



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“EFECTO DE LOS IONES SOLUBLES EN UNA
FLOTACIÓN SELECTIVA DE UN SISTEMA Cu-Zn EN
UNA PLANTA DE BENEFICIO”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA**

PRESENTA

ANNETTE KAREN ORDAZ RAMÍREZ

MÉXICO, D.F.

2014





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor: Antonio Huerta Cerdán**

VOCAL: **Profesor: Faustino Juárez Sánchez**

SECRETARIO: **Profesor: Juan Manuel De la Rosa Canales**

1er. SUPLENTE: **Profesor: Agustín Gerardo Ruíz Tamayo**

2° SUPLENTE: **Profesor: Blanca Paz Díaz**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Domicilio Conocido S/N Mineral de Sabinas C.P. 99100, Sombrerete Zacatecas, México.

Circuito de la Investigación Científica s/n Ciudad Universitaria, Coyoacán, México 04510, D.F.

ASESOR DEL TEMA:

M. en C. Antonio Huerta Cerdán

SUSTENTANTE:

Annette Karen Ordaz Ramírez

CONTENIDO

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
NOMENCLATURA	3
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE LA EMPRESA	6
1.1 Datos generales	7
1.2 Antecedentes	7
1.3 Valores	9
1.4 Política de desarrollo sustentable	9
CAPÍTULO 2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	10
2.1 OBJETIVOS	11
2.2 HIPÓTESIS	11
CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO	12
3.1 Proceso de Flotación	13
3.1.1 Espuma	19
3.1.2 Cinética de flotación	21
3.2 Flotación de los minerales de cobre	24
3.3 Agua recirculada y los iones solubles	25
3.4 Espectroscopía de Absorción Atómica (AA)	28
CAPÍTULO 4. EXPERIMENTACIÓN METALÚRGICA	30
4.1 Material y equipo	34
4.2 Diseño experimental	35
4.3 Desarrollo experimental.	36
CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	46
5.1 Caracterización del agua de proceso	47
5.2 Caracterización de la muestra	50
5.3 Flotación	53
CONCLUSIONES	76
BIBLIOGRAFÍA.	77
ANEXOS	80

RESUMEN

El presente trabajo de investigación está basado en la necesidad actual de la industria minera en conocer los efectos de iones solubles del agua residual utilizada en el proceso de flotación que afectan el grado y la recuperación de los concentrados de interés.

La investigación se realizó en Minera Sabinas, analizando la calidad del agua de distintos puntos estratégicos utilizada en el proceso para determinar los iones metálicos y no metálicos, los efectos de los iones Fe^{2+} , Cu^{2+} , Ca^{2+} ; el uso de carbonato de sodio (Na_2CO_3) y variación de pH en una flotación selectiva de Cu-Zn por medio de cinética de flotación de cobre y pruebas de circuito abierto Cu-Zn.

Teniendo como resultados relevantes la activación de la esfalerita por Cu^{2+} a cualquier valor de pH y la depresión de la esfalerita por Fe^{2+} en un pH neutro.

INTRODUCCIÓN

Para la minería el uso de agua es de suma importancia en su proceso ya que es un elemento indispensable para la separación y concentración de especies minerales. El empleo del agua recirculada sin tratamiento en un proceso de beneficio ocasiona efectos negativos en la eficiencia del proceso de flotación de los minerales valiosos, por el grado y porcentaje de especies disueltas (orgánicas e inorgánicas) que se acumulan durante la operación⁽⁵⁾. Los problemas del agua recirculada provienen del uso de los distintos reactivos que se emplean para la flotación de los minerales, por ejemplo: el uso de cal y sales de magnesio contribuyen a la dureza del agua, la aplicación de depresores como el cianuro promueven la disolución de partículas de cobre en iones solubles.

En la Compañía Minera Sabinas S.A. de C.V. así como en otras unidades que pertenecen al Grupo Peñoles, el uso de agua recirculada ocupa el mayor porcentaje del agua utilizada para el proceso; por esta razón se tiene una constante problemática en la recuperación de los concentrados, frecuentemente por la intervención de los iones en solución y reactivos residuales presentes en el agua con el mineral a procesar.

De acuerdo a algunas situaciones similares que se han presentado en algunas unidades de Grupo Peñoles, en Minera Sabinas por ejemplo; se determinó realizar un estudio sobre el efecto que tienen los iones solubles (Fe^{2+} , Cu^{2+} , Ca^{2+}) y la interacción que existe entre ellos en la flotación selectiva de un sistema cobre-zinc que están presentes en el agua de proceso utilizada en la Planta de Beneficio.

NOMENCLATURA

A	Cobre (Cu)
B	Calcio (Ca)
C	Fierro (Fe)
D	Carbonato de Sodio (Na_2CO_3)
E	pH
BC	Calcio*Fierro
BE	Calcio*pH
ppm	Partes por millón.
%Acum (+)	Por ciento acumulado positivo.
%Acum (-)	Por ciento acumulado negativo.
%Peso	Por ciento en peso.
Pi	Peso inicial del filtro microfibra
Pf	Peso final del filtro microfibra.
S.S	Sólidos suspendidos.
t	Tiempo de residencia
t _r	Tiempo de residencia

Std1	Condición 1
Std2	Condición 2
Std3	Condición 3
Std4	Condición 4
Std5	Condición 5
Std6	Condición 6
Std7	Condición 7
Std8	Condición 8
Std9	Condición 9
Std1a	Condición 1a
Std2a	Condición 2a
Std3a	Condición 3a
Std4a	Condición 4a
Std5a	Condición 5a
Std6a	Condición 6a
Std7a	Condición 7a
Std8a	Condición 8a

Std9a	Condición 9a
Std10	Condición 10
Std11	Condición 11
Std12	Condición 12
L1	Primer limpia
L2	Segunda limpia
L3	Tercer limpia
Conc Cu	Concentrado de cobre
Conc Zn	Concentrado de zinc

CAPÍTULO 1.

GENERALIDADES DE LA

EMPRESA

1.1 Datos generales

Empresa: Compañía Minera Sabinas, S.A. de C.V.

Dirección: Domicilio Conocido S/N Mineral de Sabinas C.P. 99100, Sombrerete Zacatecas, México.

Productos: Concentrado de cobre, zinc y plomo.

Producción: 1 240 000 tmpa.

Tipo de depósito: subterránea, cuerpos masivos y vetas.

1.2 Antecedentes

Grupo Peñoles es una empresa que forma parte del Grupo BAL la cual ha sido testigo y activa protagonista de los sucesos contemporáneos de los siglos XIX y XX que llegó al Nuevo Milenio trabajando para ser uno de los actores clave de los sectores minero, metalúrgico y químico de nuestro país.

Actualmente es el mayor productor de la plata afinada, bismuto metálico y sulfato de sodio, y líder latinoamericano en la producción de oro, plomo y zinc afinados.

La Compañía Minera de Peñoles, S.A. se construyó el 1° de marzo de 1887 en la Ciudad de Durango por iniciativa de un grupo de empresarios mexicanos con el fin de explotar varias minas de la región.

Minera Sabinas

Sombrerete es uno de los minerales más famosos por su riqueza en el nuevo mundo. Se fundó el 6 de junio de 1555, por el Capitán Don Juan de Tolosa.

En 1554 el segundo virrey de la Nueva España, Don Luis de Velasco dio comisión a Francisco de Ibarra residente de Zacatecas, para organizar una expedición, saliendo un grupo de españoles comandados por Martín Pérez con rumbo a Sombrerete, pues dos naturales les habían informado de los ricos ejemplares de piedras de plata que existían en esos lugares; el 11 de noviembre del mismo año, llegaron a un punto distante de Sombrerete 3 o 4 leguas al poniente donde encontraron las ricas vetas de San Antonio, La Soledad, San Pantaleón, Tajo Airón, Ánimas, Veta Grande, iniciando la historia de este distrito minero.

En 1925 la Compañía Inversiones del Oro S.A. de C.V., reinició los trabajos de explotación de la Noria de San Pantaleón, mineral que llegó a beneficiar hasta 500 toneladas por día. Esta empresa inglesa participó en la explotación de algunas otras vetas del distrito. Esta Compañía se retiró pasando la mina a una cooperativa de trabajadores que fracasó por una mala administración y usar técnicas inadecuadas. En el año de 1953 la cooperativa vendió los derechos de la Noria a los Señores Alfredo Anher y Jesús Guzmán.

A partir del año 1953 hasta 1995, fue propiedad de la Compañía Minera Sabinas S.A. de C.V., perteneciendo a la Compañía Fresnillo y al Ing. Ernesto Leopoldo Anher. Así que a partir de 1995 la Unidad Minera Sabinas pasó a formar parte del Grupo Peñoles adaptando las políticas y forma de administración de dicho grupo.

Industrias Peñoles. S.A. de C.V. y subsidiarias que es uno de los grupos industriales más importantes de México.

1.3 Valores

La actuación de Peñoles se rige por los valores:

- Confianza.
- Responsabilidad.
- Integridad.
- Lealtad.

1.4 Política de desarrollo sustentable

Es política de Peñoles garantizar operaciones productivas, seguras y respetuosas del entorno, basadas en una cultura de prevención para la protección a la vida, la salud y los ecosistemas, en armonía con la comunidad, mediante un sistema de gestión integral para el desarrollo sustentable y mejora continua, que además de asegurar el cumplimiento de sus compromisos con los clientes y a otros a los que se suscriba, garantice el cumplimiento de los requerimientos legales.

CAPÍTULO 2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 OBJETIVOS

- a) Determinar la concentración de iones metálicos y no metálicos en solución en el tanque de agua fresca, espesadores de concentrados, espesador de colas y presa de jales No.4, que es utilizada en el circuito de flotación cobre-zinc a partir de las técnicas de volumetría y absorción atómica.
- b) Determinar los efectos de las concentraciones de iones Cu^{2+} , Fe^{2+} y Ca^{2+} , sobre los productos de concentración del circuito de flotación cobre-zinc a partir de pruebas de flotación en laboratorio.
- c) Obtener las condiciones de máxima y mínima recuperación y grado en el circuito de flotación cobre-zinc combinando los iones anteriormente mencionados con variaciones de pH y carbonato de sodio (Na_2CO_3).

2.2 HIPÓTESIS

Los iones solubles (Cu^{2+} , Fe^{2+} y Ca^{2+}) presentes en el agua de proceso pueden propiciar la baja selectividad en la flotación de menas sulfuradas de cobre-zinc, permitiendo la activación de la esfalerita a través del ion Cu^{2+} , repercutiendo en una disminución de leyes y recuperaciones en sus respectivos concentrados.

CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

3.1 Proceso de Flotación

El beneficio de minerales se lleva a cabo mediante diversos procesos de concentración tales como concentración gravimétrica, concentración magnética u otros tratamientos físicos, sin embargo, la flotación es la técnica más usada en el procesamiento de minerales^(1, 2, 3) dado su carácter selectivo de concentración. La *flotación* es un proceso fisicoquímico mediante el cual se separan especies minerales de valor económico de minerales sin interés comercial. Dicha separación se lleva a cabo a través de la adhesión de partículas minerales a burbujas de aire.

Se le conoce como *flotación directa* a la concentración del mineral en la espuma o fracción flotante, dejando la ganga en la pulpa o las colas y la *flotación inversa*, aquella que la ganga se separa en la fracción flotante⁽¹⁴⁾. Dentro del mismo proceso de flotación, se puede realizar la flotación de una clase de mineral con referencia a otro también con valor, esta forma de concentrar se conoce con el nombre de *flotación selectiva*. Si la segunda clase de mineral es recuperada subsecuentemente, la operación se describe como una *flotación selectiva en dos etapas o pasos*.⁽¹¹⁾

Para que el proceso de flotación se lleve a cabo es primordial que se cumplan las siguientes condiciones:

- Hidrofobicidad de las especies minerales de interés
- Formación de burbujas de aire
- Colisión entre partículas y burbujas

La propiedad que controla la adhesión burbuja-partícula es la energía libre superficial. Se establece un sistema trifásico, sólido(mineral)-líquido(agua)-gas(aire). Un sistema formado por dos fases, se establece una interfaz (plano de separación física entre dos fases) teniendo como propiedad la energía libre interfacial. Las propiedades de la interfase son distintas a las propiedades de cada fase.

Existen ciertas propiedades importantes entre las fases del sistema mineral-reactivos tales como la tensión superficial. Ésta la podemos definir como la fuerza perpendicular al plano y dirigida al interior de la fase. Se produce por el desbalance de fuerzas al interactuar una molécula con todos sus vecinos.

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

Ec. 1

Hay un parámetro que define la mojabilidad: el ángulo de contacto, que es el ángulo entre la gota y la superficie plana.

- $\theta > 90^\circ$, líquido no moja al sólido.
- $\theta < 90^\circ$, líquido moja al sólido.

En la Figura 3.1 hace referencia a la adhesión selectiva entre una partícula de mineral y una burbuja. La adhesión selectiva se da entre las fases sólido-gas (s-g) y la no adhesión se tiene entre las fases sólido-líquido (s-l)⁽⁹⁾.

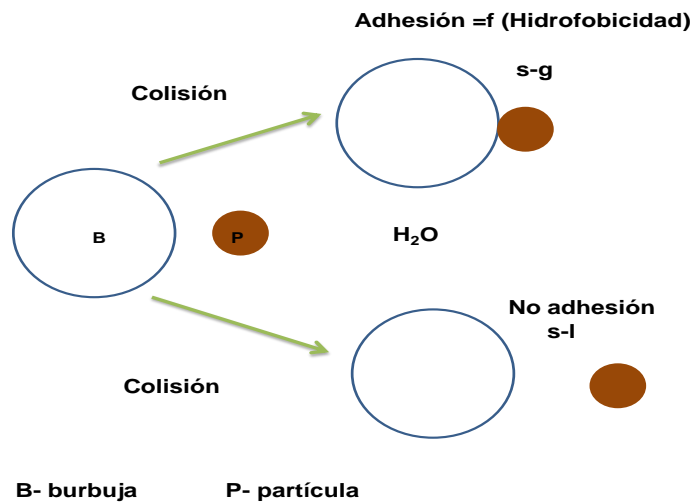


Figura 3.1 Esquema de adhesión selectiva mineral-burbuja⁽⁹⁾.

En la figura 3.2, se presenta una celda de flotación en la cual las partículas hidrofóbicas se adhieren a las burbujas elevándose a la superficie de la celda formándose el concentrado del elemento de interés. Mientras que las partículas hidrofílicas se concentran en la parte inferior de la celda.⁽⁹⁾

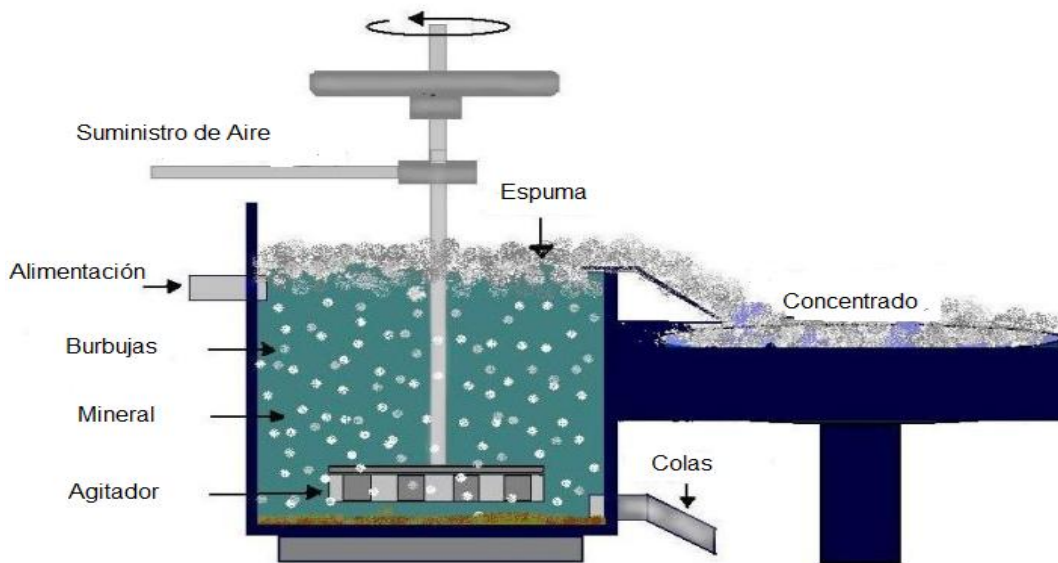


Figura 3.2 Esquema de una celda de flotación⁽⁹⁾

Debido a que la hidrofobicidad no siempre se presenta de forma natural en las partículas minerales se utilizan reactivos químicos los cuales se clasifican como:

- **Espumantes:** estos reactivos alteran la tensión superficial de líquidos. Son reactivos orgánicos de superficie activa heteropolar, capaces de ser adsorbidos en la interfase aire-agua. Deben ser hasta cierto grado solubles en agua. Su estructura les permite agruparse hasta formar otra fase distinta del resto del fluido, formando una espuma que separa el mineral del resto de la ganga. Su objetivo es producir espuma resistente que permita la adherencia del mineral de interés, así como evitar el rompimiento de la burbuja en su ascenso.

Para la flotación de minerales sulfurados es común utilizar dos espumantes, uno que proporcione las propiedades físicas adecuadas para la espuma y el otro para la interacción con el colector que controlen la dinámica del proceso. En la figura 3.3 se muestran los grupos funcionales que contienen en su composición los espumantes más efectivos:

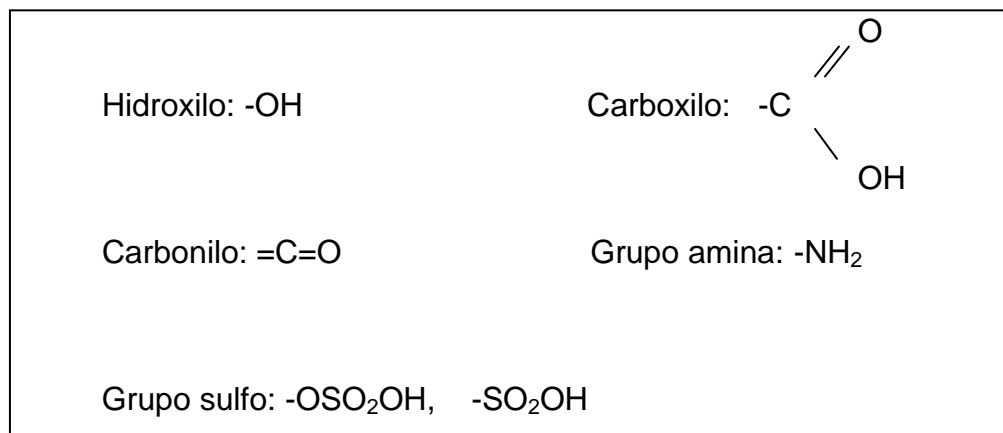


Figura 3.3 Principales grupos funcionales de los espumantes⁽¹¹⁾

- Colectores:** reactivos que modifican las propiedades superficiales de las partículas (transformándolas de hidrofílicas \rightarrow a hidrofóbicas), es decir, favorecen la condición hidrofóbica y aerofílica de las partículas de sulfuros de los metales que se quieren recuperar, para que sean separados del agua y se adhieran a las burbujas de aire. Deben utilizarse seleccionando el mineral de interés para impedir la recuperación de otros minerales. Los colectores químicos son surfactantes del tipo polar-no polar. Los más comunes y poderosos son los xantatos y ditiofosfatos (Aeroflots) que tienen dos átomos de azufre que se muestran en la figura 3.4:

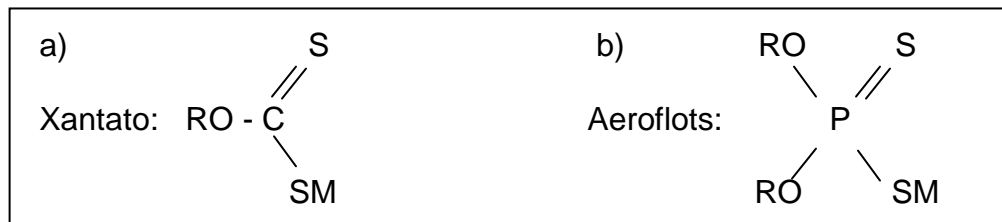


Figura 3.4 a) Colectores Xantato y b) Colectores Aeroflots⁽¹¹⁾

En estos compuestos, R representa la cadena de hidrocarburos y M es un metal alcalino en el caso de los xantatos; en los Aeroflots, M puede ser un álcali o un metal alcalinotérreo, un ion de amonio, o un hidrógeno. El radical polar $-\text{SM}$ constituye al grupo soluble, ionizándose en la solución con la producción de un catión M^+ y los grandes iones que llevan las cadenas de hidrocarburos.

- Activadores:** Facilitan la unión de un colector con un mineral, intensificando la acción del colector en el mineral y facilitando la flotación de dicho mineral. La activación se efectúa por el catión del reactivo en algunos casos y por el anión en otras. El sulfato de cobre (CuSO_4) es importante en

los activadores catiónicos, siendo su principal uso en la flotación de la esfalerita (ZnS).

- **Depresores:** Impiden o evitan que una película colectora se forme sobre partículas minerales que no se desean flotar. Uno de los depresores más comunes es la cal (CaO) que generalmente se añade al circuito en forma de hidróxido de calcio (Ca(OH)₂). Se usa principalmente para deprimir los minerales compuestos por sulfuro de hierro, en especial para eliminar la pirita y la pirrotita de los concentrados conteniendo sulfuros de cobre o zinc. El cianuro de sodio (NaCN) es otro depresor comúnmente usado. Dada una concentración de ion cianuro, los sulfuros de hierro pueden ser deprimidos con un pH tan bajo como 7, la calcopirita con uno que varía entre 7 a 8 y los otros sulfuros de cobre con un pH de 9 o más. Los sulfuros de zinc activados pueden ser deprimidos con un pH que varía de 7 a 8. En algunos minerales la depresión de los sulfuros de zinc por medio del cianuro de sodio se mejora por la adición del sulfato de zinc (ZnSO₄), ésta combinación es particularmente útil en la flotación de minerales de plomo-zinc conteniendo una cantidad apreciable de sulfuros de cobre.⁽¹¹⁾
- **Modificadores de pH:** Promueven o suprimen la ionización de reactivos, controlan la adsorción de los reactivos en la superficie del mineral y controlan la interacción entre reactivos.

De manera general, sus acciones principales son:

- Hacer la superficie del mineral hidrófoba o repelente al agua.

- Dotar de selectividad al proceso o evitar que otros minerales no deseados se hagan hidrofóbicos.
- Formar una espuma razonablemente estable.

