dentro de los parámetros técnicos y basados en estándares ambientales.

De acuerdo a Bustamante (2008) “La concentración de minerales es la operación que permite elevar el tenor de una mena mineral, a través de la separación sólido-sólido produciéndose una segregación de dos o más especies mineralógicas generando un concentrado de mineral de interés.” de acuerdo al autor citado este proceso forma parte de una cadena de producción que permite la segregación o separación de materiales sólidos con la finalidad de identificar el material que puede ser desechado y concentrarse en continuar trabajando con el material depurado de interés. Por esto se busca implementar un proceso que garantice resultados positivos, “Partiendo de la obtención de resultados a nivel de laboratorio que garanticen el adecuado aprovechamiento de los minerales, se pretende determinar el grado de recuperación que tendrá la aplicación de esta técnica, por el gran potencial que estas presentan.” (Jiménez & Prieto, 2011)

Es decir que ante la existencia de varias posibilidades de procesos que permiten la concentración de minerales de interés, es necesario hacer un estudio o un análisis minucioso de acuerdo a la realidad en el campo de extracción para estar en condiciones de seleccionar una técnica que ofrezca las mayores posibilidades de eficiencia en el proceso de recuperación.

#### **1.5. Métodos de Separación**

“Para llevar a cabo la separación de solido-solido, estos deben tener diferencias suficientes en algunas de las propiedades físicas o químicas como densidad, susceptibilidad magnética, conductividad eléctrica, diferencias en fricción, radioactividad, color o propiedades superficiales.” (Klimpel, 1998)

El proceso de separación de materiales debe tener en cuenta las características físicas y químicas de cada uno de ellos con la finalidad de que este proceso tenga altos estándares de

eficiencia permitiendo la segmentación adecuada que incremente la productividad de la actividad minera en general.

Los métodos de separación en el procesamiento de minerales se clasifican en gravimétricos, magnéticos, electrostáticos y fisicoquímicos; es fundamental el grado de liberación de las partículas de acuerdo a cada uno de los métodos.

El fundamento de la concentración gravimétrica es la diferencia de densidades entre los minerales a separar, entre mayor es la diferencia de densidad dos o más minerales, la efectiva será su separación. (García C. , 2003)

La separación magnética permite la separación de acuerdo a la susceptibilidad magnética de cada partícula, respondiendo de manera distinta a un campo magnético. De acuerdo a esto los minerales se clasifican como paramagnéticos, ferromagnéticos y diamagnéticos. (Sutulov, 1963)

La concentración electrostática indica que si un material que se encuentra dentro de una mezcla de partículas puede recibir una carga superficial dentro de un campo electrostático las partículas de ese material serán repelidas por uno de los electrodos y atraídas hacia el otro dependiendo esto del signo de la carga de las partículas. (Guedez J, 2007)

La efectividad en el campo de la separación de minerales dependerá de los estudios y análisis previos de un laboratorio y posteriormente en su aplicación en la planta de procesamiento, sin embargo es necesario identificar ciertas características que permitan y optimicen la eficiencia esperada, teniendo como base datos y estándares que ya forman parte de una base científica, estos deberán ser valorados y analizados para determinar su selección y aplicación en un proceso determinado de acuerdo a las necesidades específicas de cada uno de ellos.

## **1.6. Propiedades Físicas de los Minerales**

### **1.6.1. Peso Específico**

Es la relación entre el volumen de una sustancia y el volumen del mismo peso en agua. En base al peso específico de la concentración gravimétrica, esta es una etapa de pre tratamiento puede darse en mesas vibratorias, jigs concentradores centrífugos, etc. (García C. , 2003).

La determinación de propiedades como el peso específico permite identificar ciertas características de operatividad de cada uno de los métodos de separación, estos procesos pueden ser desarrollados científicamente y de manera previa en laboratorios con instrumentos de alta precisión para evitar deficiencias ya en el campo de trabajo.

### **1.6.2. Conductividad Eléctrica**

Cada especie mineralógica cuenta con una carga electrostática y así tienen una corriente de conducción a través del mismo, por tanto, los separados electrostáticos aprovechan las diferencias de conductividad eléctrica de cada elemento mineral. (Castro, 2002)

### **1.6.3. Color**

El color permite una pre concentración de minerales gruesos, a través de una selección visual. Es aplicado al existir una diferenciación notable entre la ganga y la mena mineralizada. (Castro, 2002)

Se trata de una estrategia válida y por su puesto confiable en la medida en que el personal tiene un contacto directo y básico con el material con el que se trabaja el mismo que por una característica de color puede identificar, seleccionar y separar cada uno de los materiales que se encuentran en el medio de intervención.

### **1.6.4. Susceptibilidad Magnética**

Es la separación entre minerales paramagnéticos y magnéticos o ferromagnéticos, de minerales diamagnéticos es decir ganga y minerales magnéticamente débiles; mediante el uso de electroimanes. “Estos electroimanes pueden ser separadores secos, de mediana a alta intensidad y separadores húmedos.” (Bustamante M. O, 2008)

## **1.7. Índices Metalúrgicos**

La estimación técnica de la concentración de minerales se realiza en base a índices metalúrgicos, permitiendo precisar la eficacia de la separación en una o varias etapas de concentración. Esto permite el dimensionamiento de equipos en las plantas de concentración.

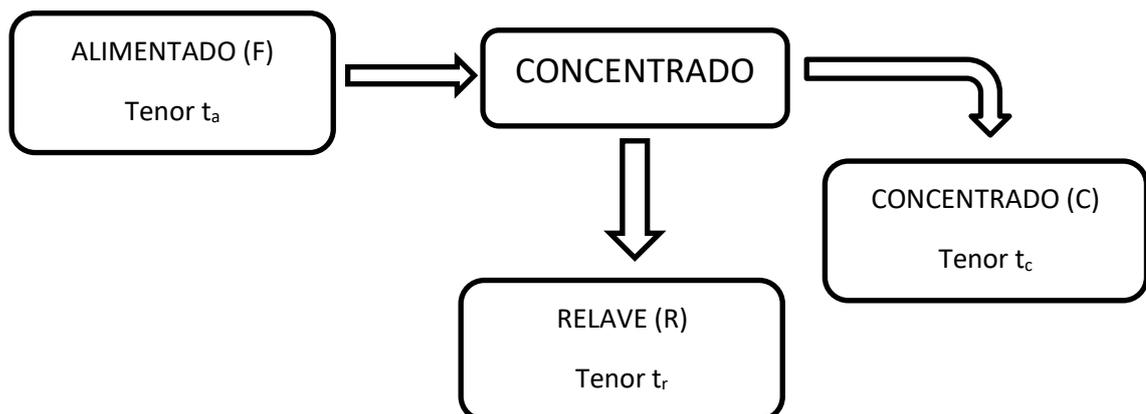
“El balance general debe estar de acuerdo al elemento de interés o más valioso en la cabeza, el concentrado y el relave.” (Bustamante M. O, 2008)

Los índices metalúrgicos constituyen entonces, una importante base de datos que toma en cuenta los resultados en cada uno de los procesos y por supuesto, los índices de efectividad que en la producción han alcanzado, sin embargo al tratarse de una secuencia de acciones se debe tener datos de cada una de ellas, es decir cada fase debe presentar un informe con la finalidad de identificar la eficiencia particularizada, esta acción aporta con la posibilidad de realizar ajustes o mejoras en el proceso que tiene repercusiones en los resultados generales, manteniendo un registro muy definido y exacto de los resultados obtenidos.

El balance de masa debe estar dado de la siguiente manera:

- Mineral de interés (entradas) = Mineral de interés (salidas)

Figura 1.1: Esquema de concentración



Fuente: (Bustamante M. O, 2008)

Se entiende por Tenor como la cantidad de material útil con respecto al estéril. (Bustamante M. O, 2008)

$$F \cdot t_a = C \cdot t_c + T \cdot t_r$$

De donde:

F= masa de alimentación.

$t_a$ = tenor de concentrado en el alimento.

C= masa del concentrado de interés.

$t_c$ = tenor de concentrado.

T= masa de relaves.

$t_r$ = tenor de concentrado en relaves.

La figura 1.1 nos da a entender que el resultado de las entradas será igual a la suma del concentrado y las colas multiplicados por los respectivos tenores.

## **1.8. Relación de Calidad**

“Hace referencia a la calidad del producto final y nos dará indicativos de la eficiencia del control de acuerdo al proceso.” (Bustamante M. O, 2008)

En toda actividad humana, mucho más en la que haga referencia a procesos científicos, técnicos y de productividad, se debe contar con instrumentos que garanticen los estándares de calidad esperados, es necesario anotar que el resultado final depende de la efectividad y eficiencia de cada uno de los procesos, fases o etapas que lo componen, de ahí la importancia de contar con un sistema de monitoreo, control y ajuste en cada etapa con la finalidad de corregir posibles errores garantizando así el producto final.

### **1.8.1. Recuperación**

La recuperación es el porcentaje que indica el rendimiento de la operación de flotación, este se calcula entre el tenor del mineral de interés que hay en el concentrado y el de ese mismo mineral que hay en la alimentación. (Bustamante M. O, 2008)

$$R = \frac{T_c * (T_a - T_r)}{T_a * (T_c - T_r)}$$

(Bustamante M. O, 2008)

Donde:

R = Recuperación

T<sub>c</sub> = Tenor de Concentrado

T<sub>a</sub> = Tenor de Alimento

T<sub>r</sub> = Tenor de Relave

### 1.8.2. Razón de Enriquecimiento

“Razón entre el tenor del mineral útil del concentrado y el tenor del mismo mineral en la alimentación.” (Castro, 2002)

De acuerdo a estudios previos de procesamiento mineral realizados se sabe que cuando el valor de enriquecimiento es mayor, mayor será la concentración de este.

$$Re = \frac{tc}{ta}$$

De donde:

Re = Razón de enriquecimiento

tc = tenor de concentrado

ta = tenor de concentrado en el alimento

Índice de Selectividad

Este índice compara la calidad entre la separación de dos especies minerales que se desean separar en el proceso de concentración y se define como:

$$I.S. = \frac{ta(X) * tt(Y)}{ta(Y) * tt(X)}$$

De donde:

$t_a(X)$  y  $t_a(Y)$  = tenores del componente X y Y en la alimentación.

$t_t(X)$  y  $t_t(Y)$  = tenores que componen X y Y del relave.

### 1.8.3. Relación entre la Recuperación (R) y la Razón de Enriquecimiento (R.E.)

De acuerdo a la gráfica tenemos que la relación de recuperación frente a la relación de enriquecimiento nos da que el factor de recuperación es mayor si la razón de enriquecimiento es baja, y viceversa.

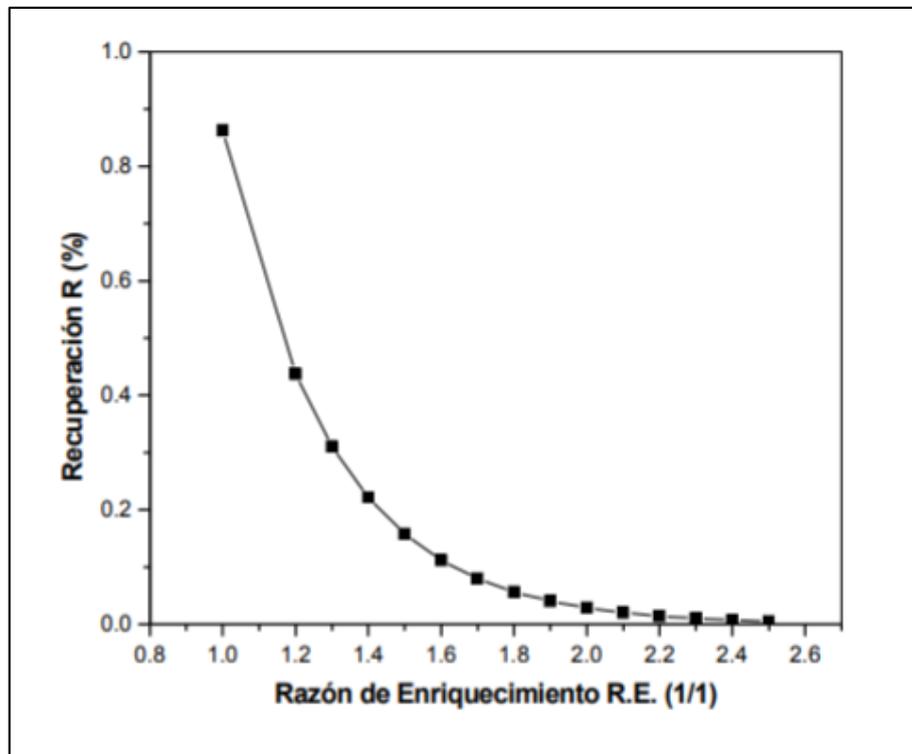


Figura 1. 1: Relación de Recuperación vs Relación de Enriquecimiento  
Fuente: (Bustamante M. O, 2008)

### 1.9. Índices Metalúrgicos Ideales

De acuerdo a la experiencia metalúrgica sabemos que una separación ideal es cuando se cumplen dos condiciones:

1. El tenor del mineral de interés igual a cero.  $t_t = 0$
2. Sin existencia de ganga dentro del concentrado.  $t_a = 1.0$

Si es que cualquiera de estas dos condiciones no se cumple, la concentración deja de ser ideal y hay que tomar en cuenta que cada condición es independiente una de la otra.

