



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN  
INGENIERIA**

FACULTAD DE QUIMICA

**“Efecto de la calidad del agua en la selectividad de los  
minerales durante su flotación.”**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERIA**

INGENIERIA QUIMICA – INGENIERÍA DE PROCESOS

P R E S E N T A:

**I.Q. Alfonso Humberto Guerra Valencia**

TUTOR:

**Dr. Rodolfo Espinosa Gómez**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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: Dr. Carlos González Rivera.  
Secretario: M. en C. Antonio Huerta Cerdán.  
Vocal: Dr. Rafael Herrera Nájera.  
1<sup>er</sup>. Suplente: Dr. Marco Aurelio Ramírez Argaez.  
2<sup>do</sup>. Suplente: Dr. Rodolfo Espinosa Gómez.

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Unidad Minera Sabinas S.A. de C.V. Sombrerete, Zacatecas, México.

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Rodolfo Espinosa Gómez

---

**FIRMA**

## **AGRADECIMIENTOS:**

A mi esposa y a mi hija, por estar siempre conmigo, por apoyarme en todo momento y por ser la motivación de mi vida para ser cada día mejor ser humano. Doy gracias a Dios porque forman parte de mi vida. Las amo.

A mis padres, por estar siempre presente con su apoyo incondicional en todo momento. Gracias por todo lo que nos han ayudado.

A Aída, por siempre estar conmigo en las buenas y en las malas. Gracias por tu especial apoyo en este proyecto.

A Raquel, por siempre estar allí y ser mi voz interior.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para la realización de estos estudios.

A mi asesor de tesis, Dr. Rodolfo Espinosa Gómez. Gracias Doctor por ayudarme en la realización de este proyecto, por sus consejos, por compartir su conocimiento y experiencia conmigo, por su paciencia y por ofrecerme las facilidades y los medios en todo momento para llevar a cabo este trabajo. Estamos mi familia y yo agradecidos profundamente con usted.

A Unidad Sabinas, en especial al Ing. Humberto Vásquez y al Ing. Jesús Lira por brindarme todas las facilidades y apoyo durante mi estancia en Sabinas.

<b>ÍNDICE GENERAL.</b>	i
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.</b>	iv
<b>ÍNDICE DE TABLAS.</b>	viii
<b>RESUMEN.</b>	x
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.</b>	
1.1. Importancia del agua.	1
1.2. Flotación de sulfuros minerales.	3
1.3. Justificación.	6
1.4. Objetivos.	6
1.5. Hipótesis.	7
1.6. Estructura de la Tesis.	7
<b>CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES.</b>	
2.1. Minera Sabinas.	9
2.2. Conceptos termodinámicos utilizados.	11
<b>CAPÍTULO 3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.</b>	
3.1. Uso de agua recirculada y consecuencias.	22
3.2. Metodologías para determinar los efectos de la calidad del agua.	24
3.3. Efectos en la flotación de sulfuros de las especies presentes en el agua de proceso.	27
3.4. Tratamientos a aguas recirculadas.	31
<b>CAPÍTULO 4. EXPERIMENTACIÓN.</b>	
4.1. Metodología.	36
4.2. Estudio de la calidad del agua.	38
4.2.1. Balance de agua de las Plantas Concentradoras de Sabinas.	38

4.2.2. Muestreo de agua.	38
4.3. Muestreo en la Planta.	40
4.4. Mediciones para química de la pulpa.	42
4.5. Pruebas en el laboratorio.	43
4.5.1. Muestra.	43
4.5.2. Descripción de pruebas en el laboratorio.	44
4.5.3. Otras pruebas.	47
<b>CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.</b>	
5.1. Resultados del estudio de la calidad del agua.	49
5.1.1. Balances de aguas.	49
5.1.2. Análisis de los muestreos de aguas.	54
5.2. Resultados de la química de la pulpa derivados del muestreo en la Planta 2.	60
5.2.1. Química de la pulpa.	61
5.2.2. Extracción de iones metálicos con EDTA.	67
5.2.3. Balance metalúrgico.	70
5.3. Resultados de las pruebas del laboratorio.	71
5.3.1. Reproducibilidad de pruebas.	71
5.3.2. Química de la pulpa.	73
5.3.2.1. Química de la pulpa en molienda.	74
5.3.2.2. Química de la pulpa en flotación.	78
5.3.3. Pruebas del laboratorio.	82
5.3.3.1. Primera etapa de investigación. Pruebas preliminares.	82
5.3.3.2. Segunda etapa de investigación. Identificación de aguas y especies.	86