3.1.1 Espuma

Durante el proceso de flotación, la estabilidad y tamaño de la espuma es una condición importante para tener la mayor recuperación de la especie mineral de interés, teniendo las siguientes propiedades:

- Las partículas de mineral flotado deben permanecer firmemente en la espuma.
- La máxima concentración de mineral debe tener lugar en la espuma por separación selectiva de la ganga que se realiza en el proceso.
- La espuma no deberá ser excesivamente estable y debe romperse después de retirarla de la celda de flotación.

Es fácil controlar las propiedades de una espuma siempre y cuando se cuiden los factores físicos (espesor de la capa de espuma, la velocidad y método de eliminación de la espuma en la celda de flotación) y fisicoquímicos (cambios en los reactivos, la estabilidad de la fuerza entre burbuja-mineral).

La figura 3.5 muestra la transición de la espuma durante el proceso de flotación, desde el comienzo que está totalmente cargada la espuma con partículas de interés hasta cuando se termina la flotación y la espuma es deformada.

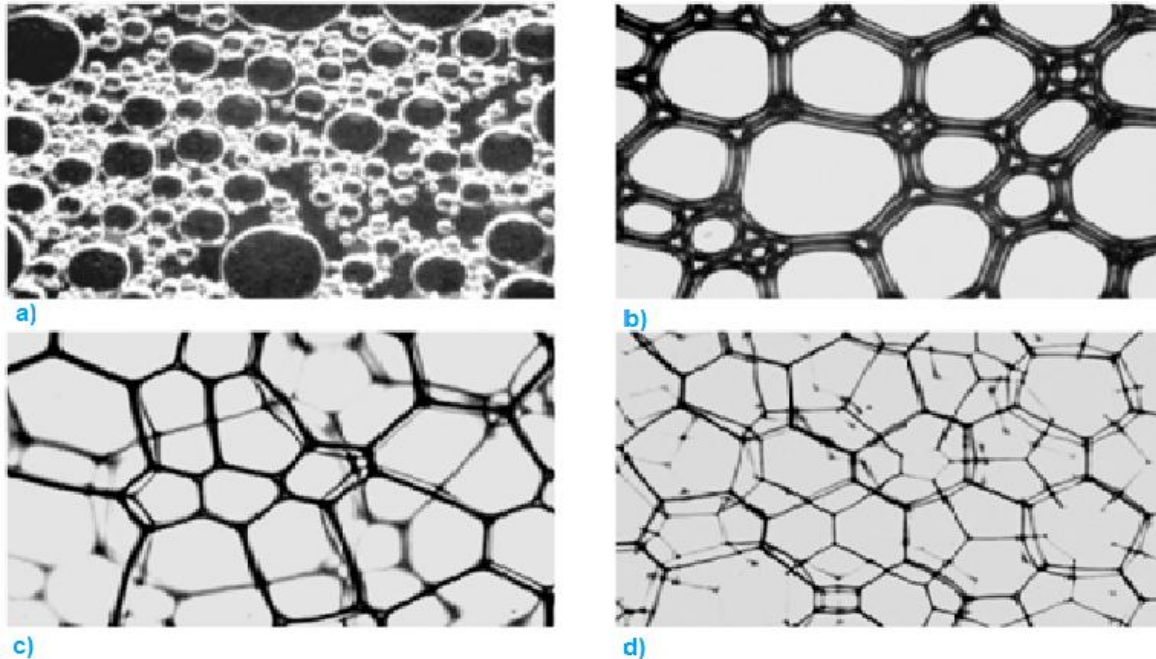


Figura 3.5 a) espuma no drenada, burbuja esférica; b) espuma parcialmente drenada, que muestra la distorsión de las burbujas; c) después de un nuevo drenaje, las láminas y las fronteras Plateau siguen delgadas y d) una espuma bien drenada, que muestra células poliédricas y fronteras Plateau muy delgadas.⁽¹⁹⁾

Para que la eficiencia de la flotación sea adecuada el tamaño de la burbuja en la superficie de la espuma debe ser alrededor de 1 a 3 cm; también se puede guiar por su estructura, concentración del mineral, color, etc.

Farrokhpay y Zanin⁽¹⁵⁾ realizaron una investigación sobre la calidad del agua y el efecto que tenía sobre la estabilidad de la espuma de flotación. Basaron su experimentación en dos partes: la primer parte fue contaminar el agua fresca con sales tal como cloruro de aluminio (AlCl_3), cloruro de calcio (CaCl_2) y cloruro de sodio (NaCl); y la segunda parte con agua fresca pero variando el pH. Para ambas partes se realizó la flotación de sulfuro de zinc en una columna y se analizó el potencial zeta, la viscosidad de la pulpa y la estabilidad de la espuma. Se concluyó que el cloruro de aluminio tuvo mayor impacto en la estabilidad de la espuma,

seguido por el cloruro de calcio y el que menos afectó fue el cloruro de sodio. La estabilidad de la espuma está entonces directamente relacionada con la valencia de los iones metálicos, así como también se tiene mayor estabilidad de la espuma a pH bajos debido a que la viscosidad de la pulpa también es menor. Debido a la necesidad actual de las mineras en utilizar agua recirculada que tiene baja calidad debe tenerse mayor control en el pH que se opera así como los iones metálicos que contiene.

3.1.2 Cinética de flotación

La cinética de flotación es una descripción cuantitativa de la rapidez con la que flotan las partículas, por lo que el tiempo de flotación (t) es una variable importante. Con esta variable se determina el tiempo máximo para que las partículas más lentas sean extraídas de la pulpa.

El tiempo de residencia (t_r), está vinculado al flujo de aire, por lo que si éste último es pequeño, t debería de ser alto para coleccionar todas las partículas.

Para calcular la velocidad de flotación de un mineral se realiza una grafica con % de recuperación acumulado (R) y el tiempo de flotación de un mineral como se muestra en la figura 3.6. La recuperación va aumentando con el tiempo y la curva se va volviendo asintótica a un cierto valor máximo de recuperación (R_∞), cabe aclarar que cada mineral tiene distinta velocidad de flotación y se debe a condiciones fisicoquímicas, equipo, flujo de aire, etc.

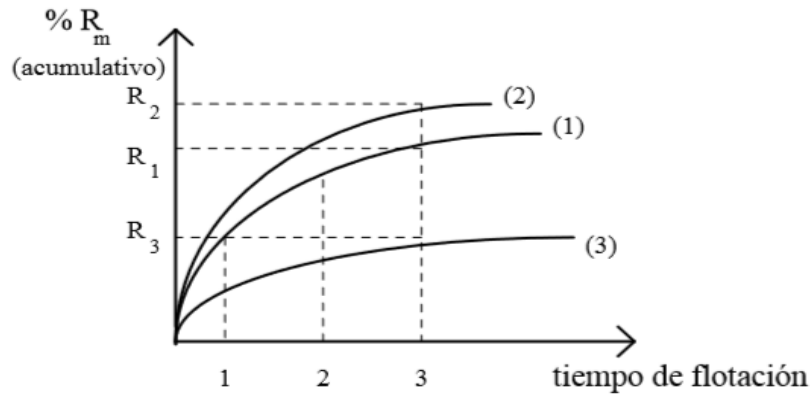


Figura 3.6 % recuperación acumulada vs tiempo de flotación de distintos minerales⁽⁹⁾

En la cinética de flotación es importante calcular la *constante específica de flotación*, que es el parámetro que nos permite conocer si un proceso es más rápido o lento que otro.

La rapidez de flotación se puede expresar análogamente como la cinética química, mediante la siguiente ecuación diferencial (2):

$$-\frac{dc}{dt} = kc^n \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

c= concentración de especies flotables.

k= constante específica de flotación.

n= orden de la reacción.

Existen diferentes modelos para calcular el valor de k. El más usado es el modelo de García-Zúñiga⁽¹²⁾ que permite ajustar los datos experimentales y calcular k que esta expresada en la ecuación 3:

$$\ln\left(\frac{R_{\infty} - R_t}{R_{\infty}}\right) = -kt$$

Ec. 3

Donde:

R_{∞} = recuperación máxima (%).

R_t = recuperación a un tiempo t (%).

k= constante específica de flotación (min^{-1}).

t= tiempo (min).

La figura 3.7 muestra la gráfica de logaritmo natural de la diferencia de la recuperación contra el tiempo de flotación con la que se puede determinar el valor de la constante con datos experimentales.

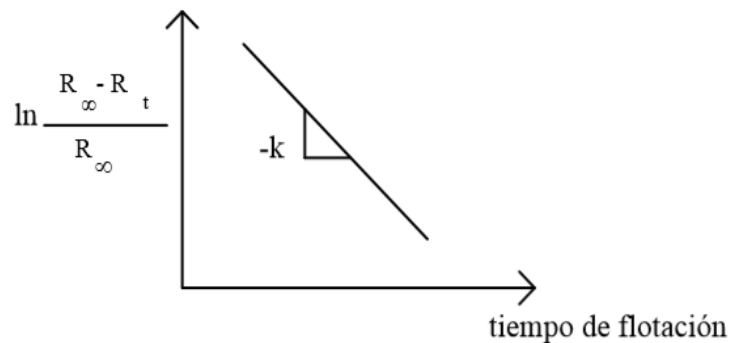


Figura 3.7 determinación de la constante específica de flotación⁽⁹⁾.

La constante específica de flotación puede ser afectada por:

- Granulometría
- % sólidos
- pH
- Reactivos
- Ley de alimentación

La rapidez de flotación depende de las condiciones de la pulpa con la que se trabaje.

3.2 Flotación de los minerales de cobre

Los sulfuros más comunes que contienen cobre son la calcopirita (CuFeS_2), la bornita (Cu_5FeS_4) y la calcocita (Cu_2S) que se encuentran frecuentemente asociados con la pirita (Fe_2S). La calcopirita y la bornita son normalmente muy flotables y pueden ser flotadas con un colector de potencia ordinaria (cadena hidrocarbonada corta), como por ejemplo un xantato etílico.

La flotación usualmente se conduce con el pH natural de la pulpa que normalmente se encuentra entre 7 y 8. Cuando están presentes la pirita y pirrotita (Fe_{1-x}S), cada una de ellas puede deprimirse mediante la adición de cal con un alza correspondiente en el pH. Una pequeña cantidad de cianuro de sodio puede ayudar a conservar deprimido el contenido pirítico del concentrado de cobre.

Los Aeroflots son buenos colectores para los minerales de cobre y en un circuito alcalino tienen menos poder colector para los sulfuros de hierro que los xantatos.

Una recuperación del 99% de los sulfuros de cobre es generalmente posible en la flotación de minerales de cobre. El grado del concentrado depende de los minerales de cobre presentes. Con la calcopirita y bornita la ley usualmente sube cerca de 25% de cobre, pero puede descender a 20% si existe pirita.⁽¹¹⁾

3.3 Agua recirculada y los iones solubles

En la actualidad, el uso del agua residual en plantas de beneficio de minerales y en específico en el proceso de flotación es muy utilizada por la industria minera; por lo que la calidad del agua que se emplea es deficiente y afecta de manera importante en la eficiencia de la flotación de minerales.

La variación en la calidad del agua se debe a dos factores importantes:

1. Interno: éste se refiere al tipo de mineral que se procesa, los reactivos utilizados en el proceso y a toda el agua recirculada proveniente de tanques espesadores, celdas de flotación, tanques de acondicionamiento o cualquier lugar dentro de la unidad minera.
2. Externo: agua fresca del lugar y agua recirculada de otros sitios.

Cuando se procesan sulfuros complejos existen pérdidas por selectividad y recuperación durante la recirculación del agua residual, las cuales se deben a la combinación de diversos factores: reactivos residuales y productos de oxidación que se adsorben en forma no selectiva a la mayoría de los sulfatos; sulfuros residuales que causan depresión indeseada; presencia de iones metálicos como

Cu^{2+} , Fe^{2+} , Pb^{2+} , que causan la activación indeseada y, finalmente, iones alcalinos que activan a la ganga no sulfurosa.⁽⁵⁾

El uso de la cal para deprimir el fierro, provoca la existencia de iones calcio (Ca^{2+}) disueltos. La dureza del agua se debe a la concentración de todos los cationes metálicos no alcalinos presentes (iones calcio, magnesio, bario en forma de carbonatos o bicarbonatos) expresados en equivalentes de carbonato de calcio (CaCO_3), de esta manera se tiene un parámetro muy significativo en la calidad del agua.⁽⁶⁾

En la tabla 3.1 se muestra la clasificación del agua según la dureza que tenga de acuerdo a su concentración de carbonato de calcio.

Tabla 3.1 Clasificación de la dureza del agua⁽⁶⁾

Denominación	ppm de CaCO_3
Muy suave	0-15
Suave	16-75
Media	76-150
Duras	150-300
Muy duras	Mayor a 300

La adición suficiente de carbonato de sodio (Na_2CO_3) para remover la dureza permanente (sulfatos de calcio y magnesio) es por lo común todo lo que se necesita. Por lo tanto, éste debe agregarse en el circuito de molienda o en un tanque de acondicionamiento.⁽¹¹⁾

En la literatura se tienen algunos documentos de investigaciones previas sobre el efecto de iones en la flotación selectiva de algunos minerales:

Pacheco-Gutiérrez y Durán Domínguez de Bazúa⁽⁵⁾ realizaron una investigación sobre la reutilización del agua, su consumo y la disminución de su impacto ambiental sin afectar la eficiencia en el proceso de flotación. Buscando la solución con diferentes tratamientos del agua residual de las minas. El tratamiento más efectivo y económicamente viable determinado fue usar bacterias sulfato-reductoras que permiten la remoción de metales pesados en forma de sulfuros, obtener un agua con concentraciones menores de 250 mg/L de sulfatos y de metales disueltos del orden de ppb en lugar de ppm manejándose con un pH neutro.

Coetzer, Preez y Bredenhann⁽⁶⁾, hicieron una investigación que se divide en tres partes sobre efectos en la galena por agua residual y de iones metálicos solubles, en la primera estudiaron el efecto en la cinética de flotación y la activación o depresión de minerales. En la segunda parte se buscó determinar el efecto de la calidad del agua, ya que tiene distintos contenidos de sales y de iones que pueden influir en la estabilidad de la espuma y la selectividad durante la flotación de sulfuros. La tercera etapa consistió en determinar si los iones plomo, cobre y zinc producen la activación o depresión de minerales. Durante la flotación de galena, los iones plomo deprimieron la esfalerita, pirita y dolomita en una concentración de 400 ppm, pero la esfalerita fue activada en una concentración de 800 ppm con una recuperación de 69,5% y mejora la relación de 1.3. La esfalerita fue activada con una concentración de 400 ppm de cobre (89% de recuperación) y un poco

deprimida a 800ppm de iones de cobre (73% recuperación). Una tendencia similar fue encontrada para los demás minerales de sulfuro.

3.4 Espectroscopía de Absorción Atómica (AA)

La Absorción Atómica (AA) en la actualidad es una técnica capaz de detectar y determinar cuantitativamente la mayoría de los elementos del sistema periódico. Sus campos de aplicación son, por tanto, muy diversos.

La AA permite medir la concentración de un elemento de interés por analizar (analito), mediante la excitación de los átomos de una muestra en estado acuoso a partir de un proceso de atomización mediante una fuente térmica (con flama o sin flama) y la excitación propiamente dicha, dada por la incidencia de un haz de luz emitido por una fuente lumínica producida por la incandescencia de un cátodo fabricado del mismo metal que el analito por cuantificar.

Los elementos que se pueden determinar directamente por esta técnica se muestran en la figura 3.8. Sin embargo la posibilidad de determinar otros elementos como los lantánidos y algunos actínidos siempre y cuando se encuentren en concentraciones mesurables arriba del límite de cuantificación de esta técnica, igualmente algunos elementos no metálicos se pueden cuantificar de forma indirecta, esto es mediante una reacción estequiométrica con un metal el cual se cuantifica directamente y por estequiometria se obtiene la concentración del elemento no metálico.

Li	Be											B					
Na	Mg											Al	Si				
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se		
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te		
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po		
		Ac															

Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Th	Pa	U											

Figura 3.8 Elementos que se determinan directamente por AA⁽²⁰⁾

En general, un equipo de AA está conformado por una fuente luminosa, una fuente de atomización, un amplificador, un detector y un lector como se muestra en la figura 3.9.

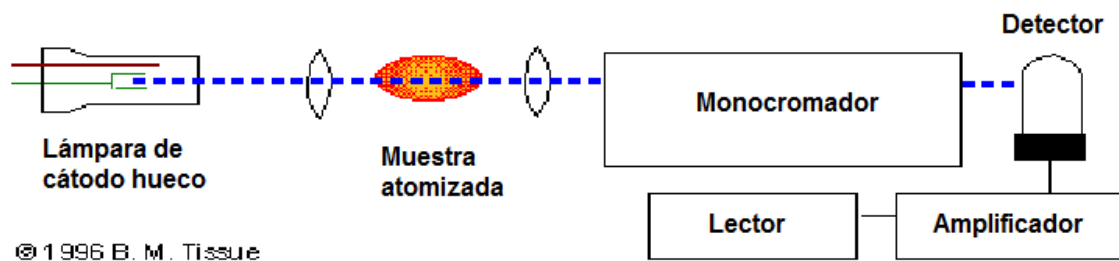


Figura 3.9 Esquema de un equipo de AA⁽²⁰⁾

Para la atomización de la muestra, se tiene dos procedimientos:

- Con llama: muestras líquidas y gases.
- Horno con cámara de grafito (sin llama): muestras sólidas y líquidas.

CAPÍTULO 4. EXPERIMENTACIÓN METALÚRGICA

El diagrama de la experimentación se presenta en la figura 4.1 con el objeto de simplificar las actividades realizadas. Posteriormente se detallan cada una de ellas.

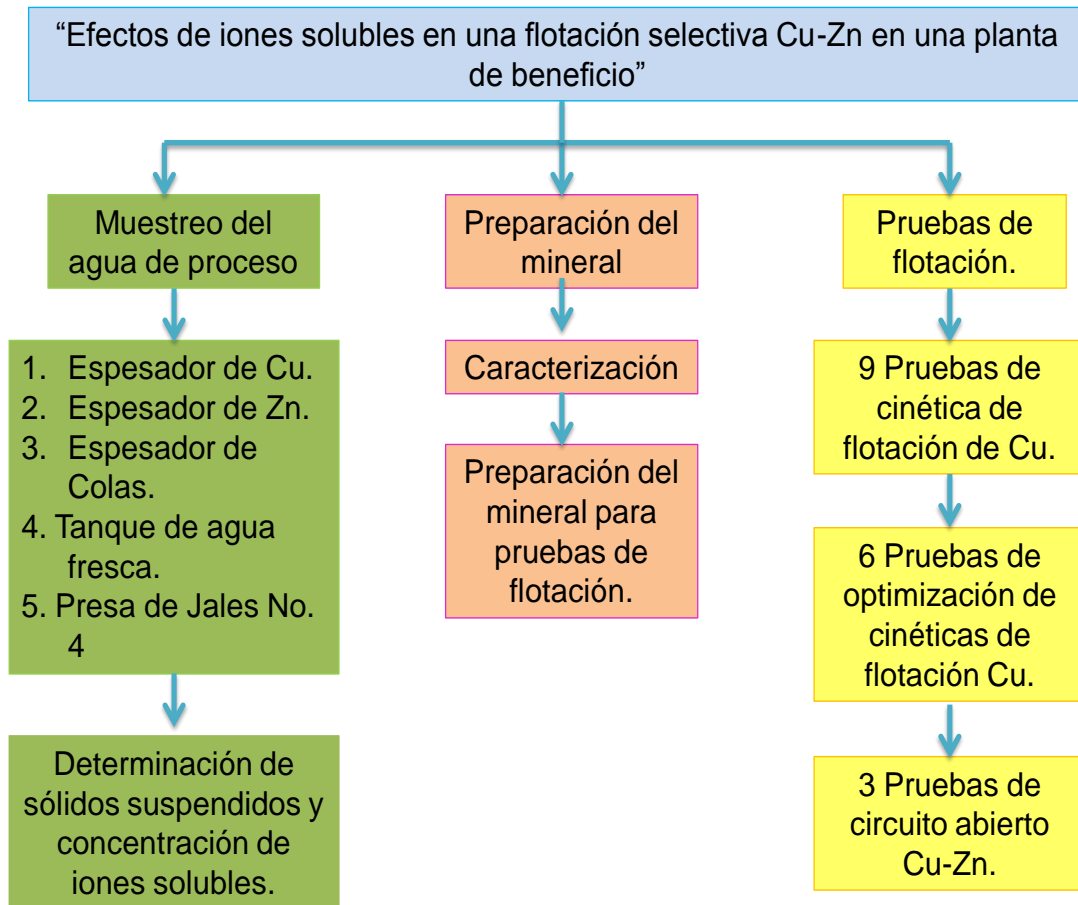


Figura 4.1 Esquema de las etapas de experimentación.

Previo a la descripción del diseño de experimentos, es importante conocer los puntos de interés relacionados con el proceso para posteriormente enfocarlos en el marco de experimentación. En la planta de beneficio No. 2 de Minera Sabinas se obtiene concentrado de cobre y de zinc. De manera general, el proceso consiste en:

Del interior de la mina se extraen las menas de sulfuros de cobre y zinc que son transportadas al patio de gruesos por medio de camiones de acarreo para su adecuada trituración, ésta cuenta con un circuito de trituración que consta de una quebradora primaria de quijada Nordberg 25X40" (reducción de 20" a 4"), una quebradora secundaria de cono Sandvick CH-440 (reducción de 4" a $\frac{3}{4}$ "), y dos quebradoras terciarias, la #1 es Nordberg Omnicone 1560, y la #2 Sandvick CH-440 (reducción de $\frac{3}{4}$ " a $\frac{1}{4}$ "). El mineral es transportado en bandas para ser depositado en una tolva la cual almacena el mineral con tamaño de $\frac{1}{4}$ " para posteriormente depositarlo en otra banda que transporta el mineral a dos Molinos de Bolas que realizan la reducción de tamaño de $\frac{1}{4}$ " a – 200 mallas (-75 μ m para la liberación de tamaño de las especies de interés), en molinos se agrega el sulfato de zinc, cianuro de sodio y cal. La descarga del molino se clasifica por medio de 4 hidrociclones que permiten la separación del mineral molido en tamaño fino que es mandado a los tanques de acondicionamiento de cobre y los gruesos que son recirculados al molino de bolas para su adecuada reducción de tamaño.