A partir de los tenores y balances de masa se tiene la siguiente tabla para el cálculo de los índices de concentración.

NOMBRE DEL INDICE METALÚRGICO	EXPRESIÓN DEL INDICE IDEALMENTE	INDICES EN TERMINOS DE TENORES
Recuperación: $R$	$R_{IDEAL} = 1.0$	$R = \frac{t_a - t_t}{t_c - t_t} \frac{t_c}{t_a}$
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 $E$	$E = 1.0$	$E = \frac{(t_a - t_t)(t_c - t_a)}{t_a(t_c - t_t)(1 - t_a)}$

Tabla 0.1: Índices de Concentración Ideales  
Fuente: (Bustamante M. O, 2008)

### 1.10. Generalidades de la Flotación

La flotación es un método fisicoquímico de concentración de minerales en suspensiones acuosas que consiste en separar partículas hidrófobas de las hidrofílicas; algunos minerales como el talco, azufre y grafito pueden ser hidrófobos por naturaleza, pero a la gran mayoría se les debe inducir hidrofobicidad mediante la adición de tenso activos que generen la reducción de la tensión superficial de la interface sólido-agua, permitiendo esto que se dé una adsorción de burbujas de aire y así el sistema de partículas-burbujas ascienden a la superficie donde se encuentra una espuma que permitirá evacuar por rebose del sistema las partículas hidrofóbicas introducidas en las burbujas. “Los minerales hidrofílicos se humectan en el medio acuoso debido a que se establecen enlaces superficiales con los grupos iónicos del agua por ende se descargan en la parte inferior del tanque por sedimentación a esto se lo conoce como adsorción del agua.” (Zamora, 2012)

El tratamiento de partículas finas requiere de mucha atención, pues su recuperación por flotación puede ser mucho más baja que para el mismo material en tamaños grandes (king, 1982).

Cada una de las técnicas de separación deben analizarse y adecuarse a las realidades, contextos y necesidades, así la cita referida señala la importancia de trabajar con partículas finas, poniendo énfasis en el tamaño de cada una de ellas ya que la efectividad del proceso depende del volumen de cada una de las partículas que van a ser separadas.

De acuerdo con Laskowsky y Ralston (1992) nos indican que para el procesamiento de minerales hay tres tipos de minerales finos como son:

- Minerales de arcilla que ocurren naturalmente, como caolinita, illita y montmorillonita, los cuales están compuestos por partículas muy pequeñas (en general por debajo de 2 mm).
- Los finos, producidos durante la trituración y molienda de minerales en operaciones de beneficio.
- Los residuos de la lixiviación de minerales triturados en procesos hidrometalúrgicos. Estos lodos se componen parcialmente de partículas minerales insolubles y precipitadas (productos de reacciones químicas).

“La flotación es la separación entre el material estéril y el mineral, teniendo en cuenta que uno de ellos se eleva a la superficie de un líquido a través del uso de burbujas gracias a sus propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas.” (Rodríguez, 2011)

Efectivamente, la técnica de la flotación se aplica en base al peso y volumen de cada una de las partículas disponibles ya que dependerá de esas características que exista una adecuada separación de los materiales disponibles y requeridos, por otra parte, el ejecutor de este método debe contar con la información indispensable para elegir la viabilidad de aplicar el proceso de flotación teniendo en cuenta las características físicas de los materiales con los que va a trabajar.

Cuando los minerales valiosos son separados durante la carga de superficie de la flotación estos atraen moléculas polares de agua, hidrogeno y de iones de hidroxilo. La superficie

hidrofílica puede cambiar a hidrófoba mediante el uso de químicos, los cuales son conocidos como colectores. (Rodríguez, 2011)

El aire que ingresa dentro de la pulpa de mineral genera una tensión superficial con el agua que puede ser de  $7,2 \cdot 10^{-4} \text{ Nm}^{-1}$ ; entonces posterior a elevarse a la superficie las burbujas se rompen y no son capaces de llevar partículas mineralizadas en ellas; para evitar rotura de las burbujas es necesario inyectar una sustancia química activa, esta se añade a la pulpa para que se forme una capa de espuma estable conocida como espumante. (Ángel Azañero Ortiz, 2012)

La flotación tiene por objeto principal el separar uno o más minerales de otros materiales mediante una pre adición de colectores para así tener una flotación efectiva.

La adsorción del colector es mejorada por agentes reguladores, estos son conocidos como activadores o depresores por lo que ayudan a sedimentar material inerte.

Los reactivos usados durante la flotación son clasificados en tres categorías de acuerdo a su uso:

- Colectores
- Agentes espumantes
- Agentes reguladores

Los productos químicos que se utilizan en la flotación son muy variados de acuerdo a su composición incluyendo compuestos orgánicos e inorgánicos, ácidos y bases, sales, sustancias solubles en agua y materiales prácticamente insolubles en agua.

### **1.10.1. Principios de la Flotación**

La flotación se define como la concentración de minerales en húmedo en donde se aprovecha las propiedades físico-química superficial de las partículas para efectuar la selección mineral. La flotación contempla tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida está referida a la materia a separar, la líquida es el agua y la gaseosa es el aire. La flotación de un sólido depende de la adsorción de un surfactante en su superficie ya que casi todos los minerales son humectables por la fase acuosa. Las propiedades superficiales pueden ser modificadas con el uso de reactivos. Como primer paso se debe reemplazar la interface mineral-líquido por la interface mineral-gas, lo cual se logra mediante los reactivos adecuados para que así se dé una

superficie hidrofóbica; en algunos casos la estabilidad de la adhesión de las burbujas de aire a la superficie del mineral se mide mediante el ángulo de contacto, que se forma entre las fases sólida, líquida y gaseosa. (Rodríguez, 2011)

- Mineral hidrofóbico. - es aquel que rechaza a las moléculas de agua de la superficie de sus partículas; por tanto, realiza una acción directa con las burbujas de aire. (Rodríguez, 2011)
- Burbujas de aire. - a través de estas; las partículas de material pueden mantenerse suspendidas en la superficie de un medio espumante estable. (Rodríguez, 2011)
- Reactivos químicos. - La hidrofobicidad y formación de burbujas dependerá de la proporción de químicos que se agreguen al proceso. Los agentes químicos necesarios son: colectores, activadores, depresores y modificadores.

En el proceso de la flotación, las partículas minerales hidrofóbicas se adherirán a las burbujas y por tanto las partículas hidrofílicas serán parte de los relaves; cuando la interface es la superficie de contacto entre un líquido y un gas, las moléculas tenso-activas se agrupan en esta interface, con la parte hidrófila de su molécula dirigida al agua y la parte hidrófoba hacia el gas; provocando una disminución de la tensión interfacial y facilitando la formación de espuma.

#### **1.10.2. Tipos de Hidrofobicidad**

- Hidrofobicidad Nativa o natural. - existen ciertos minerales que tienen hidrofobicidad natural como es el talco, azufre, grafito o molibdeno.
- Hidrofobicidad Inducida. - hace referencia al uso de reactivos colectores que modifiquen las propiedades superficiales de las partículas generando una transición selectiva. (Sutulov, 1963)

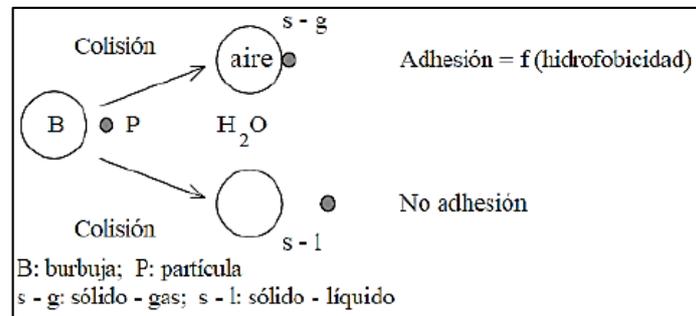


Figura 1. 2: Esquema de adhesión selectiva

Fuente: (Rodríguez, 2011)

De acuerdo a (Rodríguez, 2011), la flotación de diversos minerales va a depender de los reactivos químicos adecuados pues gran parte de las especies minerales pueden ser separadas.

Afinidad de fases

- Superficie hidrófoba  
Es cuando una superficie no es compatible con el agua. Es decir, es compatible con una fase gaseosa.
- Superficie hidrofílica  
Es cuando una superficie tiene correlación con el agua; y no es compatible con una fase gaseosa.

### 1.11. Ecuación de Young

El equilibrio de las tres energías libres interfaciales es uno de los principios básicos de la flotación y estas son:

$$\gamma_{ma} = \gamma_{mw} + \gamma_{aw} (\cos\theta)$$

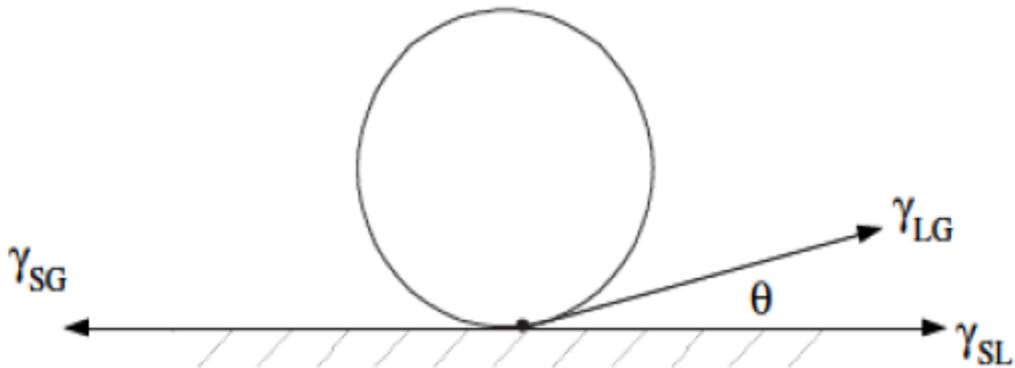


Figura 1. 3: Ángulo de contacto de las fases aire, agua y superficie mineral

Fuente: (Brant, 2002)

Dónde:

$\theta$ : ángulo de contacto

$\gamma_{ma}$ : Energía interfacial mineral-aire

$\gamma_{mw}$ : Energía interfacial mineral-agua

$\gamma_{aw}$ : Energía interfacial aire-agua

Las tres fases sólido (mineral), líquido y gas al estar en contacto establecen un equilibrio entre la tensión interfacial sólido-gas, sólido-líquida y líquido-aire.

Estas fuerzas se encuentran en balance y podrían ser alteradas por cualquier factor que cambie su tensión superficial por lo que es necesario que se forme un ángulo de contacto. El ángulo de contacto nos indica el grado de contacto entre las burbujas de aire y las superficies sólidas.

Por tanto, durante la flotación se produce una interface mineral-aire con la destrucción simultánea de las interfaces agua-aire y mineral-agua de la misma área. Entonces para que se cumpla la adhesión de una burbuja a una partícula mineral debe darse que:

$$\gamma_{ma} - \gamma_{mw} < \gamma_{aw}$$

Cuando los sólidos tienen una alta energía de superficie ( $Y_{ma}$ ) como son metales, el ángulo de contacto debe ser pequeño y el área de contacto entre el sólido y el aire será pequeño por lo cual el líquido humedecerá al sólido. Dentro de la flotabilidad de minerales es de gran importancia el ángulo de contacto por lo que se puede determinar qué tipo de partícula es hidrófoba y cual es hidrófila.

La interfaz que se da entre el mineral y el aire está dada por la siguiente ecuación:

$$\Delta Y = Y_{ma} - (Y_{mw} + Y_{aw})$$

$\Delta Y$  es el trabajo de adhesión que se da entre el aire y la superficie del mineral es decir entre la burbuja y la partícula; para que se de esta adhesión debe ser negativo el cambio de energía libre dándose la siguiente ecuación:

$$\Delta Y = Y_{aw} (\cos \theta - 1)$$

El incremento del ángulo de contacto producirá que las fuerzas de adhesión sean mayores entre las burbujas y las partículas. La adsorción se refiere a una concentración alta de cualquier componente en la superficie de una fase sólida o líquida presente en la pulpa. Por tanto, la adsorción de químicos sobre la superficie del mineral debe ser realizada de manera selectiva haciendo que solo la superficie del mineral valioso se convierta en hidrofóbica mientras que la ganga se mantenga hidrofílica.

### **1.12. Potencial Zeta**

La potencial zeta es una medida de la magnitud de la repulsión o atracción electrostática (o de carga) entre las partículas, y es uno de los parámetros fundamentales que se sabe que afectan la estabilidad. Su medición aporta información detallada de las causas de la dispersión, agregación o floculación, y se puede aplicar para mejorar la formulación de dispersiones, emulsiones y suspensiones. (Bustamante M. O, 2008)

La velocidad de la introducción de nuevas formulaciones es la clave para el éxito del producto. La medición de la potencial zeta es una de las formas de acortar las pruebas de estabilidad mediante la disminución del número de formulaciones candidatas, con el fin de reducir el tiempo y los costos de las pruebas, así como mejorar la vida útil.