5.3.3.3.	Tercera etapa de investigación. Ajuste de reactivos y tratamiento al agua de proceso.	91
5.3.3.4.	Cuarta etapa de investigación. Depresión de esfalerita.	96
5.4.	Pruebas complementarias.	101
5.4.1.	Grado de oxidación del mineral.	101
5.4.2.	Pruebas con carbonato de sodio.	102
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b>		
6.1.	Conclusiones.	104
6.2.	Recomendaciones.	106
<b>BIBLIOGRAFÍA.</b>		107
<b>APÉNDICE A.</b>		
	Procedimientos.	113
<b>APÉNDICE B.</b>		
	Conversión de elementos a mineral.	139
<b>APÉNDICE C.</b>		
	Sistemas Cobre-Cianuro.	142
<b>APÉNDICE D.</b>		
	Gráficas de resultados.	146

**ÍNDICE DE FIGURAS**

<b>Figura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página.</b>
2.1.1.	Diagrama de flujos de la Planta 1.	10
2.1.2.	Diagrama de flujos de la Planta 2.	11
2.2.1.	Arreglo de celda electroquímica.	16
3.2.1.	Esquema de metodología implementada por Ian Wark Research Institute (IWRI).	26
4.2.1.	Distribución de aguas de la Planta 2.	38
4.3.1.	Diagrama de puntos de muestreo en el circuito de molienda.	41
4.3.2.	Diagrama de puntos de muestreo para el circuito de cobre en la Planta 2.	41
4.5.1.	Molino Magotteaux empleado para las pruebas del laboratorio.	45
4.5.2.	Diagrama que muestra el esquema de la realización de las pruebas en el laboratorio.	47
5.1.1.	Balance de agua de la Planta 1.	50
5.1.2.	Balance de agua de la Planta 2.	50
5.1.3.	Balance de agua global.	51
5.1.4.	Distribución del consumo de agua fresca y recuperada en Unidad Sabinas.	52
5.1.5.	Distribución de agua recuperada de Unidad Sabinas.	52
5.1.6.	Concentración de los iones metálicos de interés en el agua recuperada del espesador de cobre.	56
5.1.7.	Concentración de los iones cobre y cianuro en el agua recuperada del espesador de cobre.	57
5.1.8.	Concentración de los iones cobre y cianuro en el agua que es alimentada a los molinos.	57
5.1.9.	Concentración de los iones calcio en las corrientes de agua de la Planta 2.	59



5.2.1.	Perfil del pH en molinos y circuito de cobre en planta 2.	61
5.2.2.	Perfil del Eh en molinos y circuito de cobre en planta 2.	62
5.2.3.	Perfil del OD en molinos y circuito de cobre en planta 2.	62
5.2.4.	Perfil de DOD en molinos y circuito de cobre en planta 2.	63
5.2.5.	Perfil de la temperatura en molinos y circuito de cobre en planta 2.	63
5.2.6.	Comportamiento del potencial redox con respecto al pH en molinos y circuito de cobre en planta 2.	65
5.2.7.	Perfiles de concentración de los iones metálicos extraídos con EDTA.	68
5.2.8.	Perfil de concentración de iones hierro en molinos y flotación cobre	68
5.2.9.	Perfil de concentración de los iones cobre en molinos y flotación de cobre.	69
5.3.1.	Gráfica grado-recuperación para el cobre en el concentrado de cobre.	72
5.3.2.	Gráfica grado-recuperación para el plomo en el concentrado de cobre.	72
5.3.3.	Gráfica grado-recuperación para el zinc en el concentrado de cobre.	72
5.3.4.	Comportamiento del $E_h$ durante la molienda en el laboratorio.	74
5.3.5.	Comportamiento del pH durante la molienda en el laboratorio.	75
5.3.6.	Comportamiento del oxígeno disuelto durante la molienda en el laboratorio.	75
5.3.7.	Comportamiento de la demanda de oxígeno disuelto durante la molienda en el laboratorio.	76
5.3.8.	Comportamiento de la temperatura durante la molienda en el laboratorio.	76
5.3.9.	Comportamiento de $E_h$ durante la flotación en el laboratorio.	79
5.3.10.	Comportamiento de pH durante la flotación en el laboratorio.	79