Se tiene un tiempo de acondicionamiento de 15 minutos tanto en el acondicionador de cobre como en el acondicionador de zinc, en ellos se adiciona los colectores, espumantes y depresores necesarios para la flotación del elemento

de interés. En la figura 4.2 se muestra el circuito de flotación de la planta No. 2 de cobre-zinc:

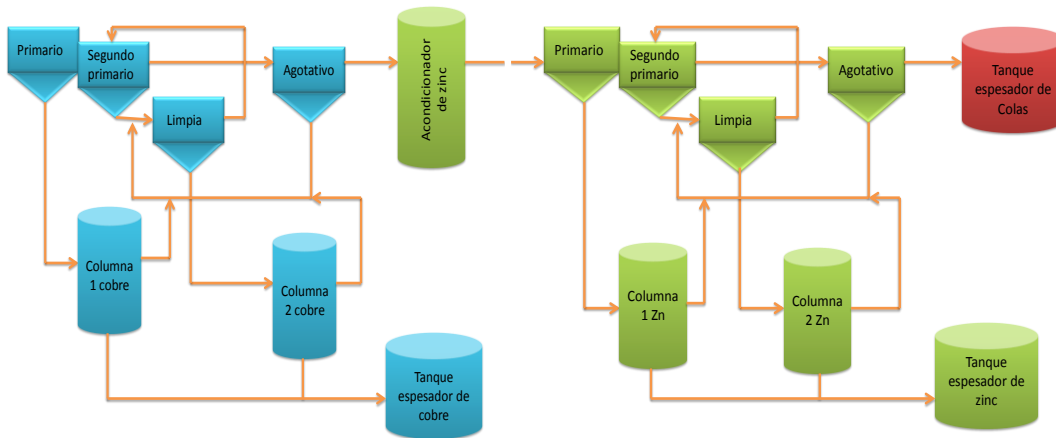


Figura 4.2 Circuito representativo de flotación cobre-zinc de la planta de beneficio No. 2.

El concentrado de cobre y zinc así como las colas finales que se obtienen en la flotación se conducen a los 3 tanques espesadores: de cobre, de zinc y colas (jal). Para el concentrado de cobre y de zinc es transportado del derrame de los tanques espesadores a los filtros, mientras que el derrame del tanque de colas es transportado a la Presa de Jales No. 4. El agua de rebose de los 3 tanques es recirculada al proceso así como la de la presa de jales.

Los concentrados de cobre y zinc son transportados en tráileres a diferentes destinos. Se toma una muestra para realizar un ensaye por absorción atómica para determinar la cantidad de cada elemento y el porcentaje de humedad para el control y calidad del concentrado.

Los minerales que son procesados en planta No. 2 son:

- Calcopirita ($CuFeS_2$)

- Bornita (Cu_5FeS_4)
- Esfalerita (ZnS)
- Pirita (FeS_2)
- Pirrotita hexagonal y monoclinica
- Arsenopirita (FeAsS)

4.1 Material y equipo

- Cloruro ferroso tetrahidratado ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)
- Cloruro de calcio (CaCl_2)
- Sulfato de cobre (CuSO_4)
- Sulfato de zinc (ZnSO_4)
- Cal (CaO)
- Carbonato de Sodio (Na_2CO_3)
- Metabisulfito de Sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$)
- Hidróxido de sodio (NaOH)
- Ácido nítrico (HNO_3)
- Colector Aerofina 3814
- Colector 8222
- Espumante CC-574
- Cianuro de sodio (NaCN)
- Agua purificada
- Filtros microfibra
- Filtros

- Tamiz (10, 20, 30, 40, 60, 100, 140, 200)
- ROTAP Fritsch
- Molino de bolas
- Celda de flotación de laboratorio
- Pulverizadora
- Equipo de absorción atómica AAnalyst 200

4.2 Diseño experimental

Para la elaboración de este trabajo de investigación se realizó un análisis químico del agua de proceso que se utiliza en la flotación de minerales sulfurados de cobre que son procesados en esta Unidad por lo que se hizo un muestreo en cinco puntos estratégicos: espesador de cobre (Cu), espesador de zinc (Zn), espesador de colas, tanque de agua fresca y pileta de presa de jales No.4.

A partir de los iones solubles presentes en el agua de proceso se hizo un diseño de experimentos de pruebas de cinética de flotación con el software Design-Expert 6.0.1[®], con los iones cobre (Cu^{2+}), hierro (Fe^{2+}), calcio (Ca^{2+}), modificación de pH y el uso de carbonato de sodio (Na_2CO_3) utilizando agua potable, el diseño consistió en 9 diferentes condiciones con 3 repeticiones cada una, con un total de 27 pruebas con lo que se buscó la mejor y peor condición en cuanto a la recuperación de valores de Cu, Zn y Fe en el concentrado de Cu.

La tabla 4.1 muestra las 9 condiciones que se evaluaron en las pruebas de cinética de flotación de cobre a partir del software Design-Expert 6.0.1[®].

Tabla 4.1 Esquema de pruebas de cinética de Flotación de cobre.

Std	Block	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5
		A: Cu ²⁺ (ppm)	B: Ca ²⁺ (ppm)	C: Fe ²⁺ (ppm)	D: Na ₂ CO ₃ (g/ton)	E: pH
1	1	0	0	0	2500	10
2	1	80	0	0	0	7
3	1	0	1000	0	0	10
4	1	80	1000	0	2500	7
5	1	0	0	80	2500	7
6	1	80	0	80	0	10
7	1	0	1000	80	0	7
8	1	80	1000	80	2500	10
9	1	40	500	40	1250	8.5

De acuerdo a los resultados obtenidos, se realizó un diseño de condiciones de optimización de cinética de flotación de cobre con agua potable y un diseño de circuito abierto cobre-zinc con la mejor y peor condición utilizando agua recirculada (de proceso de la planta).

4.3 Desarrollo experimental.

El muestreo del agua de proceso realizado se llevó a cabo en tres etapas:

1. Del 25 de febrero al 01 de marzo 2014.
2. Del 17 al 22 de marzo 2014.
3. Del 01 al 07 de abril 2014.

La figura 4.3 representa el ciclo del agua de proceso, el cual inicia en los tanques de agua recuperada, agua fresca y agua de mina los cuales aportan el agua para el proceso de la planta y la preparación de reactivos. Después del proceso, el agua es decantada de los espesadores de cobre, zinc y colas que es recolectada en las piletas y bombeada a los tanques de agua recuperada. La descarga del

espesador de colas se bombea a la presa de jales No. 4, en la cual el agua recuperada de la presa es bombeada al tanque de agua recuperada e inicia el ciclo nuevamente.

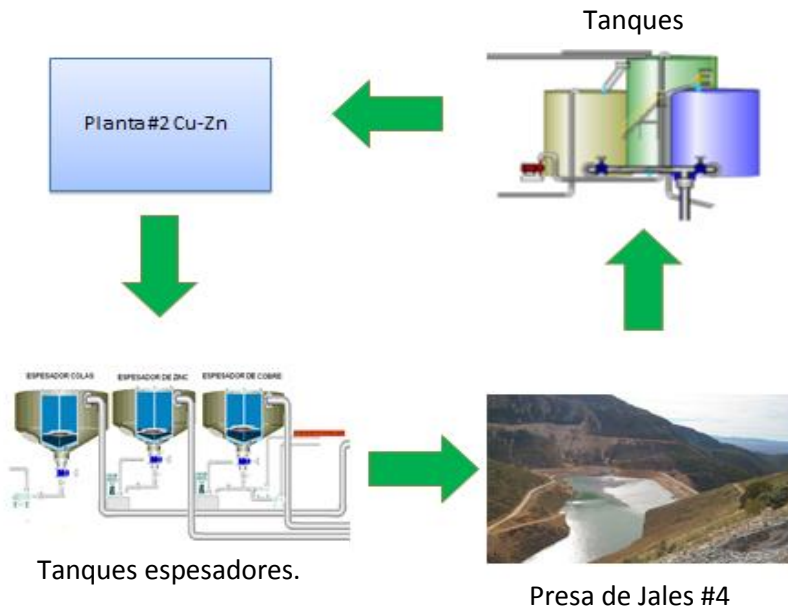


Figura 4.3 Ciclo de agua de proceso.

El agua de los tres espesadores proviene de la planta concentradora No. 2. Para el muestreo del agua se midieron los sólidos suspendidos que contiene cada punto de muestreo. Se filtraron 50ml del agua en filtros de microfibra pesando el papel antes y después de filtrar la muestra. A partir de la ecuación 4 se efectuó el cálculo de los sólidos suspendidos:

$$S.S = \frac{P_f(g) - P_i(g)}{V(ml)} * \frac{1000mg}{g} * \frac{1000ml}{l} = \frac{mg}{l} = ppm \quad Ec.(4)$$

Para la determinación de los iones metálicos y no metálicos presentes en el agua primero se hizo una filtración para eliminar los sólidos suspendidos y se le agregó 1ml de HNO₃ por cada 100ml de agua con el objeto de realizar su ensaye por

medio de la técnica de absorción atómica. La figura 4.4 muestra la preparación de agua por dos filtros para la eliminación de sólidos suspendidos.



Figura 4.4 Preparación de agua para análisis químico.

En la figura 4.5 se hace referencia al equipo de Absorción Atómica con el cual se determinó el contenido de elementos metálicos y no metálicos solubles en el agua de los 5 puntos de muestreo así como también el ensaye de las muestras de cinética y circuito abierto de cobre-zinc.



Figura 4.5 Absorción atómica AAnalyst 200.

La muestra de 67 kg se pasó por una quebradora nivel laboratorio para obtener un tamaño de partícula menor a $1666\mu\text{m}$ (malla 10), cuarteándola y homogenizándola hasta conseguir dos muestras de 20g para su pulverización y ensaye para la determinación de la ley de cabeza del compósito a ocupar. La muestra completa fue pesada por kilo para las pruebas de flotación. En la figura 4.6 se muestra la quebradora utilizada para la preparación de la muestra en la cual se obtiene un tamaño menor a $1666\mu\text{m}$.



Figura 4.6 Quebradora para muestras de laboratorio.

Se hizo una distribución granulométrica de una muestra de 1kg triturada y otra muestra de 1kg después de la molienda por las mallas 10, 20, 30, 40, 60, 100, 140 y 200 en el ROTAP durante 25 minutos; pesando el mineral que contenía cada malla para la obtención del P_{80} . En la figura 4.7 se muestra dicho equipo.



Figura 4.7 ROTAP Fritsch

De acuerdo al diseño de experimentos que se obtuvo, las pruebas se realizaron siguiendo un mismo esquema de reactivos para todas las pruebas evitando que fuera una variable más de estudio. El diseño se hizo para las menas sulfuradas de cobre-zinc que corresponden al proceso de la planta No. 2. En la figura 4.8 se muestra el esquema de reactivo estándar que se utilizó para todas las pruebas.

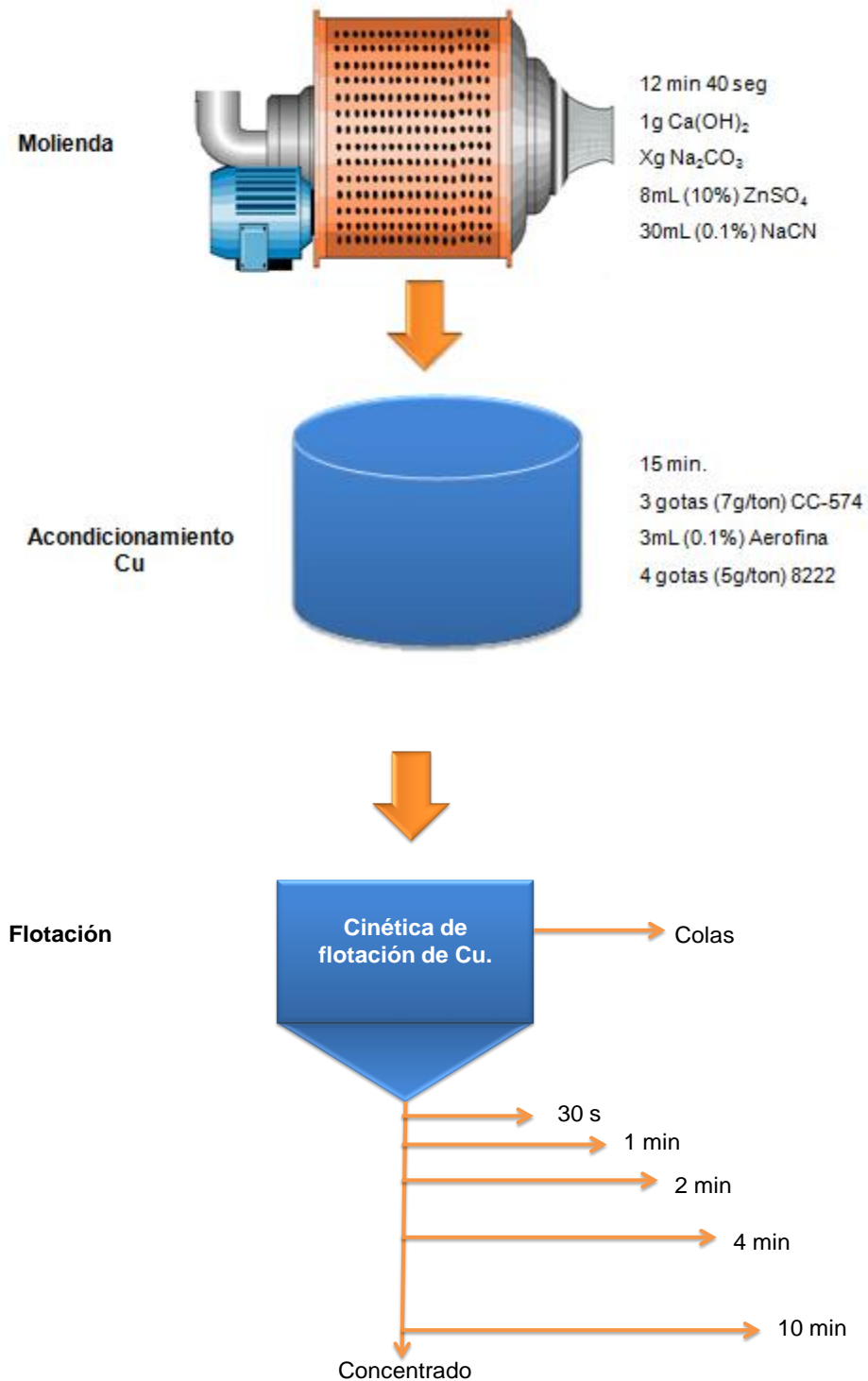


Figura 4.8 Esquema de reactivos para las pruebas de cinética de flotación de cobre.

Para cada prueba, se prepararon 8L de agua con la concentración del ión correspondiente. La muestra de 1kg se colocó en el molino de bolas adicionándole los reactivos de acuerdo al esquema de reactivos correspondiente a la prueba a realizar, todas las pruebas se hicieron con un tiempo de molienda de 12 min 40s y un 62% de sólidos para su adecuada molienda.

La figura 4.9 muestra el molino de bolas de laboratorio utilizado para la molienda de los minerales.



Figura 4.9 Molino de bolas.

Al término de la molienda, la muestra se colocó en la celda de flotación con una capacidad de 4L y con 1000 rpm, se le dio un tiempo de acondicionamiento de 15min con la cantidad indicada en el esquema de reactivos del colector, espumante y ajustando el pH.

Las pruebas de cinética se realizaron con un tiempo de 10 minutos, tomando concentrado a 30s, 1, 2, 4 y 10 minutos. Cada muestra se secó, se pesó y se pulverizó para después realizar el ensaye por absorción atómica y volumetría.

La figura 4.10 muestra la celda de flotación de laboratorio utilizada para las pruebas.



Figura 4.10 Celda de flotación de laboratorio, modelo B755- SER.

Después de obtener los resultados de las 27 pruebas y evaluar el promedio de las 3 repeticiones de cada condición, se determinó la mejor condición para la flotación selectiva de cobre sin activación de esfalerita y la peor condición para la flotación no selectiva. Se obtuvieron 6 condiciones de optimización y se realizaron bajo los mismos pasos que las primeras pruebas de flotación.

De acuerdo a las pruebas de optimización se probaron esas condiciones en pruebas de circuito abierto donde se realizó la flotación del concentrado de cobre y zinc, por lo que en el esquema de reactivos se le aumentó la dosificación correspondiente al circuito del zinc, como se muestra en la figura 4.11.

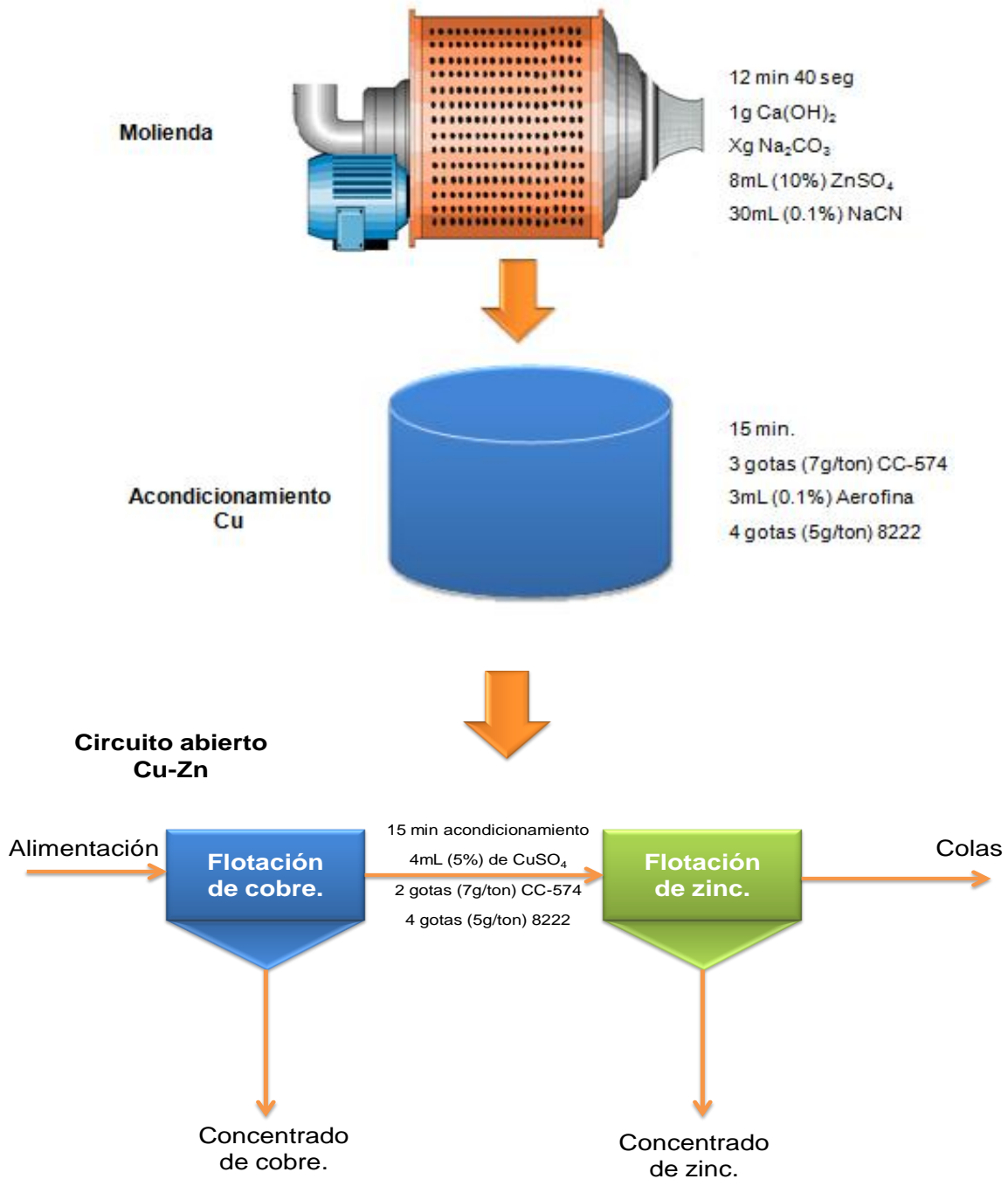


Figura 4.11 Esquema de reactivos para prueba de circuito abierto Cu-Zn.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Caracterización del agua de proceso.

Con los datos obtenidos en el muestreo de agua, se calcularon los valores mínimo, máximo y promedio que maneja el agua de proceso de Minera Sabinas con respecto a los sólidos suspendidos y el pH.

De acuerdo a la tabla 5.1, el pH promedio para el muestreo del agua se tiene que: el espesador de cobre con pH de 7.65, espesador de zinc con pH de 7.84 y el tanque de agua fresca con pH de 7.81 manejando un pH ligeramente alcalino; con respecto a la presa de jales No. 4 con pH de 6.92 casi neutro y en el caso del espesador de colas tiene un pH de 9.7 totalmente alcalino debido a la cantidad de reactivos que se quedan en la ganga o disueltos en el agua.

Con respecto al contenido de sólidos suspendidos, el valor máximo que se obtuvo fue en el espesador de zinc con 3194 ppm debido a una mala decantación de agua o falta de floculante. En el caso del agua fresca los sólidos están presentes desde el suministro. La presa de jales arrastra muy pocos sólidos.

La mayor concentración de sólidos suspendidos se presenta en los espesadores por una ineficiente decantación o suministro de floculante cuya consecuencia es tener gran cantidad de sólidos en el agua de proceso, asentamiento de sólidos en las tuberías, taponamientos, disminución en los flujos de la pulpa y contaminación en la flotación del circuito.

Tabla 5.1 Mínimos, máximos y promedios de pH y sólidos suspendidos.

Puntos de muestreo	pH			Sólidos suspendidos (ppm)		
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio
Espesador de Cu.	7.3	7.96	7.65	6	222	90.0
Espesador de Zn.	7.5	8.44	7.84	60	3194	388.4
Espesador de Colas.	8.85	10.46	9.70	32	922	178.9
Tanque de agua fresca.	7.25	8.56	7.81	2	340	84.4
Presa de jales 4.	6.95	7.65	6.92	2	162	36.5

Con respecto a los elementos metálicos y no metálicos presentes en el agua de proceso, se hizo un resumen en la tabla 5.2 de los elementos analizados con valores mínimos, máximos y promedio.

De manera general los iones Cu^{2+} y Pb^{2+} así como también el Fe total tuvieron concentraciones menores a 1ppm por lo que no es significativo o problemáticos en el agua de proceso. Los iones Ca^{2+} , SO_4^{2-} , y Mg^{2+} son determinantes de la dureza del agua que al reaccionar entre ellos producen yeso (CaSO_4) formándose una capa en la superficie de las partículas de interés provocando la ineficiencia en la flotación de los concentrados. Los iones Zn^{2+} , no representan problemas para el agua de proceso ya que están presentes en pequeñas cantidades.

Tabla 5.2 Valores mínimos, máximos y promedios de los iones metálicos y no metálicos presentes en el agua de proceso.