En el tratamiento del agua, el monitoreo de la dosificación con mediciones de potencial zeta puede reducir los costos asociados al uso de los aditivos químicos mediante la optimización del control de la dosificación en tiempo real.

El principio de determinación de la potencial zeta es muy simple. Se aplica un campo eléctrico controlado a través de electrodos dentro una suspensión de una muestra; esto provoca que las partículas cargadas se muevan por el electrodo de polaridad opuesta, haciendo que las fuerzas viscosas que actúan en la partícula en movimiento tiendan a oponerse a este movimiento. “Habiendo un equilibrio entre ambas fuerzas de atracción electrostática y la resistencia de viscosidad.” (Lentech., 2012)

$$\delta = \frac{4\pi\eta}{\epsilon} * U * 300 * 1000$$

(Lentech., 2012)

Dónde:

$\delta$  = Potencial Zeta (mV)

$\eta$  = Viscosidad de la solución

$\epsilon$  = Constante dieléctrica

U = Movilidad Electroforética

$$U = \frac{v}{V/L}$$

Dónde:

U = Movilidad Electroforética

v = Velocidad de la partícula en cm/sg

V = Voltaje en voltios

L = Distancia de Electrodo

### **1.12.1. Adsorción**

Durante la adsorción se produce una colección de átomos, iones, líquidos o sólidos disueltos atrapados en una superficie. “La presencia de gotas formadas en líquidos disminuye la tensión superficial haciendo que el área de contacto sea menor.” (Guedez J, 2007).

De acuerdo a las características señaladas, el proceso de adsorción se presta para un trabajo de separación en partículas muy finas, las cuales pueden ser mantenidas en su forma original o a su vez generadas por procesos de molienda o trituración hasta llegar al punto en el que la adsorción puede desarrollar su trabajo en el área seleccionada.

### **1.12.2. Coalescencia**

Implica un proceso a través del cual dos dominios de fase de composición esencialmente idéntica entablan un contacto y forman un dominio de fase mayor, estableciéndose una optimización de la superficie para minimizar el gasto de energía. (Guedez J, 2007)

Se trata de un proceso en el cual varios elementos o materiales con características físicas o químicas similares se juntan para obtener un recurso de mayor envergadura, es decir se emplea una técnica que evita la separación en partículas muy pequeñas, concentrándose en un producto mayor, efectivamente, logrando una optimización en el uso de recursos y por su puesto en el producto final recolectado.

### **1.12.3. Emulsificación**

Opuesto a la coalescencia es la descomposición de un dominio, formado dos dominios particulares. Consiste en la mezcla de dos líquidos diferentes que no se pueden mezclar es decir son inmiscibles entre sí, uno de los líquidos formará la fase dispersa que es el líquido dispersado dentro del otro líquido conocido como dispersante.

### **1.12.4. Ascenso Capilar**

“Los sólidos hidrofóbicos tienen baja energía superficial y los hidrofílicos una alta energía libre superficial; por tanto, la energía libre superficial entre los sólidos – líquidos – gases determina la adhesión de partículas minerales a las burbujas de aire creadas.” (Guedez J, 2007)

Se puede también trabajar, utilizando el método de ascenso capilar, gracias a la posibilidad que ofrece para utilizar energía sólida, líquida o gaseosa en la captura y separación de partículas

determinadas y requeridas, es decir dependiendo de las características físicas y químicas se puede trabajar creando burbujas en las cuales se encapsulan las partículas y flotan hacia la superficie, dando la posibilidad de generar un proceso óptimo de separación de cada uno de los materiales que son objeto de recolección.

### **1.13. Flotación en columna**

El desarrollo de técnicas y tecnología de flotación están asociados estrechamente a la mejora en las máquinas de flotación; esto sucede porque para reforzar estos procesos se requiere de la creación de máquinas de este tipo, altamente productivas. Los requerimientos actuales en el campo de aireación de la pulpa y las teorías de mineralización de burbujas imponen el diseño de máquinas de flotación neumática tipo columna, las cuales presentan mejor desempeño que las celdas de flotación convencionales, particularmente cuando se trabaja con partículas finas (Metodi, 2002).

Los principios de fisicoquímica de superficie aplicados a la flotación en celdas convencionales son aceptados para la flotación en columna.

La flotación en columna desarrollada para la separación de partículas finas y ultra finas combina elementos de fisicoquímica de superficies tradicionales con elementos de la mecánica de fluidos, haciendo relación a la disminución de turbulencia en las celdas. La columna de flotación diseñada por (Rubinstein, 1995), se basa en el flujo a contracorriente entre las burbujas de aire y pulpa; sabiendo que las partículas descienden desde la parte superior a través del sistema de alimentación estas colisionarán con las burbujas que ascienden desde la parte inferior. Los mismos principios de fisicoquímica de superficie que se aplica a la flotación en celdas convencionales son válidos para la flotación en columna, siendo la cinética de flotación mucha más rápida en esta última, de esta manera las partículas hidrofílicas son adheridas a las burbujas las cuales ascienden y removidas como concentrado. (Rubinstein, 1995)

En la columna de flotación el tipo de movimiento relativo entre partículas y burbujas es el factor de mayor peso que gobierna la probabilidad de unión burbuja y partícula, de la carga de las burbujas, del índice de flotación y del requerimiento de energía del proceso.

El flujo contracorriente de las burbujas y las partículas permite mejores condiciones de unión burbuja-partícula y su estabilidad en el proceso, la probabilidad de la colisión está determinada por el valor del componente normal de velocidad relativa, el tiempo de contacto y magnitud de

las fuerzas de inercia; la velocidad relativa de partículas y burbujas en la contracorriente es de alrededor de 10 a 12 cm/sg para un índice de flotación de 2 cm/sg, logrando un tamaño de burbuja de 1,5 a 2,5 mm. (Rubinstein, 1995)

Existen características importantes que definen a la flotación en columna como es la relación entre el diámetro y la altura de la columna; el sistema de generación de burbujas y el uso de una ducha desde la parte superior. (Cruz, 1997)

La flotación convencional tiene un gasto energético excesivo al hacer uso de una agitación mecánica, y con la diferencia de que las burbujas y las partículas se desplazan a la misma dirección esto hace que no se puedan unir con facilidad.

De acuerdo a las evaluaciones técnicas entre la flotación en columna y la flotación convencional existen varias ventajas como son:

- Instalación económicamente rentable
- Menor costo de operación
- Bajo consumo de energía para la generación de burbujas,
- Menor ocupación de espacio.

El incremento de una flotación activa por burbujas de aire está en dependencia del tiempo de acondicionamiento, es decir, el intervalo entre el momento de formación y mineralización de la burbuja.

## **1.14. Propiedades de los procesos de flotación en columna**

### **1.14.1. Propiedades interfaciales**

En el proceso de la flotación la distribución de agentes de superficie activa sobre la superficie de la burbuja, “La densidad de la carga y el potencial eléctrico son fundamentales en la relación burbuja vs solución; por tanto, estas propiedades afectan los mecanismos de adhesión de las burbujas a las superficies.” (Laskowski & Ralston, 1992)

Si bien el uso de ciertos elementos que potencializan la flotación de ciertas partículas como parte de la separación de elementos, debe tener en cuenta las propiedades interfaciales como la

densidad de la carga y el potencial eléctrico, para adaptar o calibrar la intensidad del método utilizado y así mejorar el costo beneficio de todo el proceso.

#### **1.14.2. Adhesión de burbuja y partícula**

De esta propiedad depende la recuperación mineral que se obtenga del sistema, la adhesión de la partícula a la burbuja es el resultado de una serie de etapas repetitivas. Para que una partícula pueda ser colectada por una burbuja debe haber las siguientes condiciones:

- Colisión entre partícula-burbuja
- Formación de un agregado entre la burbuja y la partícula
- El agregado debe estar fuertemente consolidado para que no se destruya dicha formación.

De acuerdo a estudios realizados por (Rubinstein, 1995) se demuestra que se obtienen varias ventajas al reducir el tamaño de las burbujas, teniendo un tamaño de partícula constante; esto provocaría una colisión de burbuja y partícula con mayores probabilidades.

#### **1.14.3. Colección de partículas por burbujas**

La hidrodinámica del flujo alrededor de la burbuja será la que permita una colisión óptima entre la burbuja y la partícula; estará en función de los tamaños de partículas y burbujas. En contracorriente, la probabilidad de colisión partícula-burbuja es mayor debido al gran volumen de aireación de la celda y al largo camino que las burbujas y partículas deben de realizar. La contracorriente de pulpa y aire produce una reducción en el crecimiento de la velocidad de ascensión de la multitud de burbujas, lo que incrementa el tiempo de retención de la pulpa, sin remolinos y menor tiempo de turbulencia el flujo de pulpa en la columna, las fuerzas de inercia que producen la separación de partícula y burbuja son insignificantes. (Rubinstein, 1995)

### **1.15. Zonas de la columna de flotación**

#### **1.15.1. Zona de colección**

En esta zona se produce el contacto de partícula y burbuja, en donde el material a flotar es colectado formando agregados entre partícula-burbuja; por otra parte, el material el material rechazado en la zona de espuma puede ser colectado nuevamente por las burbujas que continúan ascendiendo. Es la región que se extiende desde la tobera de inyección o alimentación hasta los difusores de aire.

### 1.15.2. Tiempo de residencia medio de pulpa

El tiempo medio de residencia medio de la pulpa dentro de la columna de obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$T_{rpulpa} = \frac{(H - H_f)(1 - \epsilon_g)}{V_c}$$

(Chuck, 2005)

En donde:

$V_c$  : Velocidad superficial de las colas.

$H_f$ : Altura de la espuma.

H: altura total de la columna.

$\epsilon_g$ : Valor constante entre 15% o puede oscilar entre 5% a 25% de acuerdo a Finch y Salas.

### 1.15.3. Zonas de la columna de flotación

- Zona de limpieza fase espuma: se extiende hacia arriba desde la interface pulpa-espuma hasta el rebalse de la columna.
- Zona de limpieza fase pulpa-espuma: región de longitud arbitraria en la interface pulpa-espuma, ubicada sobre y por debajo de dicha interface, a esta región se le asigna el espacio entre 0.15 m sobre la interfaz 0.15 m por debajo de la interfaz.
- Zona de limpieza fase pulpa: región que se extiende hacia abajo desde la interface pulpa espuma hasta la tobera de inyección del material de alimentación.
- Zona de colección, región que se extiende hacia abajo desde la tobera de inyección o alimentación hasta los difusores.

(Rubinstein, 1995)

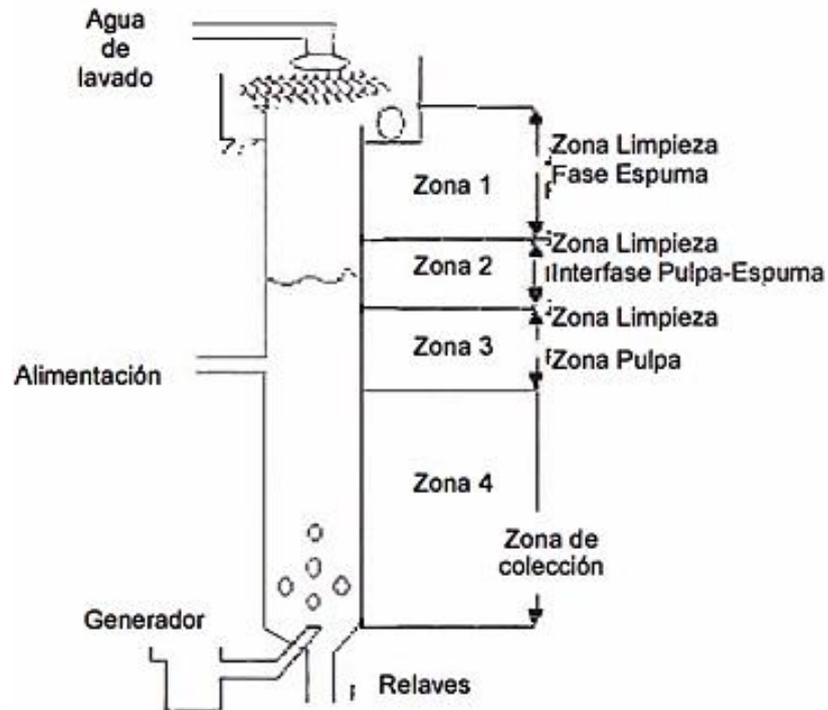


Figura 1. 4: Zonas de la columna de flotación

Fuente: (Rubinstein, 1995)

#### 1.15.4. Aireación de la celda

La inyección de aire es parte fundamental de la celda, se realiza mediante inyectores internos o externos para mejorar la producción del enjambre de burbujas y el tamaño de las mismas.