5.3.11.	Comportamiento de oxígeno disuelto durante la flotación en el laboratorio.	80
5.3.12.	Comportamiento de temperatura durante la flotación en el laboratorio.	80
5.3.13.	Curvas grado vs recuperación para el cobre en el concentrado de cobre con las diferentes aguas de proceso.	83
5.3.14.	Curvas grado vs recuperación para el plomo en el concentrado de cobre con las diferentes aguas de proceso.	83
5.3.15.	Curvas de selectividad para el zinc en el concentrado de cobre con las diferentes aguas de proceso.	84
5.3.16.	Recuperación de las diferentes especies minerales con respecto al agua de proceso empleada.	84
5.3.17.	Curva grado-recuperación del cobre en el concentrado de cobre para los 8 suministros de agua evaluados.	87
5.3.18.	Curva grado-recuperación del plomo en el concentrado de cobre para los 8 suministros de agua evaluados.	88
5.3.19.	Curva selectividad del zinc en el concentrado de cobre para los 8 suministros de agua evaluados.	88
5.3.20.	Recuperación total de los minerales en el circuito de cobre contra tipo de agua.	89
5.3.21.	Porcentaje de metales presentes como especies oxidadas extraídas con EDTA.	89
5.3.22.	Curvas grado-recuperación de minerales de cobre en el concentrado de cobre para los 5 suministros de agua en estudio.	93
5.3.23.	Curvas grado-recuperación de la galena en el concentrado de cobre para los 5 suministros de agua en estudio.	93
5.3.24.	Curvas de selectividad de la esfalerita en el concentrado de cobre para los 5 suministros de agua en estudio.	94
5.3.25.	Recuperación de las diferentes especies minerales con los diferentes tipos de aguas que se utilizaron.	94

5.3.26.	Porcentaje de metal oxidado en las diferentes especies minerales y para las diferentes aguas empleadas en las pruebas.	95
5.3.27.	Curvas grado-recuperación de los minerales de cobre en el concentrado de cobre para los 5 suministros de agua en estudio.	98
5.3.28.	Curvas grado-recuperación de la galena en el concentrado de cobre para los 5 suministros de agua en estudio.	98
5.3.29.	Curvas grado-recuperación de las especies de plata en el concentrado de cobre para los 5 suministros de agua en estudio.	99
5.3.30.	Curvas de selectividad de la esfalerita en el concentrado de cobre para los 5 suministros de agua en estudio.	99
5.3.31.	Representación gráfica de la recuperación de las distintas especies minerales con los diferentes tipos de aguas que se utilizaron.	100
5.3.32.	Porcentaje de metal oxidado en las diferentes especies minerales y para las diferentes aguas empleadas en las pruebas.	100