Punto de muestreo	Valor	Ca ²⁺ (ppm)	Fe _{Total} (ppm)	Cu ²⁺ (ppm)	Zn ²⁺ (ppm)	Pb ²⁺ (ppm)	Mg ²⁺ (ppm)	SO ₄ ²⁻ (ppm)
Espesador de Cu	Máximo	638	<1	<1	4	1	17	1600
	Mínimo	516	<1	<1	1	1	12	1270
	Promedio	585	<1	<1	2	1	13	1468
Espesador de Zn	Máximo	695	<1	1	6	<1	14	1750
	Mínimo	559	<1	1	1	<1	8	1370
	Promedio	620	<1	1	2	<1	11	1586
Espesador de Colas	Máximo	744	<1	5	1	<1	9	1900
	Mínimo	561	<1	1	1	<1	3	1430
	Promedio	688	<1	2	1	<1	4	1732
Tanque de agua fresca	Máximo	674	3	2	3	<1	24	1740
	Mínimo	403	2	1	1	<1	6	1040
	Promedio	592	2	1	1	<1	11	1493
Presa de jales 4	Máximo	703	<1	73	6	<1	15	1850
	Mínimo	572	<1	1	1	<1	7	1490
	Promedio	648	<1	7	1	<1	12	1629

5.2 Caracterización de la muestra

Para conocer el contenido de los elementos de interés se realizó un análisis de cabeza con el compósito que se trabajó, en la tabla 5.3 se muestra el contenido de cada elemento de importancia en la cabeza:

Tabla 5.3 Ley de cabeza del compósito Julio-Agosto 2013.

Ag (g/ton)	Cu (%)	Zn (%)	Fe (%)	Pb (%)	As (%)
92.22	0.94	1.94	5.23	0.19	0.84

La tabla 5.4 muestra la distribución y P_{80} que tuvo la muestra de 1kg después de la quebradora, siendo un tamaño aceptable ya que es menor al requerido para entrar al circuito de molienda sin presentar problemas.

Tabla 5.4 Distribución granulométrica en trituración.

Malla	Micra	Peso (g)	%Retenido	%Acum (+)	%Acum (-)
10	1666	1.47	0.15	0.15	99.85
20	850	445.54	45.19	45.34	54.66
30	600	97.70	9.91	55.25	44.75
40	425	72.57	7.36	62.61	37.39
60	250	90.31	9.16	71.77	28.23
100	150	62.19	6.31	78.08	21.92
140	106	34.99	3.55	81.63	18.37
200	75	28.93	2.93	84.57	15.43
-200	-75	152.16	15.43	100.00	0.00
	Total	985.86	100	P80	1307.57

La figura 5.1 muestra la distribución granulométrica de la muestra después de la trituración así como el tamaño de partícula que tiene el P_{80} .

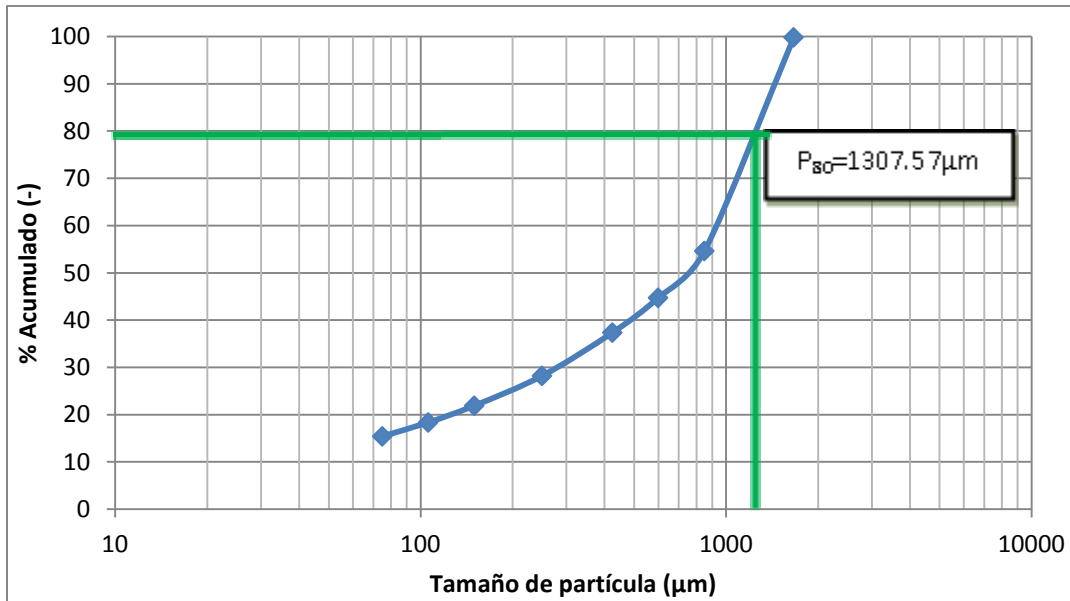


Figura 5.1 Distribución granulométrica de trituración del compuesto Julio-Agosto 2013.

También se realizó una distribución granulométrica a una muestra después de molienda que se muestra en la tabla 5.5 teniendo un tamaño de partícula grueso y que puede disminuir la eficiencia en la flotación del cobre por el tamaño que se tiene y la liberación de partículas de interés.

Tabla 5.5 Distribución granulométrica de molienda.

Malla	Micra	Peso (g)	% Retenido	% Acum (+)	% Acum (-)
20	850	58.31	6.75	6.75	93.25
30	600	8.93	1.03	7.79	92.21
40	425	8.66	1.00	8.79	91.21
60	250	27.49	3.18	11.97	88.03
100	150	72.73	8.42	20.39	79.61
140	106	73.00	8.45	28.85	71.15
200	75	87.69	10.15	39.00	61.00
-200	-75	526.84	61.00	100.00	0.00
	Total	863.65	100.00	P80	150

La figura 5.2 muestra la distribución granulométrica de la muestra después de la molienda así como el tamaño de partícula que tiene el P_{80} , siendo $150\mu\text{m}$ el tamaño de liberación.

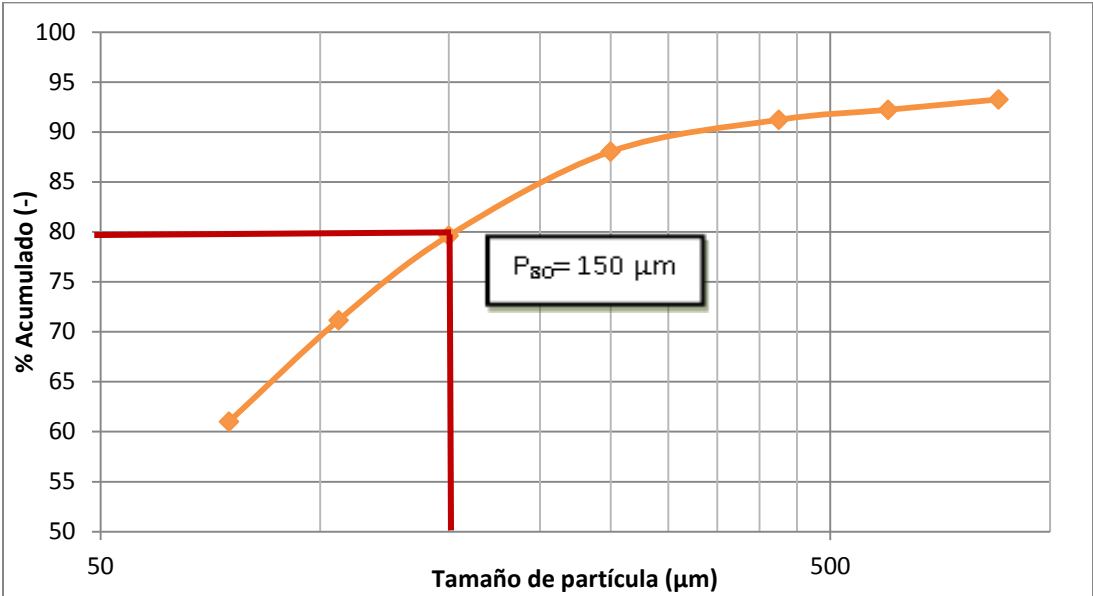


Figura 5.2 Distribución granulométrica de molienda del compuesto Julio-Agosto 2013.

5.3 Flotación

Para las pruebas de cinética de flotación se trabajó con agua fresca, en la tabla 5.6 se muestran las concentraciones de iones disueltos en el agua fresca (cabe aclarar que es agua embotellada y no el agua fresca que se utiliza en el proceso de la planta de beneficio) con las cuales no hay interacción de los iones con las menas sulfuradas permitiendo que el estudio fuera confiable.

Tabla 5.6 Ensaye del agua fresca

Descripción	Ag (g/ton)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Fe (ppm)	As (ppm)
Agua fresca	0	0.06	0.07	0.17	0.04	0.06

A través de los resultados obtenidos y analizados con ayuda del software Design-Expert 6.0.1[®] se obtuvo un modelo con el cual se puede calcular el % de recuperación del cobre, plata, zinc e hierro en las diferentes condiciones propuestas en el diseño de experimento.

Con base a los iones en estudio así como el pH, se obtuvo un mayor efecto en la recuperación de zinc del concentrado de cobre, motivo por el cual es el único reportado.

En la tabla 5.7 se presenta el análisis de varianza de los datos obtenidos de las 27 pruebas con respecto a la recuperación del zinc. Para que el modelo sea significativo la probabilidad de F debe ser menor a 0.05, por lo que el valor del modelo de zinc está en el rango de aceptación. Con respecto a los factores evaluados, el factor A (ion Cu^{2+}) es el único con un efecto significativo en la recuperación de zinc (probabilidad menor a 0.05). Los otros factores no tienen efecto significativo en la recuperación de zinc.

Tabla 5.7 Análisis de varianza.

Factor	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media Cuadrática	Valor F	Prob > F	
Modelo	14186.10	7	2026.59	12.080	< 0.0001	significativo
A	12339.05	1	12339.05	73.550	< 0.0001	
B	429.65	1	429.65	2.560	0.1269	
C	563.80	1	563.80	3.360	0.0834	
D	388.96	1	388.96	2.320	0.1452	
E	459.76	1	459.76	2.740	0.1152	
BC	1.69	1	1.69	0.010	0.9212	
BE	3.19	1	3.19	0.019	0.8919	significativo
Curvatura	1399.73	1	1399.73	8.340	0.0098	
Error	3019.66	18	167.76			
Total	18605.50	26				

El modelo (1) representa el % de recuperación del zinc a partir de la concentración (ppm) de los iones evaluados y el pH con el que se quiera trabajar.

$$\begin{aligned} \%Rec Zn = & 28.45975 + 0.56686 * Cu + 0.012064 * Ca - 0.12780 * Fe - 3.22061E \\ & - 003 * NaCO_3 + 3.16093 * pH + 1.32543E - 005 * Ca * Fe - 4.86062E \\ & - 004 * Ca * pH \end{aligned}$$

modelo (1)

La figura 5.3 muestra un comportamiento normal de los datos analizados, lo cual indica que son confiables para interpretar el comportamiento de la recuperación de zinc en una flotación de menas sulfurosas.

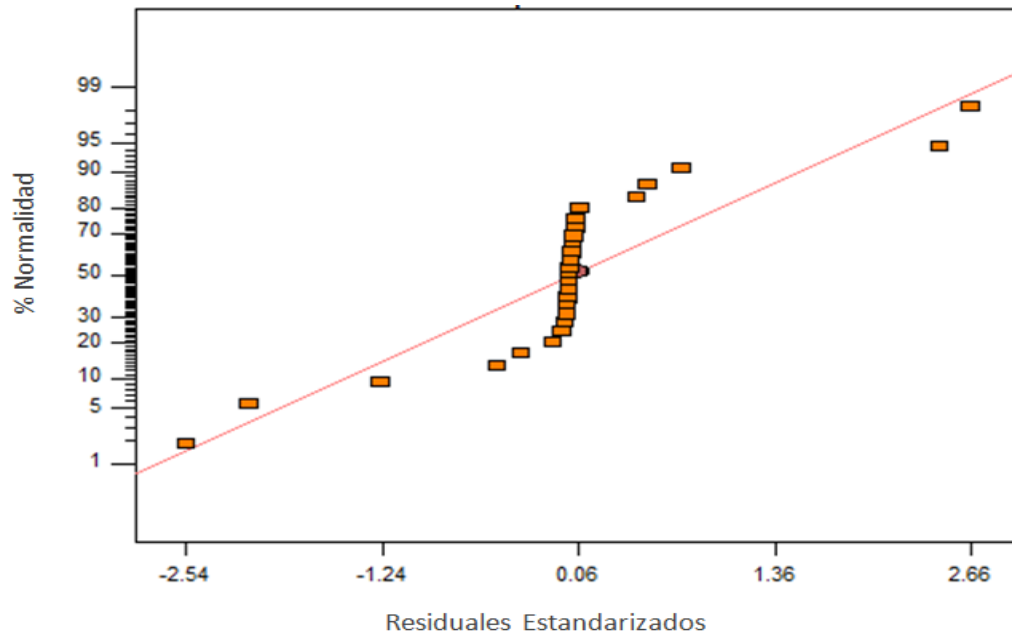


Figura 5.3 Normalidad de los datos de recuperación de zinc.

De acuerdo al modelo 1 que se obtuvo del software Design-Expert 6.0.1[®] sobre la recuperación de zinc en el concentrado de cobre de las cinéticas de cobre, se decidió comparar los valores teóricos (obtenido del modelo) y real (experimentales) para las 9 condiciones iniciales en la tabla 5.8. Como el modelo 1 toma en cuenta los 5 factores con los que se trabajaron, podemos observar que la recuperación de zinc tanto real como teórica coinciden en casi todas las pruebas excepto en la Std 4 con una variación del 1%, y donde se tuvo mayor desviación entre valores fue la Std 9, donde se presenta una diferencia de 23%, condición en la cual los 5 factores manejan en un valor medio de los límites que se pusieron para cada factor.

Tabla 5.8 % recuperación de Zn real y teórico.

Std	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	% Recuperación	
	A: Cu ²⁺ (ppm)	B: Ca ²⁺ (ppm)	C: Fe ²⁺ (ppm)	D: Na ₂ CO ₃ (g/ton)	E: pH	Zn (real)	Zn (teórico)
1	0	0	0	2500	10	52	52
2	80	0	0	0	7	96	96
3	0	1000	0	0	10	67	67
4	80	1000	0	2500	7	96	97
5	0	0	80	2500	7	32	32
6	80	0	80	0	10	95	95
7	0	1000	80	0	7	50	50
8	80	1000	80	2500	10	95	95
9	40	500	40	1250	8.5	96	73

La tabla 5.9 muestra los resultados de recuperación de cobre, hierro y zinc en el concentrado de cobre de las 9 condiciones de cinética de cobre. La condición más favorable para flotar selectivamente y obtener una alta recuperación de cobre fue la 5 con 88% de recuperación de cobre y baja recuperación de zinc con 32%, mientras que las condiciones menos favorables se obtuvieron en la condición 6 con una recuperación de cobre de 70 % y alta recuperación de zinc con 95%. Las demás condiciones tuvieron una recuperación de cobre entre 80-90% pero baja selectividad con respecto al zinc. La recuperación del hierro en las 9 pruebas está en un intervalo de 13 a 19% sin registrar una variación considerable.

Evaluando los efectos de los iones en las 9 condiciones, la presencia del Cu²⁺ sin importar que estuvieran presentes otros iones ocasionó la activación de la esfalerita por lo que la recuperación del Zn en el concentrado de cobre es alta. El ion Ca²⁺ benefició principalmente la recuperación de cobre pero también tuvo efecto en el zinc. Sin embargo, la presencia de Fe²⁺ deprimió al zinc de manera

considerable sin tener tanto efecto en el cobre. El carbonato de sodio al parecer ayudó a la recuperación de cobre y zinc y con respecto al pH, su efecto predominó en la flotación de zinc favoreciéndola cuando éste es más alcalino. La recuperación de hierro no se ve muy afectada por los 5 factores con los que se trabajó por lo que al parecer no tienen gran efecto en él.

Tabla 5.9 Porcentaje de recuperación del Cu, Zn y Fe en el concentrado de cobre de las 9 condiciones.

Std	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	% Recuperación		
	A: Cu ²⁺ (ppm)	B: Ca ²⁺ (ppm)	C: Fe ²⁺ (ppm)	Na ₂ CO ₃ (g/ton)	E: pH	Cu	Zn	Fe
1	0	0	0	2500	10	90	52	17
2	80	0	0	0	7	80	96	13
3	0	1000	0	0	10	93	67	18
4	80	1000	0	2500	7	86	96	17
5	0	0	80	2500	7	88	32	18
6	80	0	80	0	10	70	95	15
7	0	1000	80	0	7	91	50	19
8	80	1000	80	2500	10	77	95	18
9	40	500	40	1250	8.5	74	96	15

Las pruebas de cinética de flotación de cobre con respecto a la recuperación de Cu en el concentrado de cobre se presentan en la figura 5.4, cuyas condiciones experimentales fueron las mencionadas en la tabla 7.9. En general todas las condiciones tienen la misma tendencia. Podemos observar que la recuperación en las condiciones 2, 6, 8 y 9 son menores en comparación con las otras 5. Esto se debe a la presencia de ion Cu²⁺ en las 4 condiciones.

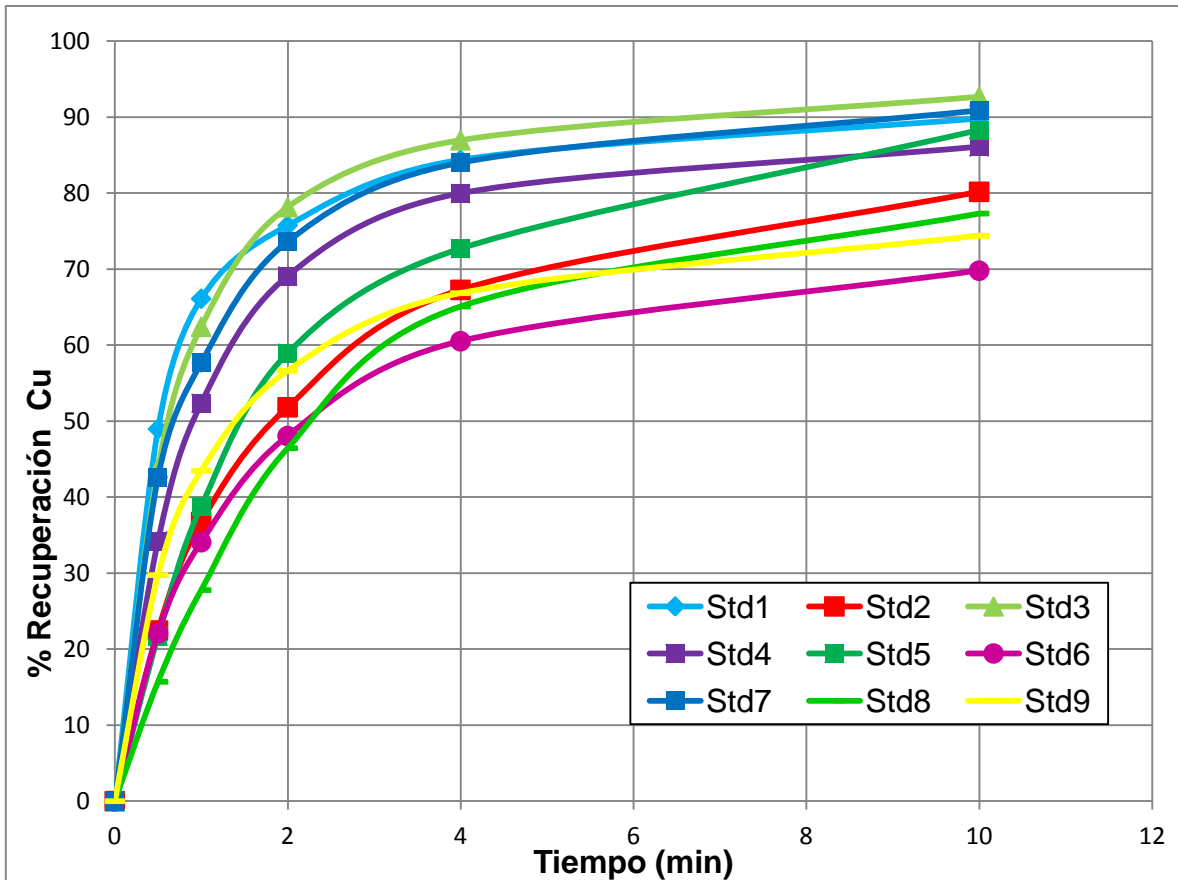


Figura 5.4 % de Recuperación de Cu en el concentrado de cobre para las 9 condiciones a evaluar.

La figura 5.5 representa la recuperación de Zn en el concentrado de cobre en la cinética de cobre. La presencia del ion Cu^{2+} en las condiciones 2, 4, 6, 8 y 9 eliminó la flotación selectiva del sistema cobre-zinc recuperando al mismo tiempo el cobre y activando la esfalerita. Sin embargo, la condición que favoreció las condiciones de selectividad para mantener al zinc deprimido fue la 5, la cual contiene 80ppm del ion Fe^{2+} y 2500g/ton de carbonato de sodio. El efecto de Cu^{2+} en la recuperación de cobre no es tan significativo como en el zinc.