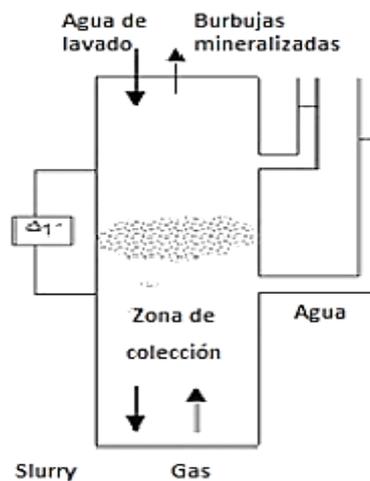


Figura 1. 5: Presión de gas

Fuente: (Rubinstein, 1995)

“El control de aire en la celda se crea midiendo el tiempo que se mantiene en el interior de la misma, lo que en inglés se llama holdup, que se define como la fracción de aire presente en la pulpa de cualquier celda de flotación expresada en porcentaje.” (Sierra García, 1987)

La cantidad, la frecuencia, así como la presión del aire que se incorpora en el proceso de flotación de partículas dependerá de las características de los elementos para controlar el flujo de burbujas de una manera eficiente, que no sea débil pero tampoco exceda las necesidades o requerimientos, esta calibración permite obtener resultados óptimos con menor consumo de energía, sin embargo, el control debe ser permanente y sistemático para garantizar resultados estables.

Se determina implementando dos visores: uno en la parte inferior y otro en la parte superior de la columna, así la diferencia de niveles a través de dichos visores debe ser proporcional al aire contenido dentro de la celda.

#### **1.15.5. Agua de lavado**

El perfil de la espuma en la celda-columna, es una zona muy importante del proceso de flotación; la forma y calidad de espuma son factores importantes en la eficiencia del proceso.

En la celda-columna el agua de lavado tiene funciones muy importantes:

- Formar el bias. (Relación entre flujo de relave y flujo de alimentación)
- Mantener el nivel de pulpa y espuma
- Limpiar el concentrado.
- Lubricante de las partículas minerales.

(Socolich Guzmán, 1988)

### **1.16. Factores influyentes en la flotación Columnar**

#### **1.16.1. Relación altura-diámetro**

El tiempo de retención requerido dentro de la columna y la cantidad de material en alimentación permitirá determinar el volumen de la celda de flotación, permitiendo estos dos factores darnos una relación entre la altura y el diámetro correcto para la colección del mineral. (Metodi, Column Flotation Cell Operating and Maintenance, 2002)

La relación entre la altura y el diámetro de la columna de flotación, es decir, la geometría de la columna debe estar en absoluta correspondencia al tiempo que se requiere para que se produzca una adecuada alimentación de material que se aplica al proceso de flotación y por su puesto a la separación, es decir no todas las celdas o columnas deben tener la misma geometría, dependiendo de los materiales se requiere más o menos tiempo para obtener los mismos resultados. (Rubinstein, 1995)

Por otro lado, al tener dos variables como es el diámetro y la altura se puede obtener volúmenes idénticos con distintas geometrías, determinadas por el mismo tiempo de retención.

### **1.16.2. Concentración de gas**

“La inyección de aire en una columna de líquido, sufre un desplazamiento; la fracción volumétrica desplazada es llamada gas holdup y se refiere a la fracción volumétrica ocupado por el gas en cualquier punto de la columna.” (Metodi, Column Flotation Cell Operating and Maintenance, 2002)

Para medir la concentración de gas ( $\epsilon_g$ ) se puede realizar midiendo el total de altura alcanzado por efecto del desplazamiento de aire.

La velocidad superficial del gas es la cantidad de flujo volumétrico del material dividido en el área de la sección transversal de la columna esta variable permite la evaluación de las características de funcionamiento de la columna, independientemente de su diámetro. Este parámetro es dependiente de otras variables como la velocidad volumétrica de aire, el tamaño de burbujas, la densidad de la pulpa, la carga de sólidos en las burbujas y velocidad de la pulpa. El incremento del  $\epsilon_g$  reduce el tiempo de residencia en la zona de colección.

Un incremento en el flujo de gas incrementará el número de burbujas presentes en la columna de modo que más burbujas se generen en un mismo periodo de tiempo.

Una disminución en el tamaño de burbuja causado por la operación del compresor o dosificación del espumante causará que cada burbuja suba más lentamente a través de la pasta

Un valor típico de la concentración de gas  $\epsilon_g$  es 0,15 (ó 15%), pero puede oscilar entre 0,05 y 0,25 (5% a 25%) (FINCH, 1990)

### **1.16.3. Tamaño de partícula y generación de burbujas**

El tamaño promedio de las burbujas y la distribución de sus tamaños afectan la cantidad máxima de gas, la probabilidad de coleccionar partículas sobre la burbuja y la capacidad de arrastre de sólidos por el gas. Dependiendo de las condiciones de los reactivos, el diseño del burbujeador y la presión de operación las burbujas usadas típicamente tienen entre 0,8 y 1,6 mm de diámetro. (RUBIO & TESSELE, 2001)

La generación de burbujas es directamente proporcional al tamaño de la partícula que debe sujetarse a la flotación, es decir, a mayor tamaño de la partícula, mayor generación de burbujas y viceversa.

### **1.16.4. Bias**

Es usado para describir el flujo total de agua por medio de la zona de limpieza, se calcula como el contraste neto entre el flujo volumétrico de pulpa en las colas y el flujo volumétrico de la rata de alimentación de la pulpa, fraccionada por el área de la sección transversal de la columna. (CHUK, CIRIBENI, & GUTIÉRREZ, 2005)

### **1.16.5. Caudal de aire**

La máxima cantidad de aire que una columna es capaz de soportar está determinada por:

- El volumen de alimentación debe ser menor que la velocidad de subida de las burbujas. Una distribución de tamaños de burbujas es producida por cualquier sistema de aireación, se debe tener en cuenta que el volumen de alimentación de la pulpa supera la velocidad de ascenso de la burbuja más pequeña, un porcentaje de aire suele perderse en las colas.
- La densidad de la zona de recolección debe ser más grande que la densidad de la zona de espuma. Cuando la cantidad de gas de la columna se incrementa, la densidad de la zona de colección disminuye; a la vez, la densidad de la zona de espuma se incrementará hasta que las dos sean iguales.
- La coalescencia de burbujas no debe formar bolsones de aire. El incremento de la turbulencia y las burbujas más grandes formadas a altas cantidades del gas causan un aumento en la coalescencia de las burbujas que resulta en una disminución en el incremento de la concentración de gas ( $\epsilon_g$ ). (FINCH, 1990)

- El caudal del aire, su control sistemático y continuo a través del manómetro de presión hace que el proceso de flotación sea completamente eficiente y efectivo en la medida en que se han tomado todas las previsiones de acuerdo al volumen de pulpa en alimento.

### **1.17. Flotación Tipo Denver**

La celda Denver es una de las más utilizadas en laboratorios experimentales, y pueden ser de banco de flujo abierto o estar divididos en celdas, son de tipo mecánico y versátil para modificar circuitos manteniendo una recirculación homogénea de la pulpa a través del impulsador. (SUÁREZ CÁRDENAS, 2005)

La celda Denver trabaja con celda auto-aireada. La celda auto-aireada sirve para aspirar y dispersar el aire en la pulpa, siendo esencial para la flotación, utiliza una válvula reguladora de acción manual o automática para medir el volumen necesario de aire.

Para una flotación adecuada se debe tener presente la capacidad de la celda, obteniendo una alimentación constante con el porcentaje de mineral líquido y los reactivos. (Paredes Espinal, 2011)

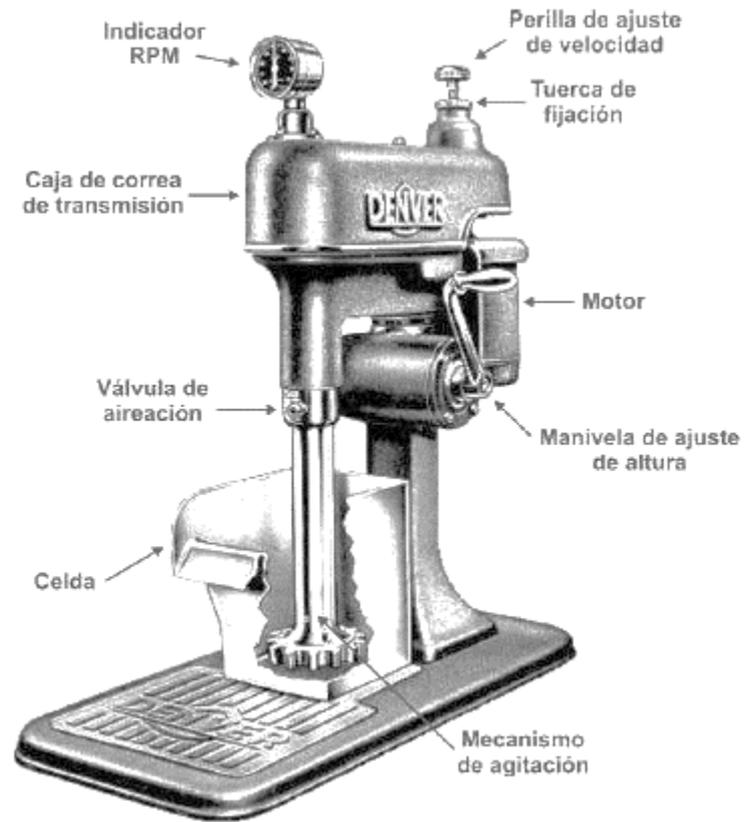


Figura 1. 6: Celda Denver  
Fuente: (Sutulov, 1963)

## CAPITULO II

### 2. DISEÑO-CONSTRUCCIÓN Y PARAMETROS OPERACIONALES

#### 2.1. Caracterización del material

El material proviene de la mina perteneciente a Somilor S.A. la cual está en la zona occidental del Distrito Azuay. El material es de tipo polimetálico de origen hidrotermal por lo que se encuentra una importante presencia de oro, plata, plomo, cobre y zinc. El material es conocido por su presencia en vetas, brechas y stockworks epi-mesotermales que se desarrollan en las rocas de caja volcánica relacionados con pórfidos. Por lo que el mineral de interés se encuentra entre sulfuros como son calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), pirrotita ( $\text{FeS}$ ), pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y arsenopirita ( $\text{AsFeS}$ ); los cuales deben ser tratados para la obtención del mineral de interés Au.

En el sitio se encuentra un conjunto predominante de rocas volcánicas, andesitas y basaltos contenidos en la Unidad Pallatanga. La exposición del material en los frentes de trabajo es de basaltos verdes, stockworks irregulares de epidota, cuarzo y diorita. La mineralización y alteración hidrotermal es una consecuencia basáltica de la Unidad Pallatanga en donde se encuentran cuerpos de cuarzo-diorita a micro-tonalita porfídica.

Al material proveniente de la mina en la Planta de Beneficio Somilor S.A. se le da un tratamiento previo a la flotación que es el siguiente:

#### 2.2. Selección del Mineral

En esta etapa se da una selección de rocas que no presentan mineral, consideradas como estéril; estas rocas son retiradas de manera manual del circuito y evacuadas hacia la escombrera por medio de vagones. Por otra parte, el material seleccionado como valioso es ingresado en tolvas de acumulación, donde el mineral cae sobre una parrilla con abertura de 20 cm; evitando el paso de la roca de tamaño excesivo y así el material que cumple con la dimensión adecuada para por la parrilla y sigue hacia el proceso de conminución.

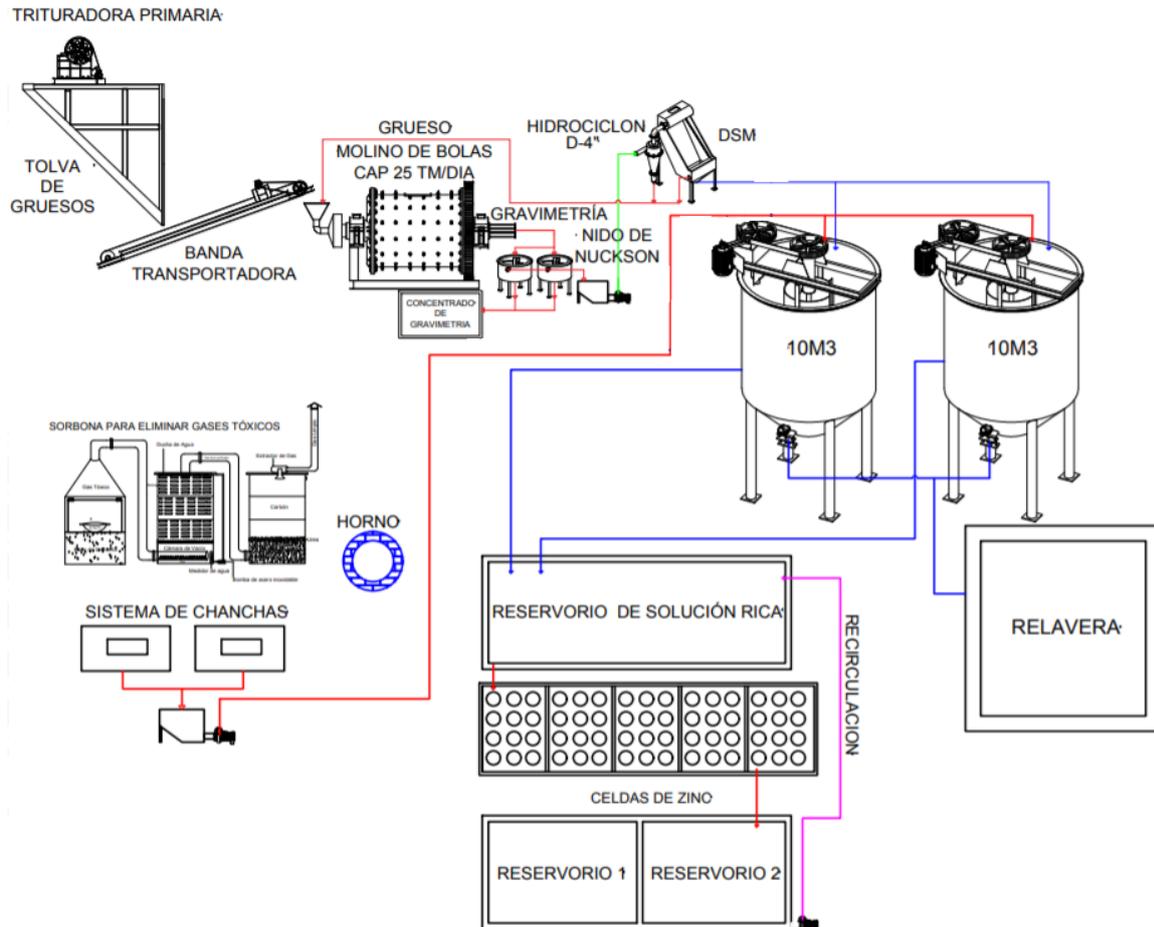


Figura 2. 1: Circuito de Selección Mineral  
Fuente: Somilor S.A.