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Descripción	Página.
4.2.1.	Cantidad de muestras enviadas a análisis químico.	39
4.3.1.	Puntos de muestreo en los circuitos de molienda y flotación de cobre.	40
4.4.1.	Puntos de muestreo en los circuitos de molienda y flotación de cobre para la medición de la química de la pulpa.	42
4.5.1.	Ensayes de cabeza de la muestra empleada en las pruebas de laboratorio.	44
4.5.2.	Esquema de etapas que cubrió el estudio.	46
5.1.1.	Distribución de los consumos de agua por planta y global.	51
5.1.2.	Relación de corrientes, tipos de aguas y especies analizadas.	54
5.1.3.	Promedios, desviación estándar y variabilidad de las concentraciones de las especies analizadas.	55
5.1.4.	Porcentaje de los iones cobre totales para cada una de los flujos de agua que se emplearon en la investigación.	56
5.1.5.	Concentraciones promedio en que se espera se encuentren las especies de Cu, Ca, $\text{SO}_4^{2-}$ y $\text{CN}^-$ .	61
5.2.1.	Grados y recuperaciones de los distintos elementos en los concentrados de los bancos del circuito de cobre de la Planta 2.	71
5.3.1.	Descripción de cada tipo de agua utilizada en las pruebas realizadas en la tercera y cuarta etapa de la investigación.	74
5.3.2.	Resultados de los análisis de las aguas de proceso con las que se realizaron las pruebas preliminares.	84
5.3.3.	Concentraciones de las diferentes especies metálicas presentes en las aguas que se emplearon en las pruebas.	87
5.3.4.	Resultados del análisis químico de las aguas utilizadas en la etapa 3 de la investigación.	93
5.3.5.	Resultados del análisis químico de las aguas de la última etapa de investigación.	98

5.4.1. Grado de oxidación de cada mineral en la muestra que se empleó para las pruebas.	102
5.4.2. Concentración de iones calcio, carbonato y sulfato a diferentes dosificaciones de carbonato de sodio al agua que se alimenta a los molinos.	103

## **RESUMEN.**

La calidad del agua en los procesos de flotación juega un papel muy importante, ya que está afecta la calidad (grado de los concentrados) y la cantidad (recuperaciones de valores) de los minerales recuperados. La calidad del agua de proceso (agua que se alimenta a los molinos), se ve afectada por las diferentes especies disueltas en las aguas que las componen, sus mezclas y combinaciones. Desafortunadamente hay pocos estudios que evalúen los efectos en la flotación de las diferentes especies que se encuentran disueltas en el agua. Por esta razón, es importante realizar un estudio detallado de los efectos que tiene la calidad del agua sobre la flotación, con el fin de encontrar los mecanismos que la perjudican y proponer alternativas para minimizar los efectos negativos en el proceso.

La investigación que se presenta en este trabajo se desarrolló en Minera Sabinas S.A. de C.V., empleando una metodología que involucra mediciones de química de la pulpa, extracciones de iones disueltos, inventario de las diferentes calidades del agua, muestreos en la Planta y pruebas de laboratorio. Esta metodología ha permitido conocer las condiciones reales de operación de la Planta y de las características de las aguas suministradas a la Planta 2; además facilitó la reproducibilidad de las condiciones de la Planta en las pruebas del laboratorio (con el uso de un molino especial, el molino Magotteaux), y de esta manera cuantificar los efectos que causan a la flotación los diferentes tipos de aguas.

Los resultados obtenidos mostraron que las principales especies que se encuentran en concentraciones considerables son Cu, Ca,  $\text{CN}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  y los suministros de agua que los proporcionan son los flujos de las aguas recuperadas de los espesadores. Los espesadores de los concentrados de Cu y Pb proporcionan las concentraciones más elevadas de Cu y  $\text{CN}^-$  y los espesadores de colas y concentrado de Zn proporcionan las concentraciones más elevadas de Ca y  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Los iones Cu en el agua de proceso que es agregada a la flotación del circuito de Cu, causa la activación inadvertida de la esfalerita, las considerables recuperaciones de Zn en las pruebas del laboratorio confirman la activación de la esfalerita por los iones Cu. La esfalerita recuperada en el concentrado de cobre causa pérdidas de los valores de zinc, así como baja calidad en el concentrado de cobre.

La presencia de Ca y  $\text{SO}_4^{2-}$  en el agua de proceso causan la precipitación de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) en la superficie de los minerales, principalmente en aquellos que son fácilmente oxidables como la galena. Esto causa bajas recuperaciones de este mineral, lo cual también quedó confirmado con las pruebas realizadas en el laboratorio.