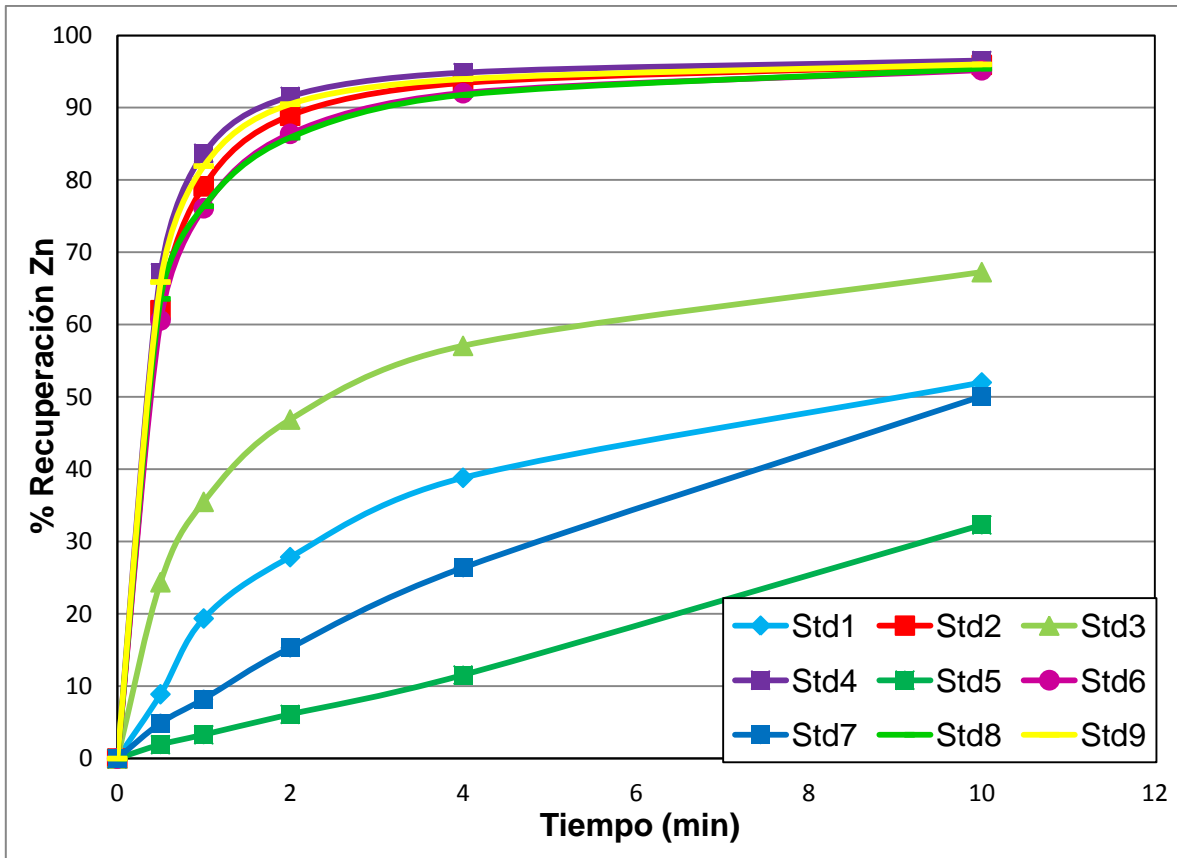


Figura 5.5 % de recuperación de Zn en el concentrado de cobre para las 9 condiciones a evaluar.

La figura 5.6 representa la recuperación de Fe en la cinética de cobre. De manera general la recuperación de hierro en la cinética de cobre no se vio influenciada por alguno de los iones o factores de estudio. El rango de recuperación de hierro es entre 13 a 19%. Cabe mencionar que el hierro puede estar presente en forma de pirita, calcopirita o bornita.

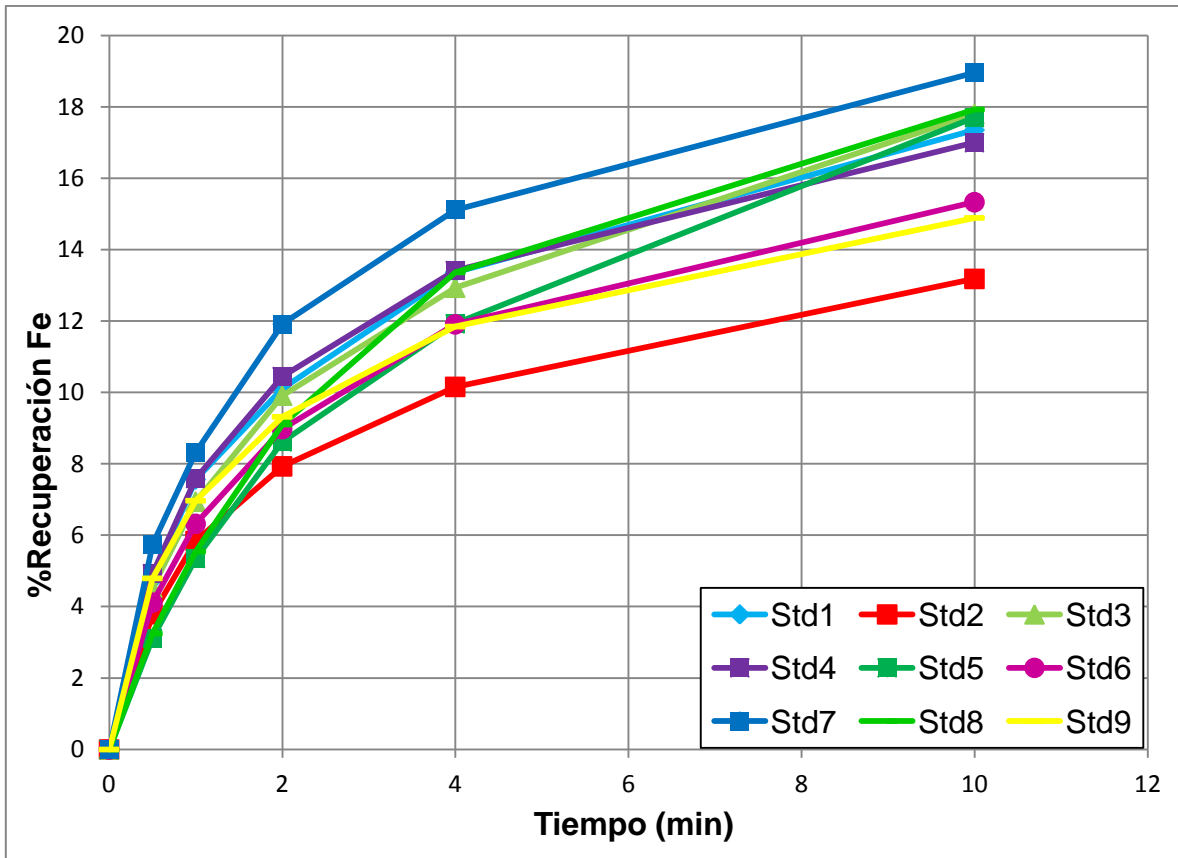


Figura 5.6 % de recuperación de Fe en el concentrado de cobre de las 9 condiciones a evaluar.

La constante específica de flotación del cobre, zinc y del hierro se muestra en la tabla 5.10. Con respecto al cobre, la constante específica tuvo una diferencia entre el valor máximo y mínimo de 2 décimas lo que no es representativa como lo fue en el zinc, donde si tiene una diferencia de 7 décimas, es decir la variación en la rapidez del zinc sí se vio influenciada cuando existe la activación de la esfalerita por efecto del ión cobre. Para el hierro, la diferencia es menor a una décima por lo que se confirma que las condiciones utilizadas no tienen mayor efecto en éste.

Tabla 5.10 Constante específica de flotación del Cu, Zn y Fe.

Std	k (min ⁻¹)		
	Cu	Zn	Fe
1	-0.576	-0.339	-0.329
2	-0.428	-0.742	-0.324
3	-0.613	-0.411	-0.287
4	-0.610	-0.818	-0.347
5	-0.415	-0.109	-0.265
6	-0.468	-0.683	-0.339
7	-0.557	-0.184	-0.353
8	-0.462	-0.620	-0.334
9	-0.507	-0.769	-0.343

Con base a los resultados obtenidos de las 9 condiciones iniciales, la tabla 5.11 muestra las condiciones de las pruebas de optimización en las cuales se buscó flotar selectiva y no selectivamente del sistema cobre-zinc.

Tabla 5.11 Optimización de cinéticas de flotación de cobre.

Std	Block	Tiempo (min)	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5
			A: Cu ²⁺ (ppm)	B: Ca ²⁺ (ppm)	C: Fe ²⁺ (ppm)	D: Na ₂ CO ₃ (g/ton)	E: pH
1a	2	10	0	0	0	500	8
2a	2	7	0	0	80	2500	7
3a	2	10	0	0	80	2500	7
4a	2	10	10	0	0	64	7
5a	2	10	20	0	0	64	7
6a	2	10	30	0	0	64	7

En la tabla 5.12 se presenta el % de recuperación del cobre, hierro y zinc que se obtuvo en las pruebas de optimización. El ion Cu²⁺ aún con la variación de concentración que se manejó activo la esfalerita en el mismo % de recuperación. La combinación entre el Fe²⁺ y el carbonato de sodio benefició una alta

recuperación de cobre y baja recuperación de zinc con un pH dentro del rango de flotación de la bornita y calcopirita. La diferencia del tiempo de flotación de las pruebas 2a y 3a no favoreció significativamente a la recuperación de cobre por lo que no es rentable 10 min. El carbonato de sodio sin presencia de algún ion benefició la recuperación de cobre y zinc.

Tabla 5.12 % de recuperación de Cu, Zn y Fe en el concentrado de cobre en las pruebas de optimización.

Std	Tiempo (min)	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	% Rec		
		A: Cu ²⁺ (ppm)	B: Ca ²⁺ (ppm)	C: Fe ²⁺ (ppm)	D: Na ₂ CO ₃ (g/ton)	E: pH	Cu	Zn	Fe
1a	10	0	0	0	500	8	96	52	19
2a	7	0	0	80	2500	7	89	20	18
3a	10	0	0	80	2500	7	92	21	18
4a	10	10	0	0	64	7	81	96	16
5a	10	20	0	0	64	7	79	95	22
6a	10	30	0	0	64	7	75	95	14

La figura 5.7 presenta la recuperación de Cu en el concentrado de cobre de las pruebas de optimización. En las pruebas 2a y 3a con 80ppm de Fe²⁺, se varió el tiempo de flotación de 7 y 10 minutos, las curvas tienen una tendencia similar obteniendo como resultado una recuperación de cobre del 90% aproximadamente, aunque es posible que al momento de realizar las pruebas no se hiciera las mismas paladas para retirar el concentrado. Las pruebas 4a, 5a y 6a tienen la misma tendencia aunque la recuperación final aumenta cuando la concentración de iones Cu²⁺ es menor.

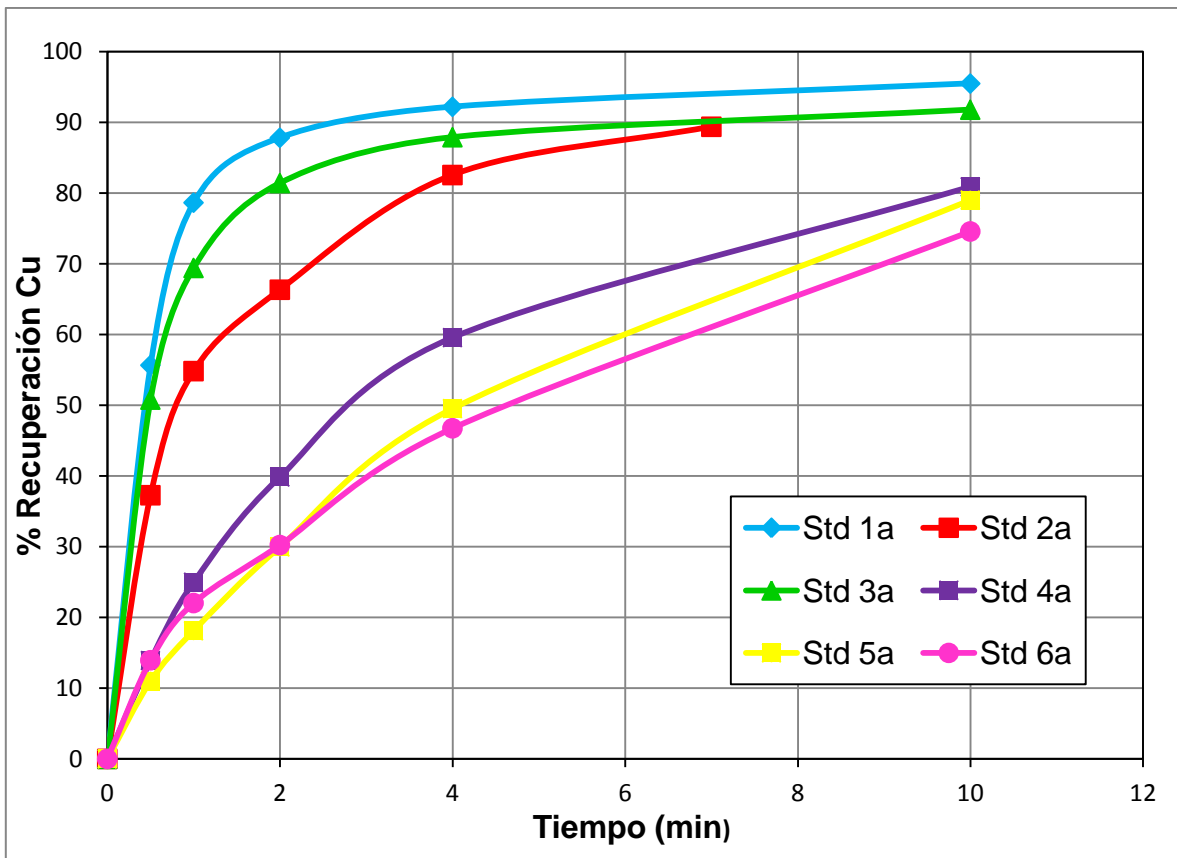


Figura 5.7 % recuperación de Cu en el concentrado de cobre de las pruebas de optimización.

La figura 5.8 muestra la recuperación de Zn en el concentrado de cobre en las pruebas de optimización. En la prueba 1a, se recuperó 50% de zinc, el cual no se deprimió de manera adecuada debido a la presencia de carbonato de sodio que limpia las partículas de sólidos insolubles indeseables en la superficie de las partículas como lo es el yeso.⁽¹⁷⁾ Las dos pruebas que contienen 80ppm de Fe^{2+} mostraron una recuperación de zinc del 20%. Para las pruebas 4a, 5a y 6a las curvas son casi idénticas debido a la activación de la esfalerita aun cuando se tienen 10ppm de Cu^{2+} , por lo tanto bajo estas últimas condiciones fue desfavorable la flotación selectiva.

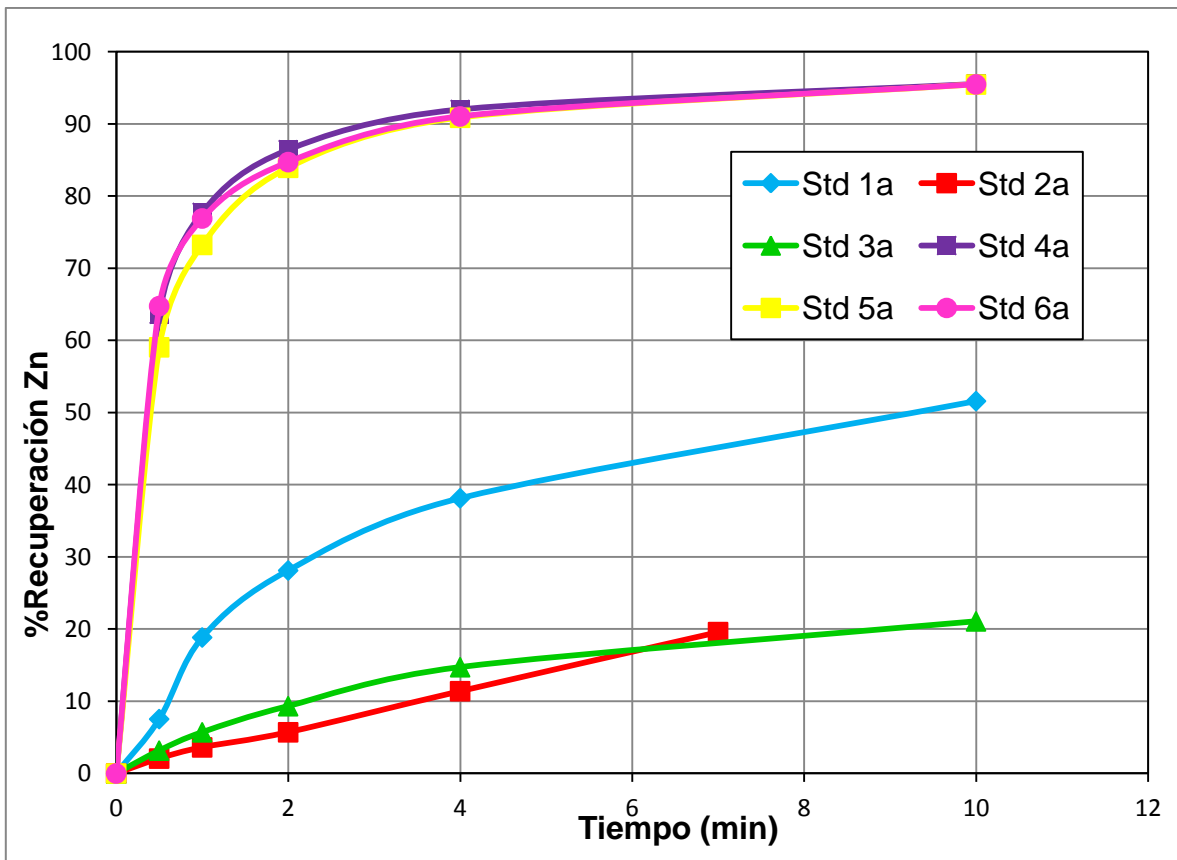


Figura 5.8 % de recuperación de Zn en el concentrado de cobre de las pruebas de optimización.

La figura 5.9 muestra la recuperación de Fe en la flotación de cobre. De manera general, se tiene la misma tendencia de la recuperación de hierro para las 6 condiciones sin presentar grandes cambios. La recuperación fue de 14 a 22% estando dentro del rango de recuperación de las pruebas anteriores.

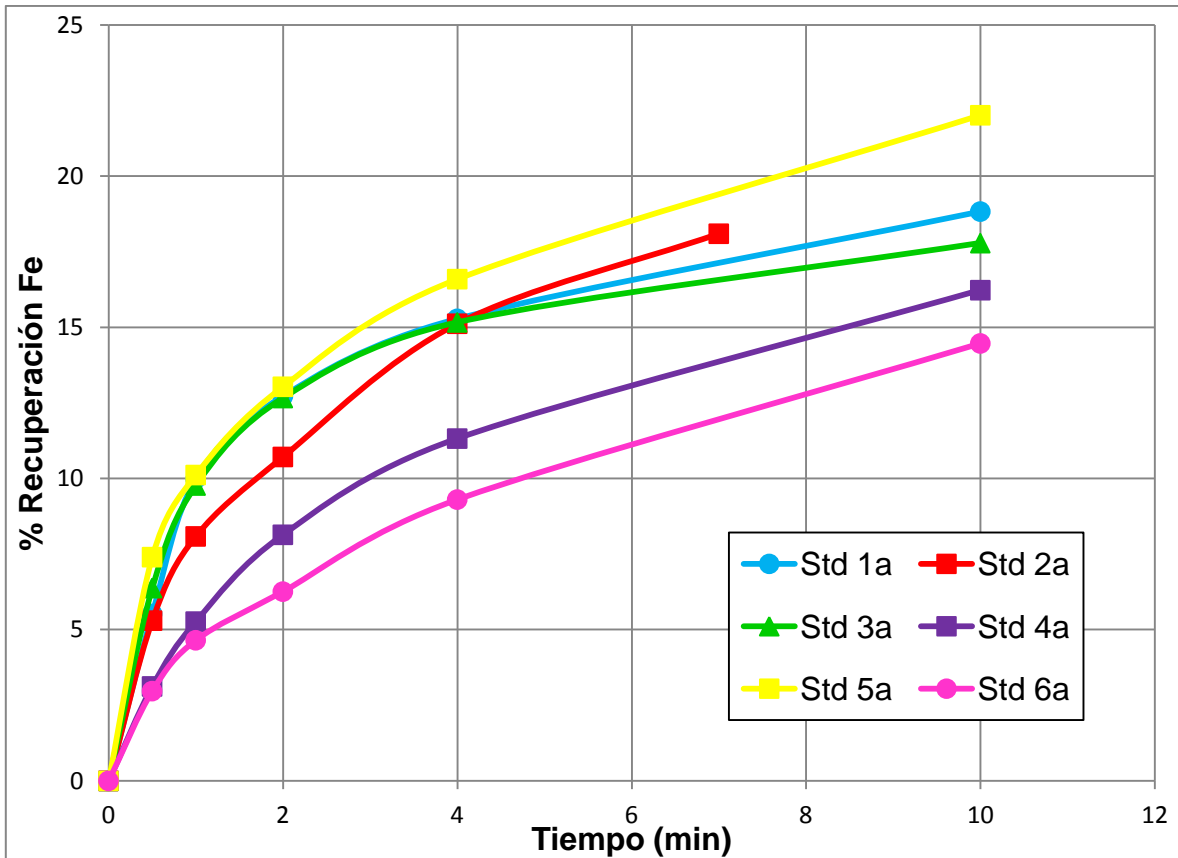


Figura 5.9 % de recuperación de Fe en concentrado de cobre en las pruebas de optimización.

De acuerdo a la tabla 5.13 se muestra las constantes específicas de flotación de cobre, hierro y zinc en las pruebas de optimización. Con respecto al cobre, la rapidez se vio favorecida por el carbonato de sodio, seguida por el ión Fe^{2+} pero se vio disminuida en un 50% por la presencia del Cu^{2+} . La rapidez del zinc también fue favorecida por el carbonato de sodio, disminuyó con respecto al Fe^{2+} , sin embargo, el Cu^{2+} aumentó la rapidez al doble que el carbonato de sodio, sin embargo disminuyó conforme aumenta la concentración del Cu^{2+} . Por último, la rapidez del hierro fue favorecida por el Fe^{2+} seguido por el carbonato de sodio y disminuyó con el Cu^{2+} .

Tabla 5.13 Constante específica de flotación de Cu, Zn y Fe en las pruebas de optimización.

Std	k (min ⁻¹)		
	Cu	Zn	Fe
1a	-0.712	-0.339	-0.378
2a	-0.581	-0.217	-0.417
3a	-0.673	-0.296	-0.420
4a	-0.327	-0.629	-0.281
5a	-0.239	-0.591	-0.283
6a	-0.223	-0.553	-0.229

Las 3 mejores condiciones determinadas en la optimización, se aplicaron para las pruebas de circuito abierto simulando el proceso de flotación de la planta No. 2 con agua de proceso, como se muestra en la tabla 5.14. Como el agua de proceso contiene iones Ca²⁺, la concentración de éste es el valor promedio determinado en el muestreo realizado anteriormente.

Tabla 5.14 Condiciones para las pruebas de flotación de circuito abierto Cu-Zn.

Std	Block	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5
		A: Cu ²⁺ (ppm)	B: Ca ²⁺ (ppm)	C: Fe ²⁺ (ppm)	D: Na ₂ CO ₃ (g/ton)	E: pH
10	3	0	627	0	500	8
11	3	0	627	80	2500	7
12	3	10	627	0	20	7

El circuito abierto Cu-Zn fue realizado con flotación primaria, flotación agotativa y tres limpias tanto para el cobre como para el zinc. En la figura 5.10 se muestra un esquema del circuito.

Circuito abierto Cu-Zn.