### 2.3. Trituración, molienda y clasificación del material

La planta cuenta en su totalidad con doce molinos de arrastre (chilenos) y un nuevo circuito de dos molinos de bolas.

#### 2.3.1. Trituración Primaria

Primera etapa donde se realiza la reducción de tamaño del mineral, el tamaño inicial depende del tipo de minado, acarreo, transporte y de la escala de la explotación (de él depende a su vez, el dimensionamiento y el diseño del equipo de chancado).

La trituradora de mandíbulas consta de una cámara de chancado, donde una mandíbula móvil es impulsada por un mecanismo excéntrico, que ejerce una presión elevada sobre los trozos de mineral, hasta exceder su límite de ruptura.

### **2.3.2. Trituración Secundaria**

Segunda etapa donde se realiza la reducción de tamaño del mineral, en esta etapa se recibe el material que paso por la trituración primaria, para continuar con el proceso de reducción de tamaño.

La trituradora cónica, funciona en un circuito cerrado utilizando una zaranda hasta alcanzar el tamaño óptimo de alimentación para los molinos. Las exigencias que debe tener el material para seguir con el proceso de molienda fina debe de ser de un tamaño no mayor  $\frac{1}{2}$ , y se almacenera mediante bandas trasportadoras en las tolvas para finos.

### **2.3.3. Molienda**

Tercera etapa para la seguir el proceso de conminución, consiste en la reducción del tamaño de las partículas hasta alcanzar la granulometría óptima para la liberación de la mayor parte de los minerales metálicos en forma de partículas individuales recuperables en primera instancia por concentración gravimétrica (las partículas más pesadas) y luego por flotación las partículas restantes.

En SOMILOR S.A, existen dos sistemas de molienda, el primero es el sistema antiguo que consta de doce molinos de arrastre de 4 ruedas cada uno, 4 de ellos son catalogados como un sistema auxiliar en caso de mantenimiento o fallas operativas, además se acondicionara este sistema de molienda para en un futuro pueda ser utilizado como un sistema de molienda de alquiler, con una capacidad promedio de 240 ton/día. El segundo sistema, consta de dos molinos de bolas, el uno es de 6 pies de diámetro por 12 pies de largo, con una capacidad máxima instalada de 200 ton/día y el otro molino de 5 pies de diámetro por 10 pies de largo con una capacidad máxima instalada de 120 ton/día, con la proyección de ampliación para la instalación de un tercer molino al sistema de conminución.

### **2.3.4. Cuarteo de material**

Este proceso consiste en obtener una pequeña muestra que represente el total del material, para ello es necesario homogenizar el material previamente molido. Para el cuarteo se introduce en el cuarteador por medio de una tolva de manera uniforme haciendo que el material caiga por los conductos en cantidades semejantes, esto se lo realiza a velocidades constantes de forma que el material llegue a los receptáculos.



Ilustración 2.3.1 Cuarteo material

### 2.3.5. Análisis Granulométrico

De acuerdo a las muestras obtenidas del material se sabe que son cuerpos irregulares por lo que no es posible tomar sus dimensiones. Por tanto, se identifican de acuerdo a su diámetro nominal ( $d_n$ ). Este diámetro se establece mediante tamices y en porcentajes ya que no se puede establecer el tamaño de cada partícula. Los tamices cuantifican el tamaño de la muestra entonces se hizo pasar el material por una columna de tamices normalizados y numerados de mayor a menor. El material utilizado para las diferentes pruebas de flotación es el resultante de la malla 200 del tamiz.

### 2.3.6. Análisis Mineralógico

- El análisis mineralógico es mediante el método de fundición y copelación. Los minerales polisulfurados contienen una mezcla de varios metales y forma de sulfuros. La calcopirita ( $CuFeS_2$ ), pirrotita ( $FeS$ ), pirita ( $FeS_2$ ), galena ( $PbS$ ) y arsenopirita ( $AsFeS$ ), son los sulfuros más comunes encontrados en yacimientos auríferos; durante el ensayo al fuego estos sulfuros interfieren en la recuperación de metales de interés, por esta razón se usan diferentes químicos como son el Óxido de Plomo, Bórax, Carbonato de Sodio y Sílice; estos permiten oxidar a los sulfuros y recuperar al metal útil.

## 2.4.FLOTACIÓN EN CELDAS DENVER Y COLUMNAR

En los dos procesos de flotabilidad se mantendrán parámetros como es los tipos de reactivos a usar y las condiciones del material.

### 2.4.1. Reactivos

Los reactivos usados para la flotación tanto Columnar como en la celda Denver son los mismos de manera que estén bajo los mismos parámetros.

### 2.4.2. Preparación de reactivos

La dosificación adecuada de los reactivos es fundamental para la formación de burbujas y flotación del mineral. Los colectores y espumantes usados en los dos experimentos serán los mismos variando la dosificación de acuerdo al volumen de cada celda de flotación.

Los reactivos que han sido usados son:

- Espumante:

Los espumantes son químicos orgánicos solubles en agua localizados en una interface aire y agua, determinados como moléculas heteropolares, un grupo polar que es soluble en agua y otro no polar hidrocarbonado. (Vargas, 2016) Su estructura química es la siguiente:

Producto	Espumante
Fórmula Química	$\begin{array}{ccccccc} \text{CH}_3 & -\text{CH} & -\text{CH}_2 & -\text{CH} & -\text{CH}_3 \\ &   & &   & \\ & \text{CH}_3 & & \text{OH} & \end{array}$
Nombres Comerciales	Aceite de pino, Cresoles, Éter glicol, Fenoles.

Fuente: (Renasa, 2017)

- *ER-350*

Este espumante se lo agregó puro debido a sus propiedades de selectividad en circuitos de flotación de Au, Cu y Ag, su principal propiedad es la aptitud para reducir la tensión superficial del agua. Se debe considerar que al agregar en cantidades excesivas el reactivo arrastrará la ganga y el mineral. (Vargas, 2016). El espumante ER-350 permite flotar el mineral luego de haber agregado el colector necesario, es insoluble en agua por lo que genera espuma para dejar dentro de la celda los relaves de proceso de concentración y sobrepasar dicha celda adicionando oxígeno.

- **Collectores:**

En los procesos de flotación el colector permite atrapar al metal de interés por tanto son decisivos, como lo indica (Yianatos, 2005) los colectores son moléculas o iones orgánicos que son adsorbidos selectivamente sobre superficies del mineral para que en equilibrio exista una adherencia entre las partículas y burbujas.

Los colectores pueden ser cationes o aniones, por tanto, integran una parte polar y una apolar de manera que la parte polar adsorbe con el mineral y la no polar se introduce en la corriente de agua formando así parte de la ganga. (Yianatos, 2005)

- *Xantato Amílico de Potasio Z-6*

Los Xantatos son reactivos químicos derivados de ácido carbónico, se da cuando dos de oxígeno son reemplazados por el azufre e hidrogeno, es decir por un grupo alquil. Los xantatos son reactivos solubles en agua los cuales se usan en concentraciones del orden del 5 al 20% en relación a su peso. El Xantato Z-6 es un reactivo muy usado en la minería polimetálica para la concentración de oro, plata y cobre. (Yianatos, 2005)

<b>Producto</b>	<b>Xantato Amílico de Potasio</b>
Fórmula Química	$\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \overset{\text{S}}{\underset{  }{\text{O}}} - \text{C} - \text{SK}$
Nombres Comerciales	Comercializado como Z-6 (Dow Chemical), Aero 350 (American Cyanamid), CX-51 (Canadian Ind. Ltd.) y PAX-Amilxantato potásico (Hoechst).

Fuente: (Renasá, 2017)

Al ser soluble en agua para su uso en las pruebas de laboratorio fue preparado en proporciones 10/100 aplicando así Xantato Z-6 al 10%.

En todos los procesos fue agregado durante el acondicionamiento después de que el pH ya ha sido regulado dado que el reactivo puede descomponerse en medios ácidos.

Cálculo de dosificación:

$$\frac{10gr}{t * 1000kg/1t} * 0,1kg = 0,001$$

Donde se determina que:

10 gr	Dosificación del reactivo
0,1 kg	Cantidad de pulpa
1 t	Tonelada



Ilustración 2.4.1 Xantato Amflico de Potasio Z-6

➤ *Ditiofosfato AR-1404*

Es usado para la flotación de minerales como Au, Ag y Cu; tiene un pH de 10 a 13. Este colector no tiene propiedades espumantes. (Vargas, 2016)

La estructura química del ditiofosfato es:

Producto	Ditiofosfato
Estructura Química	$  \begin{array}{c}  \text{RO} \\  \diagdown \\  \text{P} \\  \diagup \\  \text{RO}  \end{array}  \begin{array}{c}  \text{S} \\  \diagup \\  \text{SME}  \end{array}  $
Dónde: ME-átomo de hidrógeno.	

Su cálculo de dosificación es el siguiente:

$$\frac{10\text{gr}}{\text{t} * 1000\text{kg}/1\text{t}} * 0,1\text{kg} = 0,001$$



Ilustración 2.4.2 Ditiofosfato AR-1404

➤ *Ditiofosfato AR-1242*

Este colector debe ser agregado por etapas durante la flotación, tiene bajas propiedades espumantes. Se lo puede emplear de forma pura. Es usado para mejorar las condiciones de pH de la pulpa. (Vargas, 2016). Su estructura química es:

Producto	Ditiofosfato
Estructura Química	$  \begin{array}{c}  \text{RO} \quad \text{S} \\  \diagdown \quad // \\  \text{P} \\  \diagup \quad \backslash \\  \text{RO} \quad \text{SME}  \end{array}  $
Dónde: ME-átomo de hidrógeno.	

Cálculo de dosificación:

$$\frac{10gr}{t * 1000kg/1t} * 0,1kg = 0,001$$



Ilustración 2.4.3 Ditiofosfato AR-1242

### 2.4.3. Regulador de pH

Para que se dé una flotación selectiva de los minerales de interés es necesario tener una correcta regulación de pH. La variación de pH debe ir de 8 a 14 debido a la presencia de minerales sulfurados como es la pirita, arsenopirita o pirota. (Renasa, 2017) El uso de Hidróxido de Calcio o Cal (CaO), permite regular el pH por lo que durante el acondicionamiento del material se agregó pequeñas cantidades, alrededor de 0,018 gr. Permitiendo así mayor eficacia de los colectores.

### 2.4.4. Cálculo de pulpa

Se realizó el cálculo del porcentaje de sólidos y líquidos que se debe ingresar en cada una de las celdas de flotación, este procedimiento es fundamental para luego del acondicionamiento del material conocer las cantidades precisas de dosificación de reactivos que se deben agregar.