Al tratar el agua de proceso (agua que se alimenta a los molinos) con carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), se evita la formación de yeso y se observan beneficios significativos en la recuperación de la galena y como consecuencia también en los minerales de plata asociados a ella.

Para evitar los efectos negativos de los iones Cu en la flotación del circuito de Cu, se propone enviar el flujo de agua que se recupera del espesador de concentrado de cobre a la presa de jales, en donde se oxidaría una buena parte de los complejos cobre-cianuro, mitigando sus efectos negativos.

Para evitar la formación de yeso causado por la presencia de Ca y  $\text{SO}_4^{2-}$  arriba de su concentración de saturación, se propone continuar con la dosificación actual de carbonato de sodio.

## **CAPÍTULO 1.**

### **INTRODUCCIÓN.**

En la concentración de los minerales mediante el proceso de flotación, la calidad del agua juega un rol muy importante ya que ésta afecta la calidad (grados de los concentrados) y la cantidad (recuperaciones de valores) de los minerales recuperados. Por tanto, el entendimiento del efecto de los componentes negativos del agua, puede ayudar a diseñar soluciones que contrarreste sus efectos.

#### **1.1. Importancia del agua.**

El agua es usada en la Industria Minera en la mayoría de los procesos de separación tales como flotación, concentración gravimétrica, magnética y floculación selectiva, ya que desempeña los siguientes papeles:

- Proporciona el medio de interacción reactivo-superficie del mineral.
- Posee la viscosidad y la densidad necesarias para facilitar la selectividad por las fuerzas centrífuga y de gravedad, separando partículas de diferentes tamaños y densidades.
- Es eficiente para el transporte del mineral a bajo costo y a diferentes partes del proceso (Levay y Schumann, 2006).

Desde el punto de vista químico, la importancia del agua reside en que la mayoría de los procesos que ocurren tienen lugar entre sustancias disueltas en agua (Snoeyink y Jenkins, 1998). Esto se explica a partir de la capacidad del agua como disolvente, la cual depende de su estructura molecular y de su atracción intermolecular.

La molécula de agua, H<sub>2</sub>O es muy estable, ya que tiene una estructura H-O-H y un peso molecular de 18.0152 g, formándose dos enlaces covalentes  $\sigma$  (cada uno con un aporte iónico de 40%) entre el átomo de oxígeno y los de hidrógeno, que se encuentran separados 105° y cuenta con una entalpía de disociación de 110.2 kcal/mol para cada enlace, lo cual da a la molécula de agua una gran estabilidad.

La estabilidad de la molécula del agua, unida a sus propiedades eléctricas y a su estructura molecular característica, la hacen apta para la disolución de numerosas sustancias. En efecto, la mayor parte de las especies minerales, así como un gran número de gases y productos orgánicos, pueden disolverse en el



agua. Esto se debe a que los átomos de hidrógeno tienen una densidad de carga positiva mientras que el de oxígeno tiene densidad de carga negativa.

La distribución de cargas del agua hacen que ésta sea una molécula fuertemente bipolar; los dipolos se atraen entre sí, haciendo que estas moléculas tiendan a asociarse con gran fuerza. Esta gran fuerza de atracción intermolecular del agua, se debe a la tendencia de formar enlaces de hidrógeno (puentes de hidrógeno) sobre una base tridimensional y son los responsables de muchas de las propiedades poco usuales que se presentan en el agua. La polaridad del agua es un factor importante para determinar sus propiedades de disolvente.

Un mecanismo común de disolución de las especies minerales en el agua es mediante su balance de cargas en el medio acuoso. La mayoría de los minerales son sólidos inorgánicos donde los iones de cargas positivas y negativas existen en una estructura reticular unidos entre sí por enlaces electrostáticos (también están unidos por enlaces covalentes, covalentes coordinados y metálicos). Los iones de las partículas minerales de carga positiva se atraen con la parte negativa ( $\text{OH}^-$ ) de la molécula del agua y viceversa si el ión es negativo; aislando este ión de los que lo rodean y neutralizando las fuerzas de atracción y repulsión que mantienen la integridad de la estructura cristalina. El ión rodeado por la molécula del agua deja la red cristalina y se desplaza hacia la solución, transformándose en un ion disuelto. (Snoeyink y Jenkins, 1998).