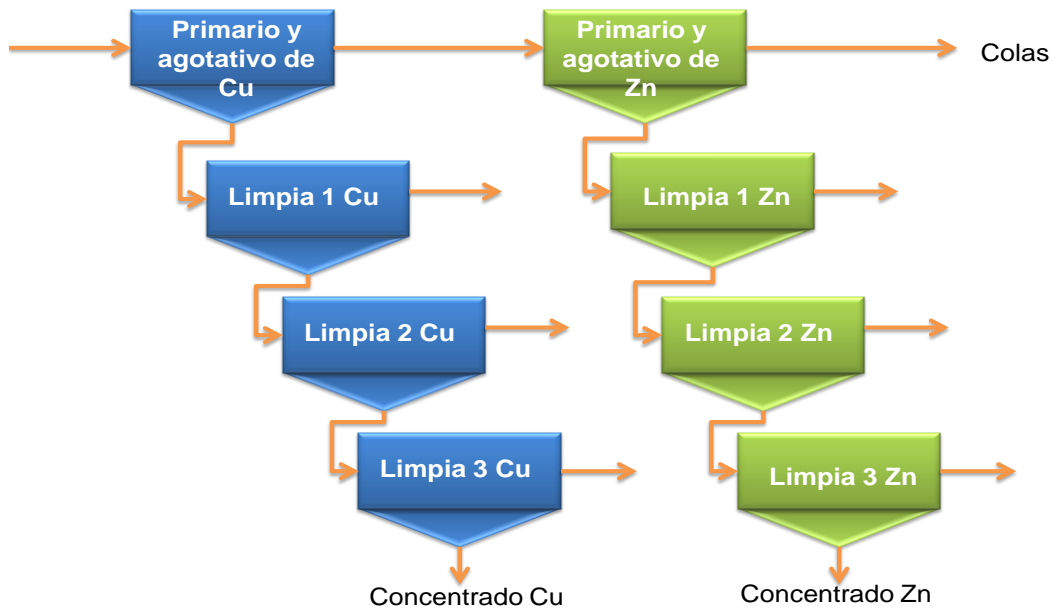


Figura 5.10 Esquema del circuito abierto Cu-Zn

El grado y recuperación del Cu y Zn que se obtuvieron en el concentrado de cobre y zinc de las 3 pruebas de circuito abierto se muestran en la tabla 5.15. El uso del carbonato de sodio y Ca^{2+} favoreció la flotación selectiva Cu-Zn después de las 3 limpieas permitiendo alto grado de Cu en el concentrado de cobre y alto grado de Zn en el concentrado de zinc, con una recuperación adecuada en ambos concentrados. Los iones Fe^{2+} y Ca^{2+} presentes en la prueba 11 permitieron un alto grado de Cu pero baja recuperación después de las limpieas y del mismo modo, un alto grado de Zn pero muy baja recuperación en el concentrado de zinc; las limpieas que se realizaron no favorecieron la recuperación de ambos concentrados aún cuando también se tuvo una flotación selectiva Cu-Zn. En presencia del Cu^{2+} no hubo flotación selectiva Cu-Zn, en la flotación de cobre el grado de Cu es muy bajo y se tiene alto grado y recuperación de Zn en el concentrado de cobre

teniendo como consecuencia que en la flotación de Zn no se tenga concentrado de éste.

Tabla 5.15 Grado-Recuperación de cobre y zinc.

Productos	10				11				12			
	Grado (%)		%Rec		Grado (%)		%Rec		Grado (%)		%Rec	
	Cu	Zn	Cu	Zn	Cu	Zn	Cu	Zn	Cu	Zn	Cu	Zn
Conc Cu	27	6	80	9	25	3	69	4	10	37	39	84
Conc Cu + L3 Cu	26	6	80	10	23	4	75	6	10	35	41	85
Conc Cu + L3 Cu + L2 Cu	25	7	81	10	20	4	80	8	9	32	45	86
Conc Cu + L3 Cu + L2 Cu + L1 Cu	15	7	86	19	12	5	88	17	9	21	66	90
Conc Zn	1	61	1	60	1	57	0	16	11	2	1	0
Conc Zn + L3 Zn	1	59	2	63	1	51	1	25	12	2	2	0
Conc Zn + L3 Zn + L2 Zn	1	51	2	65	1	42	1	31	9	2	6	1
Conc Zn + L3 Zn + L2 Zn + L1 Zn	1	24	3	67	1	26	5	72	6	1	20	3

La figura 5.11 muestra el grado-recuperación de Cu en el concentrado de cobre de las tres pruebas de circuito abierto. Para las tres pruebas que se realizó la tendencia de las curvas es la misma, es decir que al tener mayor grado de cobre se pierde recuperación y esto sucede cuando se realizan las limpiezas en el concentrado. La mejor prueba que tuvo un grado de 27% con recuperación de 80% fue la 10 con el uso de carbonato de sodio y la peor con un grado de 10% y recuperación de 39% fue la 12 con presencia del ion Cu^{2+} .

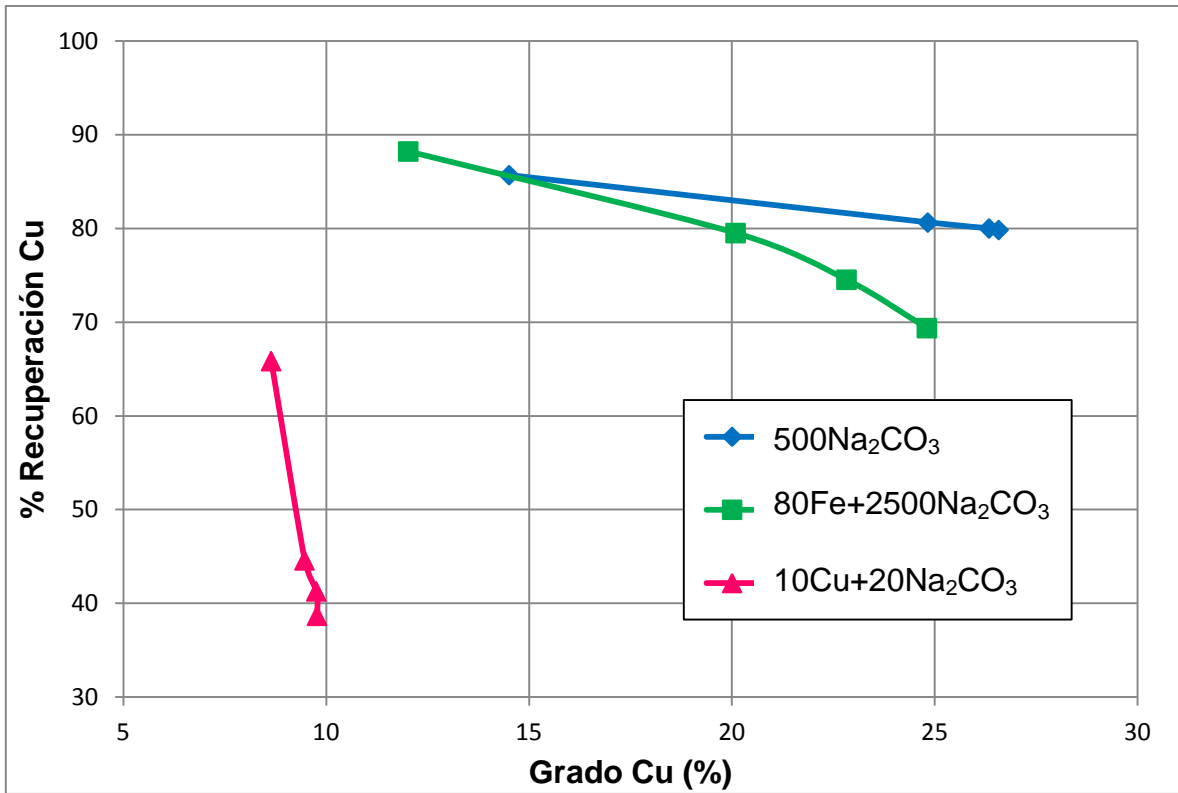


Figura 5.11 Curva grado-recuperación de Cu en el concentrado de cobre de las pruebas de circuito abierto.

El grado-recuperación de Zn en el concentrado de cobre obtenido en las 3 pruebas de circuito abierto de Cu-Zn se presenta en la figura 5.12. Al igual que en la figura anterior, cuando se tiene mayor grado la recuperación disminuye para las 3 pruebas. La mejor prueba en el cual la presencia del Zn en el concentrado de cobre es mínimo fue en la 11 donde se tiene la presencia de Fe²⁺ con un grado de 3% y recuperación de 4%. La prueba 12 provocó la activación de la esfalerita con un grado de 37% y una recuperación de 84% en el concentrado de cobre.

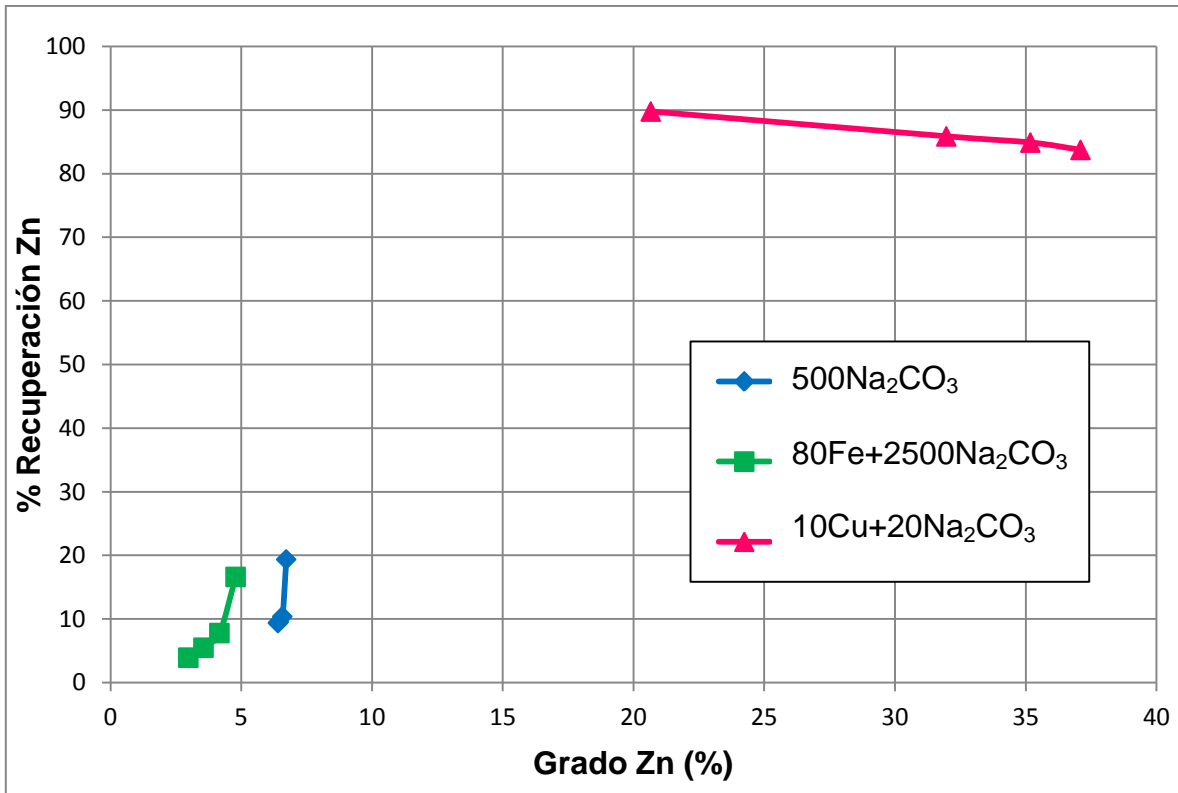


Figura 5.12 Curva grado-recuperación de Zn en concentrado de cobre de las pruebas de circuito abierto.

En las pruebas de circuito abierto Cu-Zn también se realiza la flotación de Zn por lo que es importante evaluar el grado-recuperación de zinc que se obtiene. En la figura 5.13 se muestra el grado-recuperación de Zn en el concentrado de zinc.

La mejor prueba para el concentrado de zinc fue la 10, donde ni el carbonato de sodio ni el Ca^{2+} afectan la flotación selectiva Cu-Zn y permiten un grado de 61% y recuperación de 60% de Zn en el concentrado de zinc. En la prueba 12, el grado y recuperación de Zn son nulos, ya que no se tuvo flotación selectiva y el zinc flotó en el concentrado de cobre.

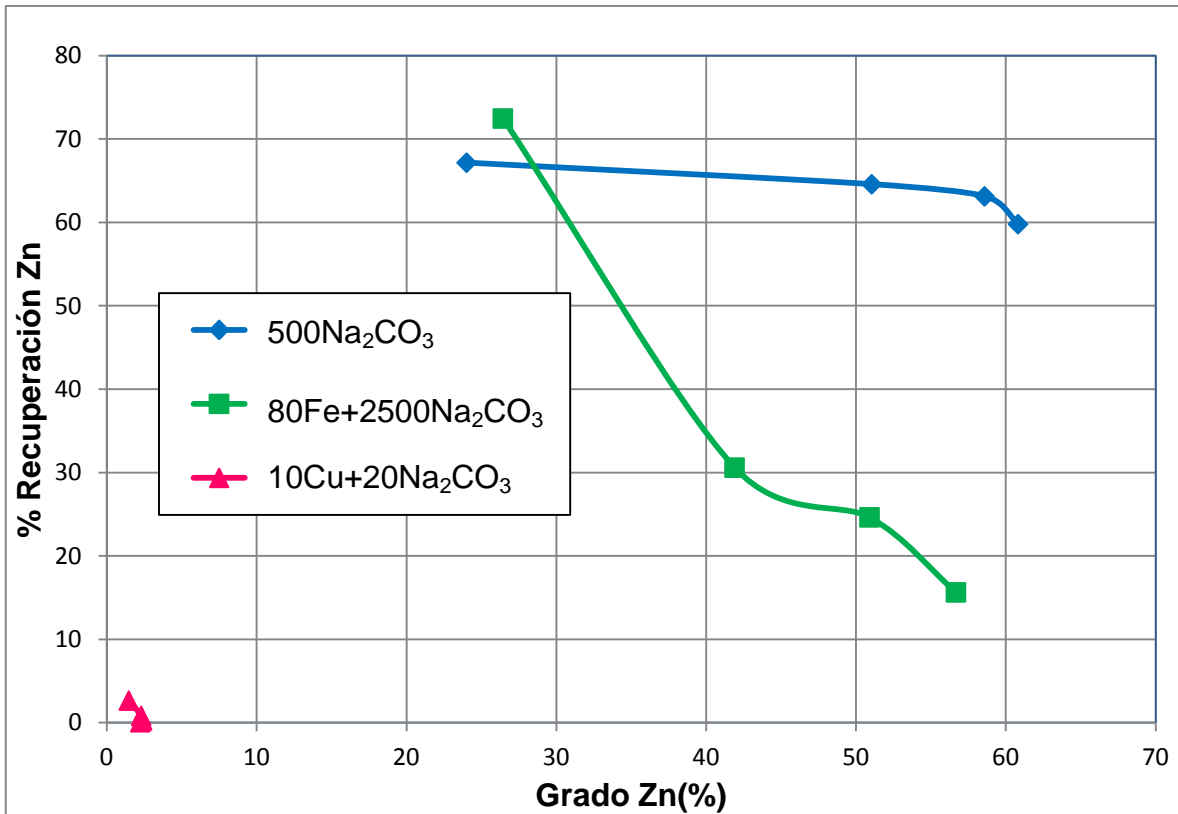


Figura 5.13 Curva grado-recuperación de Zn en concentrado de zinc de las pruebas de circuito abierto.

En la figura 5.14 se muestra la espuma tanto en la flotación de cobre como en la de zinc. Para la figura a) que es la flotación de cobre, sin recuperación de zinc en el concentrado de cobre la espuma siempre era de tamaño muy pequeño y dando la apariencia de lama sin formación de una cama de espuma adecuada. Para la figura b) hace referencia a la espuma cuando había presencia de zinc en el concentrado. Se tenía una espuma muy grande y también con exceso de cama de la flotación.

La diferencia de la estabilidad de la cama de espuma, puede deberse a que no se tuvo un control adecuado tanto para la flotación de cobre como para la del zinc

con respecto a las rpm de la celda para la agitación de la muestra y el aire insuflado ya que la dosificación de los reactivos utilizada fue la determinada por estudios anteriores en la planta de beneficio.

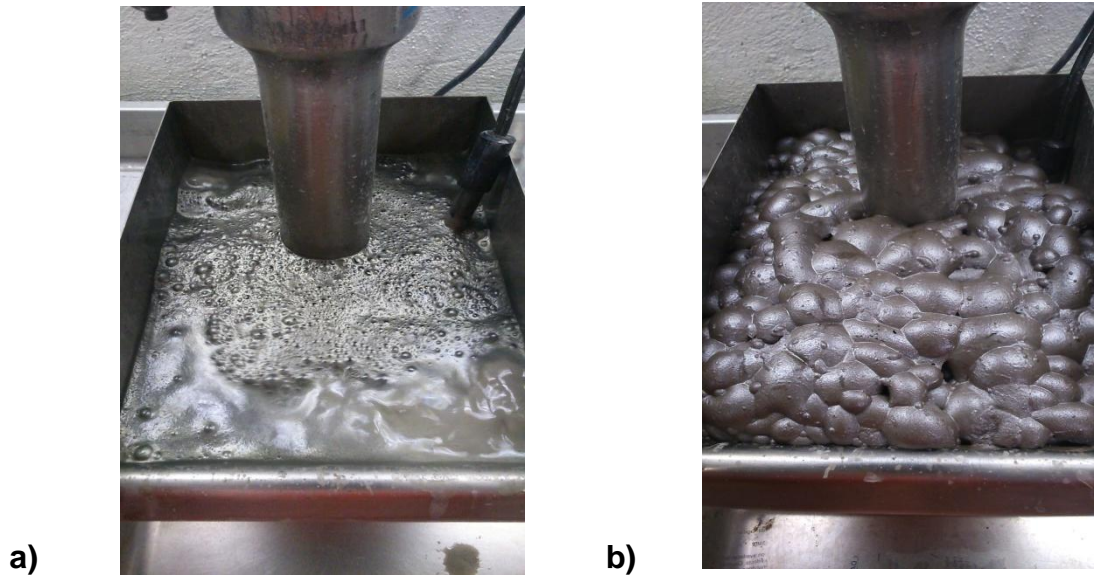


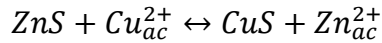
Figura 5.14 a) Espuma de la flotación de cobre y b) Espuma de la flotación de zinc.

De acuerdo a los resultados analizados anteriormente de las pruebas iniciales, de optimización y de circuito abierto Cu-Zn; es importante explicar el efecto de cada ion en la flotación Cu-Zn.

Para el Cu^{2+} el cual evita la flotación selectiva Cu-Zn al activar la esfalerita, en la literatura se tienen diversas teorías sobre lo que sucede:

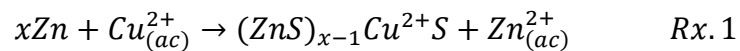
- a) La teoría principal que se maneja en la literatura^(11, 14) propone la formación de una capa de sulfuro de cobre en la superficie de la esfalerita debido a

que el cobre es más electronegativo que el zinc y por lo tanto más difícil de ionizar. La reacción que propone es:

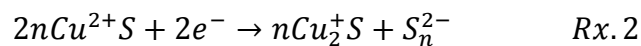


Donde el sulfuro de cobre reacciona con el colector, favoreciendo la hidrofobicidad de la partícula y a su vez generando un producto de formación superficial más insoluble que el obtenido en el Zn.

b) Dávila-Pulido y Uribe-Salas⁽¹⁷⁾ proponen que los iones Cu^{2+} evitan la selectividad en el circuito de cobre ya que forman sulfuro de cobre en la superficie de la esfalerita volviéndolo hidrofóbico al combinarse un polisulfuro con el colector. Las reacciones que proponen son las siguientes:



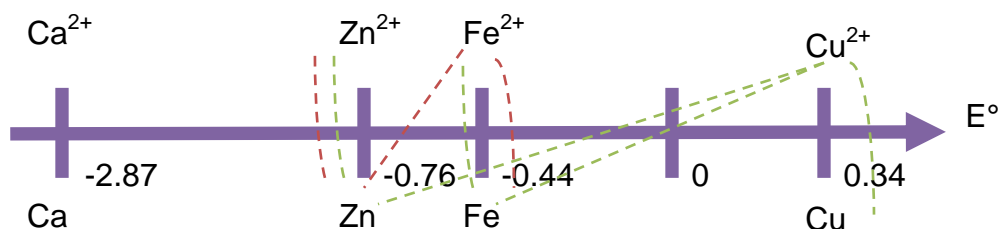
El Cu^{2+} del sulfuro de cobre formado en la superficie de la esfalerita se reduce a Cu^+ dando lugar a la oxidación del sulfuro como polisulfuro, siendo la especie hidrofóbica que entra en contacto con el colector:



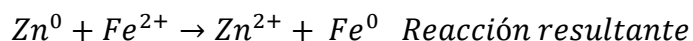
Con respecto al Ca^{2+} , se menciona también que sin la presencia de SO_4^{2-} el efecto del calcio en la esfalerita es mínimo ya que solo afecta en la reducción del ángulo de contacto de ésta, disminuyendo su flotabilidad⁽¹⁷⁾.

c) Otra posible causa es la formación de una pila galvánica en la superficie de la esfalerita con el Cu^{2+} y también el Fe^{2+} por tener un mayor potencial de reducción que el Zn^{2+} , por lo tanto:

Muy oxidantes



Lo mismo pasaría con el Fe^{2+} y Zn^{2+} teniendo una reacción final:



Los cuales el Fe y Cu metálicos reaccionarían con el colector para favorecer la flotación de la esfalerita y en el caso del Fe forma compuestos que no favorecen a la flotación en pH neutro.

En el ANEXO 12 y 13 se tienen los diagramas de Pourbaix de la estabilidad de los minerales de Cu y Fe así como también de Cu, Ca, Fe y Zn en un sistema S-H₂O respectivamente, donde se pueden verificar las especies estables termodinámicamente en agua en un intervalo de pH de 7 a 10 que fueron con los

que se trabajaron. En caso de las especies minerales estables dentro del pH con el que se trabajó se puede verificar que la bornita, calcopirita y pirita son las especies más estables de cobre y de hierro. En el diagrama de calcio, al no tener presencia de SO_4^{2-} se encuentra estable como Ca^{2+} . El cobre tiene especies estables como Cu y Cu_2O . El hierro, está presente como FeS y Fe_3O_4 . Por último, el zinc está presente como ZnO y ZnS .