Tabla 2.1: Cálculo de pulpa

CELDA DENVER			
VOLUMEN CELDA			
Vcelda =	0,001 m <sup>3</sup>		
Porcentaje de solidos en pulpa			
$\%s = \frac{2,6(\rho_p - 1)}{\rho_p(2,6 - 1)}$	$\%s = \frac{2,6(1,25 - 1)}{1,25(2,6 - 1)}$		
$\%s =$	0,325	32,5%	
Masa de pulpa			
$m_p = \rho_p(v_{celda})$			
Unidades	ton	kg	gr
$m_p =$	0,00125	1	1000
Masa del sólido			
$m_s = (\%s)(m_p)$	$m_s = (0,325)(0,0012)$		
Unidades	ton	kg	gr
$m_s =$	0,0003	0,3	300
Volumen de agua			
$m_{H_2O} = m_p - m_s$			
$m_{H_2O} =$	700 gr		
	m <sup>3</sup>	l	
$V_{H_2O} =$	0,0007	0,7	

CELDA COLUMNAR			
VOLUMEN CELDA			
A =	0,015 m <sup>2</sup>		
Vcelda =	0,015 * 1,50	0,021 m <sup>3</sup>	
Porcentaje de solidos en pulpa			
$\%s = \frac{2,6(\rho_p - 1)}{\rho_p(2,6 - 1)}$	$\%s = \frac{2,6(1,25 - 1)}{1,25(2,6 - 1)}$		
$\%s =$	0,325	32,5%	
Masa de pulpa			
$m_p = \rho_p(v_{celda})$	$m_s = (1250)(0,021)$		
Unidades	Kg		
$m_p =$	25		
Masa del sólido			
$m_s = (\%s)(m_p)$	$m_s = (0,325)(25)$		
Unidades	kg		
$m_s =$	7,5		
Volumen de agua			
$m_{H_2O} = m_p - m_s$	$m_{H_2O} = 25 - 7,5$		
$m_{H_2O} =$	17,5		
$V_{H_2O} =$	0,0175 m <sup>3</sup>	17,5 litros	

Donde:

%s: Porcentaje de sólidos

$P_p$ : Densidad de la pulpa

$m_p$ : Masa de la pulpa

$V_{\text{celda}}$ : Volumen de la celda

$m_s$ : Masa del sólido

$V_{\text{H}_2\text{O}}$ : Volumen de agua

## **2.5.PRUEBAS DE LABORATORIO**

### **2.5.1. Celda Denver:**

Es una celda de tipo mecánico, versátil para modificar circuitos y mantener una recirculación homogénea de la pulpa a través del impulsor. En nuestro caso es una celda de laboratorio auto-aireada. Es decir, el mecanismo de agitación sirve también para aspirar y dispersar el aire en la pulpa. Estas celdas cuentan con una válvula reguladora de acción manual.



Ilustración 2.5.1 Celda Denver de Laboratorio

### ***Procedimiento***

Luego de haber realizado el cálculo de porcentaje de sólidos y líquidos para la celda Denver se han vaciado los 300 gr de material junto con 700 ml de agua. Para que la muestra sea homogénea se acondiciona durante cinco minutos, distribuidos de la siguiente forma:

- Durante los primeros dos minutos el colector es agregado y para que cumpla su función se deja actuar, con la finalidad de que se puedan obtener datos y mediciones del pH y la preparación de los reactivos.
- Después de tres minutos se procedió a agregar el espumante y de inmediato por medio del control de velocidad se aumenta la potencia de 1000 RPM a 1500 RPM.

Posterior al tiempo determinado se recoge por medio de una espátula la espuma mineralizada, para finalizar se reducen las revoluciones por minuto del equipo, se levanta el agitador y se retira la celda que contiene los relaves o colas.



Ilustración 2.5.2 Flotación celda Denver

**Tiempo de flotación:** 10 minutos

**Temperatura:** Ambiente

**pH:** 9

**Colectores usados:**

- Xantato Z-6: 0,15 ml
- Ditiofosfato AR-1242: 0,09 ml
- DitiofosfatoAR-1404: 0,13 ml

**Espumante:**

ER-350: 0,10 ml

**2.5.2. Celda Columnar:**

La columna de flotación fue diseñada y construida en el laboratorio de la Universidad del Azuay, esta columna tiene como finalidad la recuperación de concentrado aurífero proveniente de una mena de sulfuros metálicos.

***Diseño-Construcción***

Los canadienses Pierre Bountin, Remy Tremblay y Don Wheeler fueron los primeros en introducir el concepto de la celda columna con el objetivo de procesar minerales finos y aplicarlos en los circuitos convencionales de flotación.

La columna de flotación construida en el laboratorio de la Universidad del Azuay se diseñó bajo los parámetros descritos por (Rubinstein, 1995), en donde indica que el flujo contracorriente de aire y pulpa permite una mejores condiciones de unión burbuja-partícula y esto una estabilidad al proceso.

De acuerdo con los resultados obtenidos por (Rubinstein, 1995) la contracorriente de pulpa y aire produce una reducción en el crecimiento de la velocidad de ascensión de la multitud de burbujas, lo que permite un crecimiento en el tiempo de retención de la pulpa y optimizando la capacidad específica del compresor; anulando casi por completo los remolinos internos y en si una turbulencia menor en el flujo de la pulpa logrando de esta manera una menor fuerza de inercia que producen la separación partícula-burbuja.

En relación con las columnas de flotación manufacturadas por Column Flotation Co, Cominco Armco Co, Deister Concentrador Co y Dorfner; se diseñó la columna de flotación a nivel de laboratorio manteniendo un régimen de contracorriente donde la alimentación se realiza desde una zona media desde 1/2 a de la altura total de la columna; las colas de descarga se evacuan por la parte inferior de la columna; y una introducción de aire por encima de la zona de descarga de manera que se produzca un flujo en contracorriente entre el alimento y la inyección de aire. El área de la sección con respecto a la altura de la columna (FINCH, 1990), recomienda que esta sea del 10% de la altura total de la columna de flotación.

La alimentación de aire en la columna se da mediante un generador externo en este caso a través de un compresor. El modelo de columna presentado por (Eriez Flotation Division, 2007) presenta que las condiciones de óptimas para una unión partícula-burbuja debe estar dada por una velocidad de flujo de pulpa y presión de aire constante de manera que la microturbulencia se mantenga activa, y para la recuperación de partículas las velocidades de alimentación deben de disminuir mientras que la presión del aire debe aumentar.

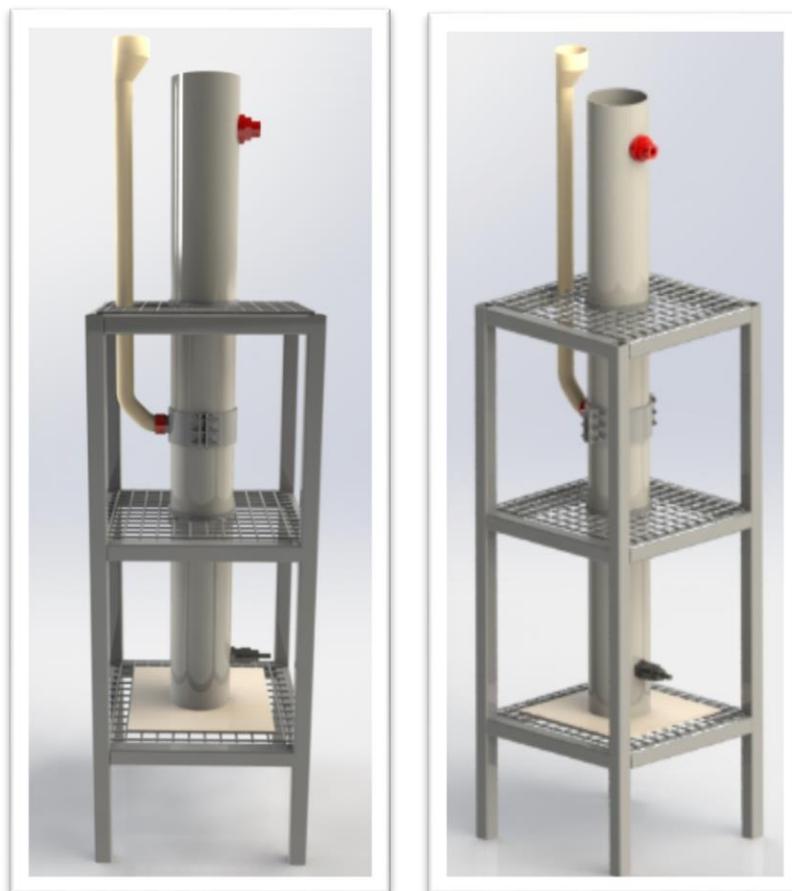


Ilustración 2.5.3 Columna de Flotación

Para el ingreso del material se realizó una perforación en la columna en la parte media y se colocó una tubería de alimento. A los 75 cm de altura.

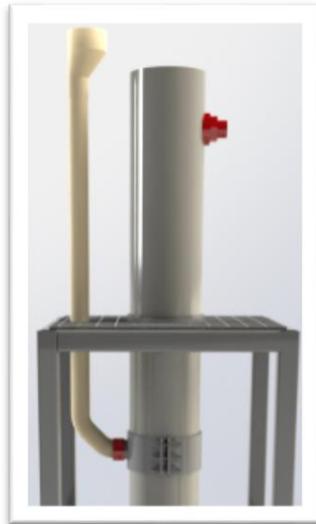


Ilustración 2.5.4 Ingreso de alimento de pulpa

La formación de burbujas está dada por el aire que se insufla dentro de la celda. De acuerdo al diseño de la columna planteado fue necesario perforar la columna de manera que el aire proveniente del compresor sea inyectado desde la zona inferior. (Ilustración 2.9)

Previo al ingreso del alimento de pulpa a la columna el compresor de aire es accionado, realizando una formación de burbujas desde el primer instante. La formación de burbujas debe tener un tamaño ideal para la colección del mineral de interés, de acuerdo a (Finch, 1990) un tamaño ideal de esta es de 1,5 a 2,5 mm. Esto correspondería a una colisión correcta entre burbujas ascendentes y una pulpa descendente. El material de la pulpa es el resultante de la malla 200. Es necesario tomar en cuenta el control de la presión de aire a través del manómetro del compresor. Luego de varias pruebas preliminares se pudo observar que la generación de burbujas está dada por una presión de 1,8 bar para el acondicionamiento de material y se llegó hasta 2,5 bar para la colección de burbujas mineralizadas.



Ilustración 2.5.5 Ingreso de aire comprimido

El agua de lavado tiene la función de romper la burbuja una vez que las mismas han sido colectadas fuera de la celda de flotación, y dejando la parte sólida del concentrado dentro del recipiente de colección.



Ilustración 2.5.6 Recolección de muestra

### **Tanque de acondicionamiento**

Es un tanque que permitirá preparar la pulpa a flotar en la celda columnar, es de poliéster, dispuesto en una estructura de hierro, por la parte de abajo se conecta con una cañería a una bomba que facilita la recirculación de la pulpa.

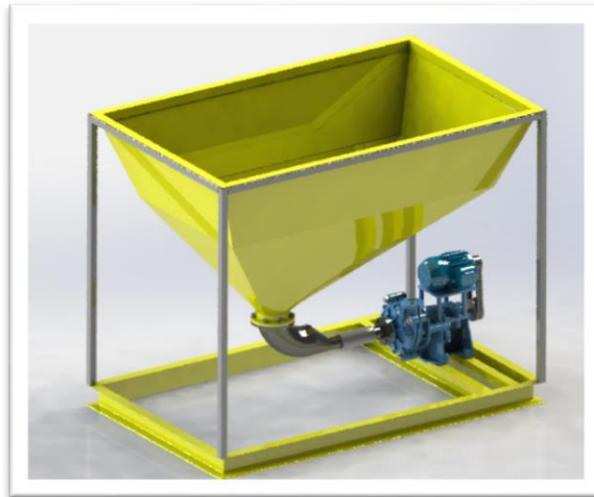


Ilustración 2.5.7 Tanque de acondicionamiento

### **Bomba**

Es un modelo 1.5/1 AH WARMAN PUMP, para pulpas la cual puede mantener un bombeo continuo. Utiliza corriente trifásica. Tiene un motor de 5 caballos (Weir Minerals Division; 2011:2) su función es recircular la pulpa durante el acondicionamiento de esta y luego bombear la pulpa hacia la columna de flotación.



Ilustración 2.5.8 Bomba de sólidos

### **Compresor de aire**

Para la aireación dentro de la columna de flotación se utilizó un compresor de aire Black&Decker HT1967F-B3, con una potencia máxima de 2Hp, una velocidad de 3480 rpm y una presión máxima de 120 psi.



Ilustración 2.5.9 Compresor de aire

### ***Procedimiento***

Previo a la flotación es necesario acondicionar el material a ser flotado para lo cual se utilizó el tanque de acondicionamiento. El proceso de acondicionamiento tuvo una duración de diez

minutos en donde se agregó el agua requerida y material en función del volumen de la columna de flotación. La bomba de sólidos es accionada luego de cargar el agua. Se abre la válvula que permite la recirculación de la pulpa por medio de la bomba de sólidos durante cinco minutos. Luego se adicionan los colectores en el siguiente orden:

- Xantato Z6
- Ditiofosfato 1404
- Ditiofosfato 1242

Para que cada colector actúe de manera eficiente sobre la pulpa, es necesario que cada uno de estos permanezca en acondicionamiento durante dos minutos. De esta manera la pulpa estará lista para ingresar a la columna de flotación.