Los suministros de agua utilizados en la industria minera generalmente consisten de mezclas de aguas de diferentes calidades: aguas superficiales, aguas subterráneas, agua potable, agua de mina, agua de lluvia, agua residual tratada total o parcialmente, agua residual industrial tratada total o parcialmente, aguas marinas (Levay y colaboradores, 2001).

En una operación minera, el consumo unitario del agua fresca siempre se trata de optimizar y para reducir su consumo se mezclan y recirculan las diferentes corrientes de agua, tales como: el sobreflujo de los espesadores de concentrados y de colas, el agua proveniente de la filtración de concentrados, y el agua recuperada de la presa de jales. Para maximizar el uso del agua recirculada y poder minimizar el consumo de agua fresca, se optimizan los diferentes procesos de separación sólido-agua, tales como operación de los espesadores, filtración de concentrados y recuperación del agua de la presa de jales (Levay y Schumann, 2006; Levay y colaboradores, 2001).

La calidad del agua de proceso se deteriora al mezclarse el agua proveniente de diferentes suministros y corrientes y se incrementa la presencia de contaminantes en el agua de proceso, tales como: sólidos coloidales

suspendidos, compuestos inorgánicos disueltos, compuestos orgánicos disueltos, reactivos residuales. La calidad del agua se deteriorará dependiendo de la influencia de estas especies en los resultados operativos (Levay y colaboradores, 2001).

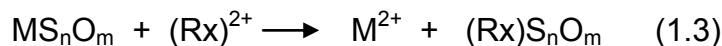
En este estudio se proponen esquemas de tratamiento del agua de proceso que minimicen los efectos de los componentes nocivos en el agua y que afectan negativamente a la flotación selectiva de los minerales.

### **1.2. Flotación de sulfuros minerales.**

El proceso de flotación es el más ampliamente utilizado para la recuperación de los sulfuros minerales (Levay y colaboradores, 2001); el agua es importante porque sus propiedades facilitan la interacción de los reactivos con las especies minerales (Snoeyink y Jenkins, 1998). La flotación es un proceso que puede ser altamente selectivo, consiste en utilizar diferentes tipos de reactivos con el objetivo de modificar la superficie de las partículas y de la pulpa para poder flotar o deprimir los minerales selectivamente (Leja, 2004). Se usa para llevar a cabo separaciones selectivas de sulfuros minerales. Inicialmente se usó principalmente para tratar sulfuros de cobre, plomo y zinc (Wills, 1997). El objetivo de la flotación es obtener la recuperación más elevada posible del mineral deseado con el grado más alto posible. (Leja, 2004).

Para realizar el proceso de flotación se aprovechan las propiedades físicas y químicas de la superficie de los minerales, controlándolas con diferentes tipos de reactivos (Leja, 2004; Wills, 1997), con el fin de producir de manera correcta los mecanismos que participan en este proceso: recubrimiento selectivo de los reactivos en las superficies minerales, adherencia selectiva de los minerales de valor a las burbujas y separación del concentrado flotado y lo no flotado (Taggart, 1966).

La etapa de recubrimiento selectivo tiene por objetivo provocar hidrofobicidad sobre la superficie del mineral de valor con reactivos químicos selectivos (Leja, 2004). El mecanismo para provocar el carácter hidrofóbico de un sulfuro mineral consiste primero en oxidar el ion sulfuro ( $S^{2-}$ ) para producir ion sulfoxil ( $S_nO_m^{2-}$ ), con esto se aumenta la solubilidad del mineral de valor en su superficie; lo cual se consigue induciendo aire a la pulpa. Lo anterior es un requisito necesario para el recubrimiento del mineral (Leja, 2004; Taggart, 1966). Una vez producido el sulfoxil metálico en la superficie del mineral, el mineral está en condiciones para reaccionar con un reactivo surfactante. Las siguientes reacciones muestran el mecanismo:



El resultado de estas reacciones es la precipitación en la superficie del mineral de una monocapa, constituida por iones de la partícula del mineral anclada allí por el enlace inter iónico de la red estructural del mineral, mientras en la parte exterior está compuesta por el ion (radical activo) que constituye el surfactante, orientado de tal modo que su radical hidrocarburo se dirige hacia el agua, ocasionando la hidrofobicidad de la partícula (Taggart, 1966).