Cabe mencionar que las especies más hidrofóbicas son los sulfuros y la presencia de óxidos disminuyen su flotabilidad que es lo que podría estar pasando con el Fe en la esfalerita. El Fe es activador de la esfalerita siempre y cuando se flote en pH muy alcalinos.⁽⁷⁾

Para verificar todas estas opciones se necesitarían realizar más pruebas y análisis sobre lo que pasa en la superficie de la esfalerita con cada uno de los iones y condiciones que se estudiaron, ya que el pH, la temperatura y reactivos utilizados pueden favorecer a diferentes especies lo cual afectan en la flotación selectiva.

CONCLUSIONES

- La mayor concentración de sólidos suspendidos se presenta en los espesadores generando gran cantidad de éstos en el agua de proceso, asentamiento de sólidos en las tuberías, taponamientos, disminución en los flujos de la pulpa y contaminación en la flotación del circuito.
- De acuerdo al muestreo realizado, las concentraciones de los iones calcio y sulfato son altas por lo que se opera con agua muy dura en el proceso de flotación.
- Los iones Ca^{2+} , Fe^{2+} así como el uso de Na_2CO_3 y el pH no tienen efecto significativo en la activación de la esfalerita, en las condiciones estudiadas.
- El uso del carbonato de sodio para la limpieza de las partículas favorece la flotación selectiva de cobre y zinc a partir de una concentración de 500 g/ton.
- El ion cobre acelera la cinética del zinc perjudicando la flotación selectiva en el circuito de cobre a partir de 10ppm.
- El ion hierro deprime la flotación de la Esfalerita en el circuito de limpias con una concentración de 80ppm.
- A partir de valores de pH mayores a 10 no se favorece la selectividad en el circuito de cobre.

BIBLIOGRAFÍA.

1. Sivamohan. "The Problem of Recovering Very Fine Particles in Mineral Processing – A Review". *International Journal of Mineral Processing*. 28 (1990), p. 247-288.
2. Warren. "Determination of the contributions of true flotation and entrainment in Batch Flotation tests". *International Journal of Mineral Processing*, 14 (1985), p. 33-34.
3. Subrahmanyam and Forssberg. "Fine particles processing: shear flocculation and carrier flotation – a review". *International Journal of Mineral Processing*, 30 (1990), p. 265-286.
4. Rangel Luna. *Fundamentos de Química Analítica*. Vol. 1. México: Limusa, 1982.
5. Pacheco-Gutiérrez y Durán-Domínguez-de-Bazúa. "Uso del agua en la industria minera. Parte 2: Estudio de opciones para reciclar agua de proceso" [en línea]. *Tecnología, Ciencia, Educación*. vol. 22. núm. 1, enero-junio (2007). p. 15-29. [Consulta: 5 de octubre 2014]. ISSN: 0186-6036 Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/482/48222103.pdf>
6. Coetzer, Preez and Bredenhann. "Influence of water resources and metal ions on galena flotation of Rosh Pinah ore" [en línea]. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*. (2003). p. 193-208. [Consulta: 1 octubre 2014]. Disponible en: <http://www.saimm.co.za/Journal/v103n03p193.pdf>
7. Azareño Ortiz et. al. "Flotación de minerales polimetálicos sulfurados de Pb, Cu y Zn" [en línea]. *Revista del Instituto de Investigaciones de la Facultad*

- de *Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geográfica*. (2010). Vol. 13, No. 26. [Consulta: 10 octubre 2014]. Disponible en: <http://www.tecsup.edu.pe/webuds/web/publicacion/publicacion11/index.htm#parte3>
8. Day, Arnold; et al. *Mining Chemicals Handbook*. Cytec Industries Inc. 2002.
 9. Tapia Bacovich Fernando. *Flotación, fundamentos y aplicaciones*. Universidad Católica del Norte. Facultad de Ingeniería y Cs. Geológicas. p. 8-44.
 10. Bulatovic, Srdjan M. *Handbook of Flotation Reagents. Chemistry, theory and practice: flotation of sulphide ores*. Vol. 1. Elsevier Science & Technology Books. 2007.
 11. Rabone, Philip. *Concentración de minerales por flotación*. 4ª ed. México: Comisión de Fomento Minero, 1975.
 12. Glembotskii, V. A. *Flotation*. New York: Primary Sources, 1972.
 13. Chesterman, Charles W. *The Audubon Society Field Guide to North American Rocks and Minerals*. New York: Knopf, 1978.
 14. Wills, Barry A. *Mineral Processing Technology. An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. 7a ed. USA: Elsevier. 2006.
 15. Saeed Farrokhpay and Massimiliano Zanin. "An investigation into the effect of water quality on the froth stability". *Advanced Powder Technology* 23 (2012). p.493-497.
 16. Liu Wenying, Moran C.J. and Vink, Sue. "A review of the effect of water quality on flotation". *Minerals Engineering* 53. (2013). p. 91-100.

17. Dávila-Pulido G.I., Uribe-Salas A. "Effect of calcium, sulphate and gypsum on copper-activated and non-activated sphalerite surface properties". *Minerals Engineering* 55. (2014). P. 147-153.
18. Can Metin, et. al. "The effect of water chemistry on froth stability and surface chemistry of the flotation of a Cu-Zn sulfide ore". *International Journal of Mineral Processing* 102-103 (2012). P. 32-37.
19. Khoshdast Hamid and Sam Abbas. "Open Access Flotation Frothers: Review of Their Classifications, Properties and Preparation". *The Open Mineral Processing Journal* 4 (2011). P. 25-44.
20. Juárez Sánchez Faustino. *Absorción atómica*. México: Instituto de Geofísica, UNAM, 2014.
21. Garrels, Robert M. *Solutions, Minerals, and Equilibria*. San Francisco, California: Freeman, 1965.

ANEXOS

ANEXO 1. Balances acumulativos de las 3 pruebas de la condición 1

Cinética de flotación Cu #1

Prueba 1			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	17.50	1.76	26.54	6.18	21.84	53.15	4.76	4.94	46.82	10.90	38.53
0,5+1	26.69	2.69	22.49	6.87	20.47	68.69	8.06	7.06	60.51	18.47	55.08
0,5+1+2	36.16	3.65	18.68	7.20	19.33	77.30	11.46	9.04	68.09	26.25	70.47
0,5+1+2+4	55.54	5.60	13.73	8.26	18.23	87.28	20.18	13.09	76.88	46.24	102.06
0,5+1+2+4+10	81.80	8.25	9.84	8.21	16.02	92.08	29.53	16.94	81.12	67.68	132.14
Cola final	910.18	91.75	0.08	1.76	7.06	7.92	70.47	83.06	6.97	161.49	647.78
Total	991.98		0.88	2.29	7.80	100.00	100.00	100.00	88.09	229.17	779.92

Cinética de flotación Cu #2

Prueba 2			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.50	28.86	2.90	18.70	12.99	17.65	62.85	19.02	6.57	54.18	37.64	51.14
0,5+1	49.48	4.97	14.06	17.28	16.94	81.00	43.38	10.81	69.84	85.84	84.16
0,5+1+2	66.08	6.63	11.48	17.46	16.22	88.35	58.54	13.82	76.17	115.82	107.63
0,5+1+2+4	80.89	8.12	9.77	16.47	15.36	91.99	67.59	16.02	79.31	133.72	124.73
0,5+1+2+4+10	109.77	11.02	7.44	13.99	13.74	95.05	77.92	19.44	81.95	154.16	151.38
Cola final	886.23	88.98	0.05	0.49	7.05	4.95	22.08	80.56	4.27	43.69	627.30
Total	996.00		0.86	1.98	7.79	100.00	100.00	100.00	86.22	197.85	778.68

Cinética de flotación Cu #3

Prueba 3			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	11.82	1.20	23.77	6.72	17.57	30.92	2.91	2.75	28.43	8.04	21.02
0,5+1	21.71	2.20	20.35	8.41	16.78	48.63	6.68	4.83	44.72	18.47	36.86
0,5+1+2	37.54	3.80	14.91	9.90	15.00	61.60	13.59	7.46	56.64	37.60	57.00
0,5+1+2+4	59.13	5.98	11.36	13.28	14.03	73.90	28.74	10.99	67.96	79.48	83.94
0,5+1+2+4+10	93.32	9.44	8.02	14.23	12.68	82.37	48.60	15.68	75.74	134.43	119.72
Cola final	894.78	90.56	0.18	1.57	7.11	17.63	51.40	84.32	16.21	142.17	643.85
Total	988.10		0.92	2.77	7.64	100.00	100.00	100.00	91.95	276.60	763.57

ANEXO 2. Balances acumulativos de las 3 pruebas de la condición 2

Cinética de flotación Cu #4

Prueba 4			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	32.82	3.31	8.57	36.39	10.87	30.86	62.15	4.46	28.39	120.53	36.00
0,5+1	45.37	4.58	9.63	33.71	11.76	47.96	79.59	6.67	44.12	154.34	53.82
0,5+1+2	57.76	5.83	10.06	30.37	12.28	63.77	91.28	8.88	58.66	177.02	71.59
0,5+1+2+4	67.58	6.82	9.93	26.86	12.66	73.65	94.47	10.71	67.75	183.20	86.36
0,5+1+2+4+10	82.51	8.33	9.00	22.44	12.53	81.46	96.36	12.93	74.93	186.86	104.30
Cola final	908.37	91.67	0.19	0.08	7.66	18.54	3.64	87.07	17.05	7.06	702.22
Total	990.88		0.92	1.94	8.07	100.00	100.00	100.00	91.98	193.92	806.52

Cinética de flotación Cu #5

Prueba 5			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	30.67	3.09	6.70	40.46	10.33	22.83	64.50	3.96	20.73	125.20	31.96
0,5+1	41.82	4.22	7.73	36.52	11.31	35.90	79.40	5.91	32.60	154.11	47.74
0,5+1+2	53.05	5.35	8.62	31.92	12.01	50.79	88.03	7.95	46.12	170.86	64.26
0,5+1+2+4	65.79	6.64	9.13	27.12	12.40	66.74	92.75	10.18	60.60	180.02	82.29
0,5+1+2+4+10	89.18	9.00	8.25	20.68	12.32	81.76	95.87	13.72	74.24	186.08	110.89
Cola final	901.99	91.00	0.18	0.09	7.66	18.24	4.13	86.28	16.56	8.01	697.08
Total	991.17		0.91	1.94	8.08	100.00	100.00	100.00	90.80	194.09	807.97

Cinética de flotación Cu #6

Prueba 6			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	27.16	2.76	4.39	41.59	8.27	13.66	59.36	2.95	12.11	114.77	22.82
0,5+1	40.08	4.07	5.75	37.24	9.38	26.39	78.44	4.94	23.40	151.66	38.18
0,5+1+2	51.99	5.28	6.87	31.99	10.19	40.93	87.41	6.96	36.29	168.99	53.82
0,5+1+2+4	67.91	6.90	7.89	26.06	10.73	61.43	93.00	9.58	54.47	179.80	74.04
0,5+1+2+4+10	87.66	8.91	7.70	20.75	11.18	77.30	95.57	12.89	68.54	184.77	99.62
Cola final	896.53	91.09	0.22	0.09	7.39	22.70	4.43	87.11	20.13	8.56	673.18
Total	984.19		0.89	1.93	7.73	100.00	100.00	100.00	88.67	193.34	772.80

ANEXO 3. Balances acumulativos de las 3 pruebas de la condición 3

Cinética de flotación Cu #7

Prueba 7			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	27.90	2.81	8.65	35.19	9.80	29.35	52.97	3.79	24.33	98.98	27.56
0,5+1	45.14	4.55	8.65	29.51	9.95	47.47	71.87	6.23	39.35	134.30	45.28
0,5+1+2	64.07	6.46	8.63	24.43	10.50	67.25	84.43	9.32	55.74	157.77	67.81
0,5+1+2+4	84.58	8.53	7.94	20.03	10.78	81.69	91.39	12.64	67.71	170.78	91.94
0,5+1+2+4+10	122.92	12.39	6.12	14.38	10.89	91.44	95.36	18.56	75.79	178.20	135.00
Cola final	869.00	87.61	0.08	0.10	6.76	8.56	4.64	81.44	7.10	8.67	592.23
Total	991.92		0.83	1.87	7.27	100.00	100.00	100.00	82.89	186.87	727.23

Cinética de flotación Cu #8

Prueba 8			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	21.41	2.15	21.75	8.25	18.18	57.07	9.09	5.52	46.67	17.70	39.01
0,5+1	32.70	3.28	18.57	8.87	17.29	74.43	14.94	8.01	60.87	29.09	56.67
0,5+1+2	46.98	4.71	14.98	9.66	16.48	86.23	23.36	10.97	70.52	45.47	77.61
0,5+1+2+4	61.39	6.15	12.06	9.80	15.64	90.71	30.99	13.61	74.19	60.32	96.26
0,5+1+2+4+10	92.78	9.30	8.26	8.45	13.54	93.90	40.36	17.80	76.79	78.57	125.89
Cola final	904.98	90.70	0.06	1.28	6.41	6.10	59.64	82.20	4.99	116.10	581.39
Total	997.76		0.82	1.95	7.07	100.00	100.00	100.00	81.78	194.66	707.29

Cinética de flotación Cu #9

Prueba 9			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	19.13	1.92	19.38	10.68	16.02	45.03	11.10	4.28	37.24	20.52	30.78
0,5+1	29.59	2.97	18.18	12.26	15.92	65.34	19.71	6.59	54.04	36.44	47.32
0,5+1+2	45.36	4.56	14.70	13.34	14.89	80.99	32.87	9.44	66.98	60.77	67.83
0,5+1+2+4	65.50	6.58	11.12	13.73	13.71	88.47	48.86	12.55	73.17	90.32	90.20
0,5+1+2+4+10	100.43	10.09	7.60	12.11	12.13	92.72	66.10	17.03	76.68	122.18	122.38
Cola final	895.18	89.91	0.07	0.70	6.63	7.28	33.90	82.97	6.02	62.67	596.12
Total	995.61		0.83	1.85	7.18	100.00	100.00	100.00	82.70	184.85	718.50

ANEXOS 4. Balances acumulativos de las 3 pruebas de la condición 4

Cinética de flotación Cu #10

Prueba 10			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	37.92	3.80	9.67	34.62	10.80	39.97	70.51	5.62	36.78	131.69	41.08
0,5+1	49.14	4.93	10.22	32.09	11.46	54.75	84.70	7.73	50.39	158.19	56.50
0,5+1+2	62.58	6.28	10.39	27.45	12.25	70.86	92.26	10.52	65.22	172.30	76.87
0,5+1+2+4	76.70	7.69	9.66	23.05	12.57	80.76	94.97	13.24	74.33	177.37	96.73
0,5+1+2+4+10	95.81	9.61	8.25	18.73	12.17	86.15	96.37	16.01	79.29	179.98	116.98
Cola final	901.06	90.39	0.14	0.08	6.79	13.85	3.63	83.99	12.74	6.78	613.74
Total	996.87		0.92	1.87	7.31	100.00	100.00	100.00	92.04	186.76	730.72

Cinética de flotación Cu #11

Prueba 11			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	33.57	3.36	9.33	37.28	10.10	32.20	66.20	4.52	31.35	125.27	33.94
0,5+1	46.77	4.68	10.26	33.28	11.11	49.36	82.33	6.92	48.05	155.79	52.00
0,5+1+2	59.60	5.97	11.01	28.93	12.22	67.49	91.20	9.70	65.71	172.59	72.91
0,5+1+2+4	74.24	7.43	10.46	24.15	12.88	79.81	94.85	12.73	77.70	179.49	95.68
0,5+1+2+4+10	98.76	9.89	8.52	18.48	12.57	86.49	96.52	16.54	84.20	182.66	124.30
Cola final	900.28	90.11	0.15	0.07	6.96	13.51	3.48	83.46	13.16	6.58	627.20
Total	999.04		0.97	1.89	7.51	100.00	100.00	100.00	97.36	189.23	751.49

Cinética de flotación Cu #12

Prueba 12			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	33.64	3.38	8.55	36.37	9.84	30.52	64.86	4.63	28.87	122.81	33.23
0,5+1	51.03	5.12	9.77	31.09	11.35	52.92	84.12	8.11	50.06	159.28	58.15
0,5+1+2	66.82	6.71	9.72	25.77	11.88	68.89	91.30	11.12	65.17	172.87	79.71
0,5+1+2+4	84.67	8.50	8.83	21.12	12.05	79.31	94.78	14.28	75.02	179.47	102.39
0,5+1+2+4+10	117.67	11.81	6.86	15.51	11.20	85.64	96.74	18.45	81.02	183.18	132.27
Cola final	878.57	88.19	0.15	0.07	6.63	14.36	3.26	81.55	13.58	6.17	584.69
Total	996.24		0.95	1.89	7.17	100.00	100.00	100.00	94.60	189.35	716.96

ANEXO 5. Balances acumulativos de las 3 pruebas de la condición 5

Cinética de flotación Cu #13

Prueba 13			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	13.95	1.41	18.30	4.94	24.32	29.77	3.58	4.47	25.71	6.94	34.17
0,5+1	22.33	2.25	19.30	4.39	23.80	50.25	5.09	7.01	43.41	9.88	53.53
0,5+1+2	36.06	3.63	17.82	4.43	23.16	74.93	8.30	11.01	64.73	16.10	84.12
0,5+1+2+4	54.54	5.49	13.67	5.13	20.02	86.91	14.54	14.40	75.08	28.20	109.97
0,5+1+2+4+10	82.69	8.33	9.68	6.33	16.42	93.31	27.20	17.90	80.61	52.76	136.74
Cola final	910.10	91.67	0.06	1.54	6.84	6.69	72.80	82.10	5.78	141.17	627.03
Total	992.79		0.86	1.94	7.64	100.00	100.00	100.00	86.39	193.93	763.77

Cinética de flotación Cu #14

Prueba 14			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	6.30	0.63	24.38	2.41	23.40	17.29	0.74	1.96	15.48	1.53	14.86
0,5+1	13.36	1.35	21.75	2.76	21.53	32.70	1.80	3.83	29.28	3.71	29.00
0,5+1+2	25.58	2.58	16.88	3.23	18.80	48.60	4.03	6.40	43.52	8.32	48.48
0,5+1+2+4	42.27	4.26	13.55	4.35	17.31	64.45	8.97	9.74	57.72	18.51	73.76
0,5+1+2+4+10	85.26	8.59	9.00	7.86	15.30	86.32	32.72	17.35	77.30	67.56	131.48
Cola final	906.93	91.41	0.13	1.52	6.85	13.68	67.28	82.65	12.25	138.94	626.14
Total	992.19		0.90	2.07	7.58	100.00	100.00	100.00	89.55	206.50	757.61

Cinética de flotación Cu #15

Prueba 15			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	9.52	0.96	16.63	3.08	23.31	18.03	1.44	2.91	15.95	2.95	22.36
0,5+1	18.03	1.82	16.26	3.37	22.08	33.38	2.99	5.22	29.54	6.12	40.12
0,5+1+2	31.12	3.14	15.03	3.92	20.68	53.27	6.01	8.44	47.14	12.30	64.83
0,5+1+2+4	48.64	4.90	12.04	4.66	18.26	66.69	11.15	11.65	59.02	22.84	89.50
0,5+1+2+4+10	90.79	9.15	8.24	8.29	14.99	85.22	37.01	17.84	75.41	75.80	137.11
Cola final	901.67	90.85	0.14	1.42	6.95	14.78	62.99	82.16	13.08	129.01	631.42
Total	992.46		0.88	2.05	7.69	100.00	100.00	100.00	88.49	204.81	768.53

ANEXO 6. Balances acumulativos de las 3 pruebas de la condición 6

Cinética de flotación Cu #16

Tiempo (min)	Prueba 16		Ensaye			Distribución			Contenido		
	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	31.57	3.16	6.28	38.17	9.81	19.87	63.31	4.09	19.86	120.74	31.03
0,5+1	44.11	4.42	7.20	33.61	10.86	31.84	77.89	6.33	31.84	148.54	48.01
0,5+1+2	57.79	5.79	7.84	29.00	11.69	45.43	88.05	8.92	45.42	167.91	67.66
0,5+1+2+4	71.77	7.19	7.78	24.55	11.97	55.95	92.59	11.35	55.94	176.57	86.05
0,5+1+2+4+10	92.51	9.27	7.06	19.55	11.80	65.43	95.00	14.43	65.42	181.18	109.39
Cola final	905.53	90.73	0.38	0.11	7.15	34.57	5.00	85.57	34.57	9.53	648.73
Total	998.04		1.00	1.91	7.58	100.00	100.00	100.00	99.99	190.71	758.12

Cinética de flotación Cu #17

Tiempo (min)	Prueba 17		Ensaye			Distribución			Contenido		
	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	33.81	3.40	8.55	35.89	11.19	29.33	63.33	4.91	29.08	122.08	38.06
0,5+1	45.56	4.58	9.00	32.81	11.84	41.63	78.02	7.01	41.27	150.39	54.28
0,5+1+2	59.12	5.95	9.10	28.11	12.33	54.62	86.73	9.46	54.15	167.18	73.31
0,5+1+2+4	73.39	7.38	8.79	23.96	12.64	65.45	91.79	12.05	64.89	176.93	93.35
0,5+1+2+4+10	96.39	9.70	7.49	18.91	12.08	73.22	95.13	15.13	72.59	183.36	117.16
Cola final	897.62	90.30	0.29	0.10	7.28	26.78	4.87	84.87	26.55	9.39	657.41
Total	994.01		0.99	1.93	7.75	100.00	100.00	100.00	99.14	192.75	774.57

Cinética de flotación Cu #18

Tiempo (min)	Prueba 18		Ensaye			Distribución			Contenido		
	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	25.51	2.61	6.38	39.63	9.56	17.07	55.15	3.33	16.66	103.47	24.96
0,5+1	39.44	4.04	6.95	33.66	10.44	28.76	72.43	5.62	28.06	135.89	42.14
0,5+1+2	54.92	5.62	7.65	28.18	11.38	44.08	84.44	8.54	43.02	158.42	63.96
0,5+1+2+4	75.96	7.77	7.55	22.13	11.88	60.14	91.71	12.32	58.70	172.05	92.34
0,5+1+2+4+10	108.17	11.07	6.24	16.17	11.12	70.75	95.45	16.44	69.05	179.08	123.16
Cola final	868.87	88.93	0.32	0.10	7.04	29.25	4.55	83.56	28.55	8.54	626.06
Total	977.04		0.98	1.88	7.49	100.00	100.00	100.00	97.60	187.61	749.22