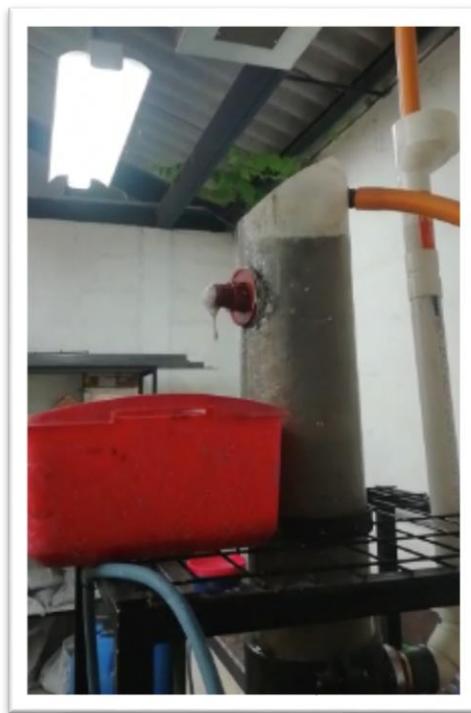
Ilustración 2.5.10 Instalación de equipos

Previo al ingreso de la pulpa es necesario verificar que esté cerrada la llave de salida de relave y la entrada de aire. Se continúa con el ingreso de la pulpa desde la zona de alimento y se enciende el compresor de aire manteniendo una presión de 1,8 bar.

Mientras se da el alimento de la pulpa se mantiene una formación constante de pequeñas burbujas que a su vez servirán para una correcta homogenización del material. Una vez llena la columna se agrega el espumante E-350, y se incrementa la presión del aire hasta 2,5 bar consiguiendo así un tamaño óptimo de burbujas.

En los siguientes minutos se colectan las burbujas mineralizadas que por reboce saldrán de la celda.

Una vez finalizada la colección de burbujas, se cierra la llave de salida de aire del compresor y el material sedimentado pasará a ser parte de los relaves los cuales fueron recogidos por la llave inferior de la columna.



**Tiempo de flotación:** 10 minutos

**Temperatura:** Ambiente

**pH:** 9

**Colectores usados:**

- Xantato Z-6: 5,38 ml
- Ditiofosfato AR-1242: 4,69 ml

- DitioposfatoAR-1404: 3,4 ml

**Espumante:**

ER-350: 0,15 ml

***Secado***

Obtenidos los dos productos de la flotación tanto el concentrado como las colas o relaves, procedemos a su secado.

***Secado de mineral***

El concentrado dispuesto en bandejas metálicas se introdujo en el horno a una temperatura de 50 grados centígrados, durante cinco horas. El concentrado ya seco fue pesado y rotulado. Para luego ser analizado.



Ilustración 2.5.11 Secado de muestra

Para el secado de las colas se colocó en bandejas plásticas y se dejó secar al ambiente durante tres días, después de este tiempo el material ya seco pudo ser pesado y almacenado para su posterior análisis.

## CAPITULO III

### RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS EXPERIMENTOS REALIZADOS

De acuerdo a los experimentos realizados en cada uno de los métodos de recuperación de flotación tanto en la celda Denver como en la Columna se obtuvo 9 muestras de cada una para ser analizadas en el laboratorio de la planta de beneficio Somilor S.A. mediante fundición-copelación.

#### 3.1 Análisis de Laboratorio:

Debemos de considerar que el análisis de las muestras ha sido realizado bajo personal del laboratorio debidamente capacitado. Usando el equipo apropiado y la respectiva Hoja Técnica de Seguridad.

Equipos de laboratorio:

- Balanza Analítica
- Crisoles
- Pinzas de Crisoles
- Copelas
- Horno de fundición
- Horno de copelación

Reactivos:

- Óxido de Plomo
- Bórax
- Carbonato de Sodio
- Sílice
- Harina
- Nitrato de potasio

Previo a la fundición se anotó el peso de cada una de las muestras, se preparan los crisoles enumerados y se coloca una bolsa plástica dentro de cada crisol. De las muestras previamente separadas se toma 5 gr de cada concentrado, 25 gr de cabeza y 30 gr del relave.

Posteriormente las muestras se pasan al área de fundición donde agregamos harina alrededor de 2,5 gr en cada muestra, luego se agrega 2,5 gr de Nitrito de Potasio y por último el fundente

(F-1) un máximo de 150 gr. El fundente F-1, es comercialmente conocido como flux consiste en una mezcla entre el Carbonato de Sodio y el Bórax

Fundición:

La mufla u horno de fundición debe ser prendido hasta alcanzar 850°C, para luego ingresar los crisoles en orden, manteniendo esta temperatura durante 15 minutos. Luego se debe aumentar la temperatura a 950°C durante 15 minutos más y finalmente a 1050°C durante 20 minutos más.

Terminado este tiempo se retiran los crisoles y se vierte su contenido en la lingotera cónica, se deja enfriar, se retira la escoria y se pasa el regulo a un moldeado. Este cubo de régulo pasa a la copelación.

Para el proceso de copelación se debe de limpiar cada copela con aire a presión y las metemos al horno para eliminar cualquier humedad que pueda haber en ellas. Los régulos son colocados en cada una de las copelas y metidos en el horno a 950°C durante 5 minutos; en este tiempo ya estarán fundidos los régulos.

### **3.2 Análisis de Resultados**

Los resultados de las recuperaciones de cada experimento realizado se muestran en el Anexo 1, tanto de la celda Denver como de la celda en Columna.

Las recuperaciones alcanzadas muestran que se obtuvieron mejores resultados en la Columna de flotación que en la celda Denver; esto podría deberse a la dimensión de la columna permitiendo que exista un mayor espacio para la colisión de partícula y burbuja.

<b>MUESTRAS</b>	<b>Masa-Muestras</b>	<b>Au</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
<b>SÓLIDAS</b>	<b>gr</b>	<b>g/T</b>	
<b>Denver # 1</b>	300	2,76	<b>Cabeza</b>
"	22	13,91	<b>Concentrado</b>
"	278	1,30	<b>Cola</b>
<b>Denver # 2</b>	300	3,90	<b>Cabeza</b>
"	55	13,49	<b>Concentrado</b>
"	245	1,79	<b>Cola</b>
<b>Denver # 3</b>	300	3,99	<b>Cabeza</b>
"	73	13,52	<b>Concentrado</b>
"	227	0,91	<b>Cola</b>
<b>MUESTRAS</b>	<b>Masa-Muestras</b>	<b>Au</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
<b>SÓLIDAS</b>	<b>gr</b>	<b>g/T</b>	
<b>F. Columna # 1</b>	7500	3,23	<b>Cabeza</b>
"	780	17,22	<b>Concentrado</b>
"	6720	1,57	<b>Cola</b>
<b>F. Columna # 2</b>	7500	3,68	<b>Cabeza</b>
"	850	25,24	<b>Concentrado</b>
"	6750	0,90	<b>Cola</b>
<b>F. Columna # 3</b>	7500	4,32	<b>Cabeza</b>
"	1250	18,65	<b>Concentrado</b>
"	6250	1,45	<b>Cola</b>

Tabla 0.1: Tenores en relación a cada una de las pruebas realizadas en laboratorio

- **Recuperación:**

El valor útil de mineral obtenido en el concentrado se calcula mediante la ecuación de la recuperación.

$$R = \frac{T_c * (T_a - T_r)}{T_a * (T_c - T_r)}$$

Dónde:

$R$  = Recuperación

$T_c$  = Concentrado

$T_a$  = Alimento

$T_r$  = Relave

Dado que el mineral de interés es el Oro aplicamos la ecuación de la recuperación y obtenemos los siguientes resultados:

MUESTRAS	RECUPERACIÓN %	MEDIA DE RECUPERACIÓN %
F. Denver #1	58	67,33
F. Denver #2	62	
F. Denver #3	82	
F. Columna #1	56	70,33
F. Columna #2	72	
F. Columna #3	83	

Tabla 0.2: Porcentaje de recuperación Au

En base a la recuperación calculada se ha determinado que la concentración por parte de la Flotación en Columna es superior a la Flotación en celdas Denver en la recuperación de oro (Au), esto se puede observar en la ilustración 3.1 en donde en la prueba #2 y #3 alcanza un mayor porcentaje.

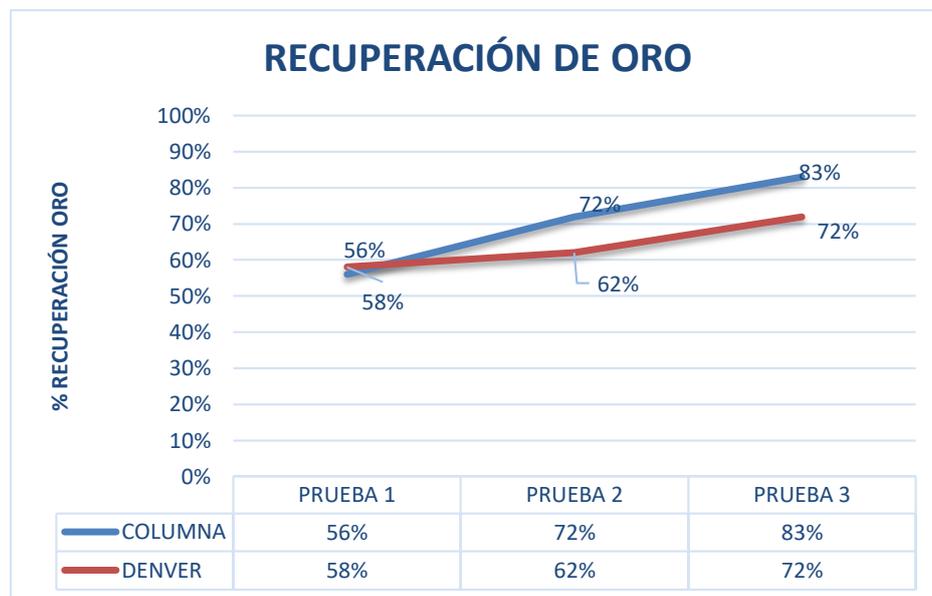


Ilustración 3. 1: Modelo de recuperación de mineral de Oro.

- **Razón de concentración RC**

La razón de concentración se define como la razón entre el flujo másico de sólidos en la alimentación con respecto al flujo de sólidos en el concentrado. (Bustamante M. O, 2008)

El índice de concentración permite evaluar la capacidad entre los flujos de entrada y los flujos de salida del equipo de flotación, es decir, cuantas toneladas deben alimentarse para producir una tonelada de concentrado.

$$RC = \frac{A}{C}$$

<b>MUESTRAS</b>	<b>Masa-Muestras</b>	<b>OBSERVACIONES</b>	<b>Razón de Concentración</b>	<b>Media de RC</b>
<b>SÓLIDAS</b>	<b>gr</b>		<b>gr</b>	<b>gr</b>
<b>Denver # 1</b>	300	<b>Cabeza</b>	13.63	7.72
"	22	<b>Concentrado</b>		
"	278	<b>Cola</b>		
<b>Denver # 2</b>	300	<b>Cabeza</b>	5.45	
"	55	<b>Concentrado</b>		
"	245	<b>Cola</b>		
<b>Denver # 3</b>	300	<b>Cabeza</b>	4.10	
"	73	<b>Concentrado</b>		
"	227	<b>Cola</b>		
<b>MUESTRAS</b>	<b>Masa-Muestras</b>	<b>OBSERVACIONES</b>	<b>Razón de Concentración</b>	<b>Media de RC</b>
<b>SÓLIDAS</b>	<b>gr</b>		<b>gr</b>	<b>gr</b>
<b>F. Columna # 1</b>	7500	<b>Cabeza</b>	9.61	8.13
"	780	<b>Concentrado</b>		
"	6720	<b>Cola</b>		
<b>F. Columna # 2</b>	7500	<b>Cabeza</b>	8.8	
"	850	<b>Concentrado</b>		
"	6750	<b>Cola</b>		
<b>F. Columna # 3</b>	7500	<b>Cabeza</b>	6	
"	1250	<b>Concentrado</b>		
"	6250	<b>Cola</b>		

Tabla 0.3: Razón de recuperación

### 3.3 Comparativa

Los diferentes experimentos realizados tanto en la flotación en celda Denver como en la Columna, a nivel de laboratorio mantuvieron constantes los parámetros operacionales (colector, espumante, Ph, densidad de pulpa).

De esta manera se obtuvieron muestras de cada ensayo su concentrado, alimento y colas. Al ser analizadas en el laboratorio de la planta de beneficio Somilor S.A. los resultados obtenidos (Anexo 1) nos muestran que la flotación en columna logra una mayor recuperación de Oro (Au), se presume que esto podría darse por la formación de burbujas internas en la Columna al tener una inyección de aire directa. También se piensa que debido al tamaño de la columna se tiene un mayor espacio para la colisión de burbujas y partículas lo que mejora la probabilidad de flotación.

Respecto al análisis de la razón de concentración (RC), esta se da entre los flujos máxicos del alimento y del concentrado, en donde de acuerdo a los datos obtenidos se observa que la razón de concentración es superior en la columna de flotación.

En todas las pruebas realizadas se pudo observar que en la Columna de Flotación se formaba burbujas de mayor tamaño que en la celda Denver y una zona de espuma mineralizada ligeramente de mayor tamaño lo que nos da una mayor colección de concentrado en la Columna.

## CONCLUSIONES

En columna de flotación diseñada y construida en el laboratorio de la Universidad del Azuay se pretende que en un futuro se utilice para recabar datos experimentales estudiando las distintas variables influyentes en el proceso y así optimizar su rendimiento. En la aplicación para la concentración de Au, se evidenció que cada experimento realizado logró una adhesión de partícula-burbuja; y la correspondiente concentración del mineral de interés.

De acuerdo con el diseño la columna de flotación a nivel de laboratorio fue construida de fibra de vidrio con el objetivo de que la flotación de sulfuros sea visible. La columna consta de 150 cm de altura y un diámetro 15 cm, la alimentación del material se da desde la zona media a una altura de 75 cm, y la descarga de colas se da desde la zona inferior de la columna.

La inyección de aire está dada mediante un compresor de aire desde la zona inferior de la columna lo que permite un flujo a contracorriente entre el alimento de la pulpa y el aire inyectado. La presión dada por el compresor de aire para la columna de flotación para el material dado y en los parámetros operacionales establecidos fue de 1,8 bar a 2.5 bar; lo que genera en el compresor una potencia de 756,9 rpm a 1051.25 rpm; mientras que en la celda Denver se utilizó una potencia de 1000 rpm a 1500 rpm.

Las pruebas de flotación realizadas para este tipo de material, tanto en la celda Denver como en la celda Columnar manteniendo los mismos parámetros operacionales (colector, espumante, Ph, densidad de pulpa); indican que en base a los tenores obtenidos en el análisis de laboratorio hay un mayor porcentaje de recuperación para la flotación en columna.

Conforme a los experimentos realizados la presión de aire es fundamental para la formación de una burbuja colectora por ello fue controlada mediante el manómetro del compresor. Realizando pruebas desde 1.8 bar has 2.5 bar en donde de manera visual se verificaba la formación de una burbuja colectora.

Cuando el tamaño de la burbuja disminuye el área superficial aumenta provocando que haya una mayor probabilidad de colisión partícula-burbuja. Esto se pudo evidenciar de manera visual en los ensayos cuando se ajustaba el equipo para las distintas pruebas y se disponía de una insuficiente presión de aire lo que generaba una baja turbulencia en el interior de la columna lo que ocasionaba asentamiento de las partículas hacia el fondo de la celda. Al aumentar la presión de aire se logró una mayor turbulencia en la columna y por tanto esto aumento la

probabilidad de colisión partícula-burbuja; lo que generó que las partículas mineralizadas asciendas con mayor facilidad a la zona de colección.

## RECOMENDACIONES

- Los procesos de flotación son aún más eficientes cuando las variables son analizadas de acuerdo al material que se va a tratar es por eso que se requiere siempre hacer un análisis previo de las características físicas y químicas de la composición del material.
- Para el diseño y construcción de celdas industriales, se recomienda la habilitación inicial de una planta piloto para una flotación de magnitud semi-industrial de manera que técnicamente nos permita obtener mejores resultados al poder controlar eficazmente el caudal de alimento de pulpa, así como también una salida de relaves controlada. Para el sistema de aireación se recomienda hacerlo mediante un mecanismo ubicado al interior de la columna ya que de la presión a la que ingrese el aire dependerá la formación de una burbuja colectora ideal, entiéndase esto como la burbuja capaz de capturar partículas mineralizadas durante el proceso de flotación. Una alternativa sería la aireación por difusores de aire los cuales mantienen una presión constante distribuidos por distintos puntos desde la zona inferior de la columna; de esta manera la presión de aire no impactaría directamente sobre la pulpa.
- Dentro de la planta piloto se recomienda que la recolección de concentrado sea constante sin tener la necesidad de insuflar mayor presión de aire, recolectando el mismo por rebose.
- De acuerdo con el estudio de flotación en columna realizado por Ángel Azareño se corrobora la efectividad de la columna de flotación, conforme a su efectividad se recomienda hacer un análisis de cada uno de los parámetros que implica la flotación columnar.
- Se recomienda realizar un análisis económico de la instalación de la celda Denver con respecto a la Columna de Flotación, teniendo así una idea clara del costo-beneficio de ambos equipos.

## REFERENCIAS

### **Glosario**

#### *Acondicionamiento*

Estado en el que una sustancia mantiene sus propiedades estables.

#### *Agitador*

Equipo utilizado para homogenizar varios componentes a través de un proceso.

#### *Aire comprimido*

Aire retenido lo que provoca un aumento en su presión.

#### *Aireación*

Acción de ingresar aire en una pulpa durante la flotación para la generación de burbujas.

#### *Alcalinidad*

Basicidad de un líquido cuantificado por el pH.

#### *Apolar*

Moléculas producidas al unirse átomos con igual electronegatividad.

#### *Calcopirita*

Presenta color amarillento brillante, su fórmula química es  $\text{CuFeS}_2$ .

#### *Coalescencia*

Unión de partículas en suspensión

#### *Colas*

Conjunto de desechos producto de la concentración de minerales; constituido principalmente por agua y arena.

#### *Concentrado*

Material rico en metales obtenido de la separación mediante flotación.

*Flotabilidad*

Capacidad de flotar de un material.

*Fuerzas interfaciales*

Fuerza de atracción entre moléculas de un líquido.

*Hidrotermal*

Deposito formado por minerales cristalizados, de origen magmático.

*Ley*

Cantidad de metal valioso por cada tonelada extraída en una explotación minera. Se expresa en onzas troy por tonelada o en partes por millón (ppm).

*Polimetálico*

Son concentraciones de metales útiles las cuales contienen hierro, manganeso, calcio y cobre entre otros metales.

*Rocas metamórficas*

Rocas formadas por ajustes estructurales y minerales debido al calor y fluidos internos de la tierra.

*Sustancias tenso activas*

Sustancias químicas que permiten reducir la tensión superficial de los líquidos.

*Tostación*

Permite la purificación del componente metálico entre sólidos y gases.

*Yacimiento*

Formación estadísticamente anómala de minerales.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ángel Azañero Ortiz, I. P. (2012). AVANCES EN FLOTACIÓN COLUMNAR. *Instituto de Investigación de la Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 87-95.
- Brant, J. A. (2002). Assessing short-range membrane-colloid interactions using surface energetics. (págs. 257-273). *Journal of Membrane Science* 203.
- Bustamante M. O, A. C. (2008). Concentracion de Minerales.
- Castro. (2002). Proyecto de cobre a nivel mundial diseñado con celdas en columnas como tecnologia convencional. *Departamento de Metalurgia. Chile*.
- Chuck, O. D. (2005). Expert control of column flotation with froth overloading prevention .
- CHUK, O. D., CIRIBENI, V., & GUTIÉRREZ, L. V. (2005). Minerals Engineering. En *Froth collapse in column floatation a prevention method usinf froth density estiation and fuzzy expert system* (págs. 495-504).
- Cruz, B. (1997). A Comprehensive DynamicModel of the Column Flotation. *Mining and Minerals Engineering*.
- Eriez Flotation Division. (2007). *Column Flotation Co*.
- Finch, D. (1990). Column Flotation. (págs. 180-200). Inglaterra: Pergamon Press.
- FINCH, J. A. (1990). *Column Flotation*. Oxford.
- Garcia, C. (2003). Flotación, Fundamentos y Aplicaciones.
- Guedez J, S. L. (2007). Fundamentos de Flotación .
- Guillén, R. y. (2010).
- Klimpel, R. (1998). Miner. Metall. Process.
- Laskowski, J. S., & Ralston. (1992). Co-lloid Chemistry in Mineral Processing. *Developmentsin Mineral Processing, vol. 12. , 225*.
- Lentech. (2012). Type Series Flotation. Centrifugal pumps with shaft seal. *Bogotá Mine , 5-20*.
- Metodi, K. y. (2002). 85-88.
- Metodi, K. y. (2002). *Column Flotation Cell Operating and Maintenance*. Canada: INC., CANADIAN PROCESS TECHNOLOGIES.
- Paredes Espinal, E. J. (2011). *Optimización de la evacuación de espumas en la flotación de cobre, en celdas mecánicas*.
- Renasa. (2017). *Reactivos nacionales*. Obtenido de <http://www.renasa.com.pe/es>
- Rodriguez, A. J. (2011). Flotación de Minerales. *Universidad Nacional José*.
- Rubinstein, J. B. (1995). *Column Flotation Processes, Designs and Practices*. Gordon and Breach Sciences Publishers.

RUBIO, J., & TESSELE, F. (2001). Flotación como proceso de remoción de contaminantes: principios básicos, técnicas y aplicaciones. *Revista Minerales*.

Sierra García, F. (1987). Evaluación Tecnológica: del proceso de flotacion celda columna. *Revista Rocas y Minerales*, 50.

Socolich Guzmán, E. y. (1988). Determinacion de Hold-up en celdas de flotacion columnar. *Convencion de mineria de tacna*, 18-20.

SUÁREZ CÁRDENAS, G. &. (2005). Flotación en columna como técnica de beneficio para minerales finos. *Tecnura*, 4 -15.

Sutulov. (1963). *Flotación de Minerales*. Concepción, Chile: Universidad de Concepción.

Vargas, M. Á. (2016). *Concentración de Minerales*. Universidad San Luis de Gonzaga.

Yianatos, J. B. (2005). Minerals Engineering,. En *Collection zone kinetic model for industrial flotation columns*. (págs. 18(15), 1373-1377).

Zamora, J. A. (2012). COLUMNA DE FLOTACION ESPUMAN A ESCALA DE PLANTA PILOTO PARA BENEFICIO DE CARBONES.

## ANEXOS

Anexo 1. Resultados de tenores analizados en el laboratorio Somilor S.A.



LABORATORIO QUÍMICO

SOLICITANTE: Andrés Bernardo Vergara Espinosa

FECHA ENTREGA: 24/04/2019

FECHA	MUESTRAS	Au	Ag	Cu	Fe	OBSERVACIONES
	SÓLIDAS	g/T	g/T	%	%	
15-042019	Denver # 1	2,76	26	0,05	5,12	Cabeza
"	"	13,91	74	0,28	14,69	Concentrado
"	"	1,30	31	0,07	6,00	Cola
"	Denver # 2	3,90	32	0,07	5,72	Cabeza
"	"	13,49	27	0,03	3,58	Concentrado
"	"	1,79	23	0,02	3,83	Cola
"	Denver # 3	3,99	34	0,06	5,64	Cabeza
"	"	13,52	36	0,03	3,83	Concentrado
"	"	0,91	28	0,02	3,82	Cola
FECHA	MUESTRAS	Au	Ag	Cu	Fe	OBSERVACIONES
	SÓLIDAS	g/T	g/T	%	%	
15-042019	F. Columna # 1	3,23	36	0,06	5,63	Cabeza
"	"	17,22	42	0,13	8,21	Concentrado
"	"	1,57	37	0,06	5,83	Cola
"	F. Columna # 2	3,68	27	0,05	4,30	Cabeza
"	"	25,24	60	0,28	15,15	Concentrado
"	"	0,90	21	0,39	3,73	Cola
"	F. Columna # 3	4,32	36	0,08	6,35	Cabeza
"	"	18,65	87	0,32	14,48	Concentrado
"	"	1,45	26	0,02	3,94	Cola

## Anexo 2. Balance de masas en gramos de cada muestra.

<b>FECHA</b>	<b>MUESTRAS</b>	<b>Masa- Muestras</b>	<b>Au</b>	<b>Ag</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
	<b>SÓLIDAS</b>	<b>gr</b>	<b>g/T</b>	<b>g/T</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	
<b>15-04-2019</b>	<b>Denver # 1</b>	300	2.76	26	0.05	5.12	<b>Cabeza</b>
"	"	19	13.91	74	0.28	14.69	<b>Concentrado</b>
"	"	281	4.30	31	0.07	6.00	<b>Cola</b>
"	<b>Denver # 2</b>	300	3.90	32	0.07	5.72	<b>Cabeza</b>
"	"	55	3.49	27	0.03	3.58	<b>Concentrado</b>
"	"	245	1.79	23	0.02	3.83	<b>Cola</b>
"	<b>Denver # 3</b>	300	3.99	34	0.06	5.64	<b>Cabeza</b>
"	"	73	3.52	36	0.03	3.83	<b>Concentrado</b>
"	"	227	0.91	28	0.02	3.82	<b>Cola</b>
<b>FECHA</b>	<b>MUESTRAS</b>	<b>Masa- Muestras</b>	<b>Au</b>	<b>Ag</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
	<b>SÓLIDAS</b>	<b>gr</b>	<b>g/T</b>	<b>g/T</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	
<b>15-04-2019</b>	<b>F. Columna # 1</b>	7500	3.23	36	0.06	5.63	<b>Cabeza</b>
"	"	780	7.22	42	0.13	8.21	<b>Concentrado</b>
"	"	6720	3.57	37	0.06	5.83	<b>Cola</b>
"	<b>F. Columna # 2</b>	7500	4.32	36	0.08	6.35	<b>Cabeza</b>
"	"	850	14.65	87	0.32	14.48	<b>Concentrado</b>
"	"	6750	1.45	26	0.02	3.94	<b>Cola</b>
"	<b>F. Columna # 3</b>	7500	4.68	27	0.05	4.30	<b>Cabeza</b>
"	"	1250	13.24	60	0.28	15.15	<b>Concentrado</b>
"	"	6250	1.50	21	0.39	3.73	<b>Cola</b>

Anexo 3. Flotación en columna