ANEXO 7. Balances acumulativos de las 3 pruebas de la condición 7

Cinética de flotación Cu #19

Prueba 19			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	24.50	2.46	17.21	5.00	22.04	50.39	6.59	7.34	42.41	12.32	54.31
0,5+1	33.03	3.32	16.12	5.90	21.56	63.63	10.50	9.69	53.55	19.61	71.63
0,5+1+2	48.00	4.83	13.60	7.31	19.68	78.00	18.89	12.85	65.64	35.30	95.03
0,5+1+2+4	64.42	6.48	11.13	8.95	17.59	85.65	31.04	15.41	72.08	57.99	113.96
0,5+1+2+4+10	97.92	9.85	7.79	10.53	14.31	91.22	55.51	19.06	76.77	103.72	140.98
Cola final	896.32	90.15	0.08	0.92	6.64	8.78	44.49	80.94	7.39	83.12	598.60
Total	994.24		0.84	1.87	7.40	100.00	100.00	100.00	84.16	186.84	739.58

Cinética de flotación Cu #20

Prueba 20			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	12.21	1.22	17.72	3.32	22.46	24.37	2.14	3.77	21.68	4.06	27.48
0,5+1	20.66	2.07	16.74	4.03	22.55	38.94	4.39	6.41	34.65	8.34	46.68
0,5+1+2	37.53	3.76	14.31	5.67	20.75	60.47	11.23	10.71	53.81	21.32	78.04
0,5+1+2+4	59.49	5.96	11.72	8.01	18.47	78.50	25.14	15.12	69.85	47.73	110.10
0,5+1+2+4+10	94.50	9.47	8.40	11.61	14.87	89.42	57.93	19.34	79.57	109.96	140.84
Cola final	903.44	90.53	0.10	0.88	6.49	10.58	42.07	80.66	9.42	79.85	587.54
Total	997.94		0.89	1.90	7.28	100.00	100.00	100.00	88.98	189.81	728.38

Cinética de flotación Cu #21

Prueba 21			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	23.66	2.38	19.66	4.76	19.57	53.07	5.99	6.12	46.75	11.32	46.53
0,5+1	34.74	3.49	17.76	5.29	19.32	70.40	9.78	8.87	62.01	18.48	67.45
0,5+1+2	51.12	5.14	14.13	5.79	18.04	82.40	15.75	12.18	72.58	29.75	92.69
0,5+1+2+4	64.85	6.52	11.88	6.65	17.30	87.88	22.95	14.82	77.41	43.34	112.72
0,5+1+2+4+10	95.41	9.59	8.45	7.25	14.66	91.99	36.81	18.47	81.03	69.51	140.55
Cola final	899.67	90.41	0.08	1.32	6.86	8.01	63.19	81.53	7.05	119.34	620.23
Total	995.08		0.88	1.89	7.61	100.00	100.00	100.00	88.08	188.85	760.77

ANEXO 8. Balances acumulativos de las 3 pruebas de la condición 8

Cinética de flotación Cu #22

Prueba 22			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	27.34	2.73	5.96	40.92	8.18	15.87	60.44	3.02	16.30	111.91	22.37
0,5+1	40.38	4.04	7.00	34.03	9.58	27.52	74.24	5.23	28.26	137.47	38.72
0,5+1+2	55.69	5.57	8.07	28.03	11.02	43.76	84.33	8.29	44.94	156.15	61.40
0,5+1+2+4	79.03	7.91	8.20	21.29	12.01	63.13	90.89	12.82	64.83	168.32	94.93
0,5+1+2+4+10	113.66	11.37	6.91	15.52	11.55	76.52	95.31	17.75	78.59	176.49	131.37
Cola final	885.99	88.63	0.27	0.10	6.87	23.48	4.69	82.25	24.11	8.69	608.89
Total	999.65		1.03	1.85	7.40	100.00	100.00	100.00	102.69	185.18	740.26

Cinética de flotación Cu #23

Prueba 23			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	26.28	2.63	4.82	39.91	7.73	13.13	60.10	2.76	12.66	104.86	20.31
0,5+1	39.15	3.91	6.02	33.10	9.26	24.41	74.24	4.93	23.55	129.54	36.23
0,5+1+2	54.55	5.45	7.04	26.85	10.54	39.81	83.93	7.82	38.41	146.44	57.46
0,5+1+2+4	76.03	7.60	7.84	20.90	11.68	61.78	91.07	12.07	59.60	158.90	88.75
0,5+1+2+4+10	105.51	10.55	6.93	15.68	11.43	75.80	94.82	16.40	73.13	165.44	120.52
Cola final	894.73	89.45	0.26	0.10	6.87	24.20	5.18	83.60	23.35	9.03	614.53
Total	1000.24		0.96	1.74	7.35	100.00	100.00	100.00	96.48	174.48	735.05

Cinética de flotación Cu #24

Prueba 24			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	30.75	3.08	5.79	49.90	8.73	18.11	70.20	3.96	17.83	153.66	26.88
0,5+1	43.52	4.36	7.09	40.54	10.09	31.39	80.72	6.48	30.90	176.69	43.99
0,5+1+2	65.19	6.53	8.41	29.96	11.65	55.76	89.37	11.20	54.88	195.62	76.07
0,5+1+2+4	86.05	8.62	8.04	23.71	11.98	70.36	93.34	15.19	69.25	204.31	103.22
0,5+1+2+4+10	116.52	11.67	6.72	18.02	11.44	79.63	96.09	19.65	78.37	210.32	133.46
Cola final	882.05	88.33	0.23	0.10	6.18	20.37	3.91	80.35	20.05	8.57	545.89
Total	998.57		0.98	2.19	6.79	100.00	100.00	100.00	98.43	218.89	679.35

ANEXO 9. Balances acumulativos de las 3 pruebas de la condición 9

Cinética de flotación Cu #25

Prueba 25			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	34.14	3.43	6.89	39.47	8.86	24.42	69.85	3.96	23.60	135.20	30.35
0,5+1	44.10	4.42	7.62	36.63	9.39	34.88	83.73	5.42	33.71	162.07	41.56
0,5+1+2	54.50	5.47	8.02	32.15	9.84	45.36	90.82	7.02	43.84	175.79	53.82
0,5+1+2+4	67.53	6.78	7.82	26.80	10.17	54.84	93.81	8.98	53.00	181.57	68.89
0,5+1+2+4+10	93.93	9.42	6.74	19.75	10.27	65.70	96.16	12.62	63.49	186.12	96.80
Cola final	902.71	90.58	0.37	0.08	7.40	34.30	3.84	87.38	33.15	7.43	670.26
Total	996.64		0.97	1.94	7.67	100.00	100.00	100.00	96.64	193.55	767.06

Cinética de flotación Cu #26

Prueba 26			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	32.02	3.21	8.11	33.35	10.38	27.76	61.06	4.23	25.99	106.89	33.27
0,5+1	45.63	4.57	8.99	30.57	11.60	43.85	79.77	6.74	41.06	139.64	52.97
0,5+1+2	60.07	6.01	9.39	26.10	12.53	60.29	89.64	9.59	56.46	156.92	75.36
0,5+1+2+4	76.68	7.68	8.89	21.40	13.02	72.84	93.82	12.72	68.21	164.23	99.93
0,5+1+2+4+10	100.95	10.11	7.34	16.59	12.28	79.17	95.79	15.79	74.14	167.68	124.08
Cola final	898.06	89.89	0.22	0.08	7.36	20.83	4.21	84.21	19.51	7.37	661.63
Total	999.01		0.94	1.75	7.86	100.00	100.00	100.00	93.65	175.05	785.71

Cinética de flotación Cu #27

Balance Acumulativo			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	37.73	3.79	9.36	32.87	12.12	37.05	66.81	6.19	35.48	124.58	45.94
0,5+1	50.49	5.07	9.76	30.27	12.79	51.70	82.33	8.75	49.50	153.51	64.88
0,5+1+2	63.08	6.34	9.71	26.80	13.29	64.25	91.06	11.35	61.51	169.80	84.19
0,5+1+2+4	76.47	7.68	9.08	22.89	13.36	72.83	94.28	13.84	69.73	175.80	102.66
0,5+1+2+4+10	94.09	9.45	7.94	18.95	12.76	78.34	96.07	16.26	75.01	179.13	120.61
Cola final	901.39	90.55	0.23	0.08	6.86	21.66	3.93	83.74	20.74	7.33	621.16
Total	995.48		0.96	1.86	7.42	100.00	100.00	100.00	95.74	186.46	741.77

ANEXO 10. Balances acumulativos de las 6 pruebas de Optimización de las Cinéticas de Flotación del cobre

Optimización: Cinética de flotación Cu #1

Optimización 1			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	22.23	2.23	21.98	5.89	18.99	55.68	7.54	5.52	49.06	13.15	42.39
0,5+1	40.74	4.09	16.95	8.03	18.73	78.67	18.85	9.98	69.32	32.87	76.63
0,5+1+2	54.42	5.46	14.17	8.98	17.87	87.85	28.13	12.73	77.41	49.05	97.66
0,5+1+2+4	71.04	7.13	11.39	9.32	16.44	92.23	38.15	15.28	81.27	66.51	117.28
0,5+1+2+4+10	102.00	10.24	8.22	8.78	14.11	95.52	51.61	18.83	84.17	89.98	144.52
Cola final	893.87	89.76	0.04	0.94	6.94	4.48	48.39	81.17	3.95	84.37	622.92
Total	995.87		0.88	1.74	7.67	100.00	100.00	100.00	88.12	174.35	767.44

Optimización: Cinética de flotación Cu #2

Optimización 2			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	17.10	1.72	19.50	2.36	23.48	37.29	2.07	5.30	33.48	4.05	40.32
0,5+1	27.52	2.76	15.06	2.90	20.25	54.84	3.62	8.09	49.24	7.09	61.51
0,5+1+2	40.26	4.04	8.08	3.20	15.63	66.36	5.71	10.71	59.58	11.18	81.50
0,5+1+2+4	63.03	6.33	6.37	4.87	14.66	82.58	11.40	15.12	74.14	22.32	115.02
0,5+1+2+4+7	84.82	8.52	2.80	7.33	10.35	89.40	19.60	18.10	80.27	38.35	137.67
Cola final	911.03	91.48	0.10	1.72	6.81	10.60	80.40	81.90	9.51	157.35	623.00
Total	995.85		0.90	1.96	7.61	100.00	100.00	100.00	89.78	195.70	760.67

Optimización: Cinética de flotación Cu #3

Optimización 3			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	20.30	2.04	21.97	2.93	24.16	50.82	3.17	6.38	44.75	5.97	49.22
0,5+1	32.05	3.22	19.02	3.34	23.45	69.44	5.70	9.77	61.16	10.74	75.42
0,5+1+2	46.21	4.64	15.47	3.79	21.08	81.44	9.33	12.66	71.73	17.56	97.75
0,5+1+2+4	63.25	6.35	12.20	4.37	18.44	87.93	14.73	15.16	77.44	27.74	117.06
0,5+1+2+4+10	87.83	8.81	9.18	4.50	15.58	91.82	21.08	17.79	80.87	39.70	137.31
Cola final	908.69	91.19	0.08	1.63	6.96	8.18	78.92	82.21	7.20	148.63	634.66
Total	996.52		0.88	1.88	7.72	100.00	100.00	100.00	88.07	188.34	771.97

Optimización: Cinética de flotación Cu #4

Optimización 4			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	28.82	2.88	4.28	39.02	7.84	13.91	63.65	3.12	12.32	112.35	22.57
0,5+1	42.20	4.22	5.25	32.56	9.03	24.99	77.76	5.27	22.14	137.27	38.07
0,5+1+2	60.74	6.07	5.82	25.15	9.69	39.88	86.45	8.14	35.32	152.61	58.81
0,5+1+2+4	78.79	7.87	6.71	20.64	10.39	59.58	92.03	11.32	52.78	162.45	81.81
0,5+1+2+4+10	109.99	10.99	6.52	15.35	10.67	80.91	95.56	16.23	71.67	168.69	117.28
Cola final	890.93	89.01	0.19	0.09	6.80	19.09	4.44	83.77	16.91	7.83	605.28
Total	1000.92		0.89	1.77	7.23	100.00	100.00	100.00	88.58	176.52	722.55

Optimización: Cinética de flotación Cu #5

Optimización 5			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	27.07	2.73	3.75	40.46	8.00	11.01	59.06	7.40	10.23	110.43	59.61
0,5+1	39.22	3.95	4.26	34.64	10.63	18.13	73.26	10.12	16.85	136.96	81.48
0,5+1+2	53.68	5.41	5.15	29.00	11.62	29.99	83.94	13.04	27.87	156.93	105.00
0,5+1+2+4	71.27	7.19	6.41	23.64	13.00	49.55	90.87	16.60	46.05	169.90	133.68
0,5+1+2+4+10	109.40	11.03	6.66	16.18	11.28	79.04	95.48	22.02	73.46	178.51	177.35
Cola final	882.45	88.97	0.22	0.10	7.42	20.96	4.52	77.98	19.48	8.45	628.13
Total	991.85		0.93	1.87	8.05	100.00	100.00	100.00	92.94	186.96	805.48

Optimización: Cinética de flotación Cu #6

Optimización 6			Ensaye			Distribución			Contenido		
Tiempo (min)	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
0.5	27.07	2.73	4.81	44.32	8.45	13.95	64.77	2.97	13.12	120.88	23.05
0,5+1	38.23	3.85	5.38	37.27	9.37	22.04	76.92	4.65	20.73	143.54	36.10
0,5+1+2	48.98	4.93	5.76	32.04	9.85	30.24	84.73	6.26	28.44	158.12	48.59
0,5+1+2+4	69.76	7.03	6.26	24.18	10.28	46.76	91.05	9.30	43.98	169.93	72.23
0,5+1+2+4+10	104.45	10.52	6.67	16.93	10.67	74.60	95.49	14.47	70.15	178.21	112.31
Cola final	888.09	89.48	0.27	0.09	7.42	25.40	4.51	85.53	23.89	8.41	663.92
Total	992.54		0.94	1.87	7.76	100.00	100.00	100.00	94.05	186.62	776.23

ANEXO 11. Balances acumulativos de las 3 pruebas de Circuito Abierto.

Circuito abierto Cu-Zn #1

Circuito abierto 1			Ensaye			Distribución			Contenido		
Productos	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
Conc Cu	27.17	2.74	26.58	6.40	24.04	79.84	9.39	11.99	72.95	17.58	65.97
Conc Cu + L3 Cu	27.47	2.77	26.34	6.44	23.93	80.00	9.55	12.07	73.09	17.87	66.41
Conc Cu + L3 Cu + L2 Cu	29.37	2.97	24.83	6.58	23.05	80.64	10.43	12.43	73.67	19.51	68.39
Conc Cu + L3 Cu + L2 Cu + L1 Cu	53.41	5.39	14.51	6.72	17.23	85.69	19.38	16.90	78.29	36.26	92.96
Conc Zn	18.21	1.84	0.65	60.83	4.78	1.32	59.80	1.60	1.20	111.89	8.79
Conc Zn + L3 Zn	19.96	2.02	0.70	58.59	4.90	1.54	63.14	1.80	1.41	118.13	9.88
Conc Zn + L3 Zn + L2 Zn	23.43	2.37	0.71	51.06	5.05	1.85	64.59	2.17	1.69	120.84	11.96
Conc Zn + L3 Zn + L2 Zn + L1 Zn	51.80	5.23	0.53	24.02	5.32	3.01	67.17	5.06	2.75	125.68	27.85
Colas	884.81	89.37	0.12	0.28	4.80	11.30	13.45	78.04	10.32	25.16	429.30
Total	990.02		0.91	1.87	5.50	100.00	100.00	100.00	91.36	187.10	550.11

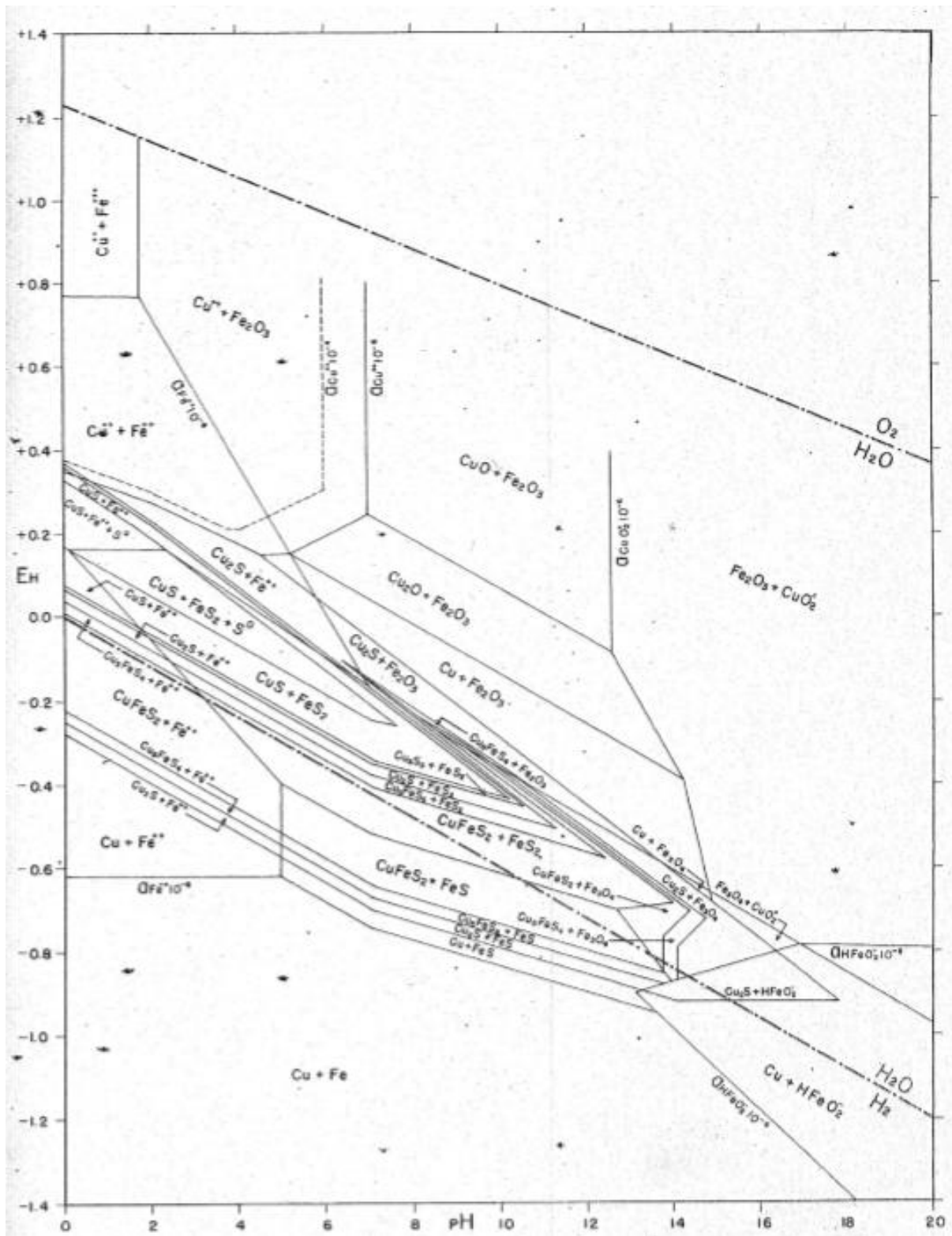
Circuito abierto Cu-Zn #2

Circuito abierto 2			Ensaye			Distribución			Contenido		
Productos	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
Conc Cu	25.58	2.55	24.81	2.98	26.69	69.37	3.94	12.00	63.16	7.58	67.93
Conc Cu + L3 Cu	29.87	2.97	22.83	3.56	25.92	74.54	5.50	13.61	67.86	10.58	77.03
Conc Cu + L3 Cu + L2 Cu	36.20	3.60	20.10	4.17	24.18	79.51	7.81	15.39	72.39	15.02	87.12
Conc Cu + L3 Cu + L2 Cu + L1 Cu	67.12	6.68	12.02	4.79	17.54	88.22	16.63	20.70	80.32	31.98	117.17
Conc Zn	5.33	0.53	0.59	56.69	5.42	0.34	15.64	0.51	0.31	30.07	2.87
Conc Zn + L3 Zn	9.35	0.93	0.63	50.92	7.51	0.64	24.64	1.23	0.58	47.37	6.98
Conc Zn + L3 Zn + L2 Zn	14.11	1.40	0.72	41.91	8.48	1.11	30.60	2.10	1.02	58.84	11.90
Conc Zn + L3 Zn + L2 Zn + L1 Zn	52.96	5.27	0.87	26.44	8.64	5.06	72.47	8.05	4.61	139.35	45.55
Colas	884.81	88.05	0.07	0.24	4.58	6.72	10.89	71.26	6.12	20.94	403.42
Total	1004.89		0.91	1.92	5.66	100.00	100.00	100.00	91.04	192.27	566.14

Circuito abierto Cu-Zn #3

Circuito abierto 3			Ensaye			Distribución			Contenido		
Productos	Peso (g)	% Peso	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn(%)	Fe (%)	Cu (g)	Zn(g)	Fe(g)
Conc Cu	42.25	4.23	9.78	37.10	11.49	38.69	83.75	8.96	41.31	156.79	48.56
Conc Cu + L3 Cu	45.17	4.52	9.76	35.19	11.69	41.29	84.91	9.74	44.09	158.96	52.82
Conc Cu + L3 Cu + L2 Cu	50.28	5.03	9.47	31.97	11.73	44.60	85.88	10.88	47.62	160.77	59.00
Conc Cu + L3 Cu + L2 Cu + L1 Cu	81.32	8.13	8.65	20.67	11.95	65.85	89.79	17.92	70.32	168.09	97.17
Conc Zn	0.56	0.06	11.12	2.24	24.13	0.58	0.07	0.25	0.62	0.13	1.35
Conc Zn + L3 Zn	2.25	0.23	11.64	2.37	20.01	2.45	0.29	0.83	2.62	0.53	4.50
Conc Zn + L3 Zn + L2 Zn	6.74	0.67	9.30	2.30	19.18	5.87	0.83	2.38	6.27	1.55	12.93
Conc Zn + L3 Zn + L2 Zn + L1 Zn	33.71	3.37	6.24	1.47	15.12	19.69	2.66	9.40	21.03	4.97	50.98
Colas	884.81	88.50	0.17	0.16	4.45	14.45	7.56	72.67	15.43	14.15	393.96
Total	999.84		1.07	1.87	5.42	100.00	100.00	100.00	106.78	187.21	542.10

ANEXO 12. Diagrama de Pourbaix del sistema Cu-Fe-S-O-H a 25°C y 1atm⁽²¹⁾.



ANEXO 13. Diagrama de Pourbaix de Cu, Ca, Fe y Zn en un sistema S-H₂O a 25°C y 1atm (evaluados con el software HSC 5.11).