Un indicador del carácter hidrofóbico de las partículas es el ángulo de contacto. Sí el valor del ángulo de contacto es mayor de 90° la partícula es altamente hidrofóbica y sí el valor es menor de 90° el carácter hidrofóbico de la partícula es pobre. La flotabilidad de un mineral aumenta cuando aumenta el ángulo de contacto (Leja, 2004).

La etapa de adherencia a las burbujas se produce cuando el mineral hidrofóbico desplaza en cierta medida al agua y es cuando la partícula se puede adherir a la burbuja de aire. La partícula se mantiene en la burbuja si esta forma una espuma estable (Wills, 1997). El ángulo de contacto ayuda a conocer la fuerza de adhesión partícula-burbuja (Taggart, 1966).

La etapa de separación es una operación mecánica que consiste en retirar la espuma con mineral de valor de la pulpa con mineral empobrecido (Taggart, 1966).

Los reactivos que se utilizan en la flotación son los siguientes:

Los surfactantes son compuestos químicos que causan reacción de adsorción química en la superficie del mineral o alteran la interface. Se componen de una cadena de hidrocarburo (parte no polar) la cual se orienta hacia el aire y un grupo funcional (parte polar), la cual, si interactúa con el mineral es llamado colector y si interactúa con el agua es llamado espumante (Leja, 2004; Taggart, 1966; Wills, 1997).

Los colectores son sustancias orgánicas parcialmente solubles que tienen el objetivo de hacer hidrofóbicas las partículas del mineral de valor, es decir, que no sean capaces de “mojarse” en el agua para facilitar que se adhieran a las burbujas de aire y sean removidas en la espuma (Leja, 2004; Taggart, 1966; Wills, 1997). La extensión del recubrimiento de la superficie de minerales por

los colectores no se conoce con exactitud y depende del valor del ángulo de contacto con la burbuja (Taggart, 1966).

Los espumantes son reactivos tenso activos capaces de ser adsorbidos en la interface aire-agua, empleados con el fin de disminuir la tensión superficial del agua, facilitar la formación de burbujas de aire pequeñas y producir una espuma estable (Taggart, 1966; Wills, 1997).

Los modificadores son reactivos que cambian la acción del colector, ya sea intensificando o reduciendo el efecto repelente al agua sobre la superficie del mineral. Se clasifican en (Wills, 1997):

- **Activadores.** Compuestos químicos que interactúan en la superficie del mineral alterando su naturaleza química (Leja, 2004), provocando susceptibilidad de una especie, en un medio en el que generalmente no respondería a la acción del colector. Esto implica la reacción de un ion de la superficie del mineral. La activación consiste en cambiar un ion superficial que es inactivo respecto al colector, por otro activo (Taggart, 1966).

Por ejemplo, en la flotación de esfalerita, al reaccionar el xantato con el sulfoxil de Zn en la superficie del mineral forma el complejo xantato-metal  $ZnX_2$ ; este complejo tiene un bajo carácter hidrofóbico, debido a que tiene una solubilidad mayor que la de otros complejos de xantato metálicos (Leja, 2004). Por esa razón, se realiza el intercambio catiónico en la superficie de la esfalerita, agregando  $CuSO_4$  en solución, el intercambio iónico lo describe la siguiente reacción (Taggart, 1966):



El cobre abstraído desplaza al Zn ligado al sulfuro del mineral revistiendo al mineral de  $CuS$  (Taggart, 1966). Con el  $CuS$  en la superficie de esfalerita, el colector actúa sobre la superficie de esfalerita de acuerdo al mecanismo de recubrimiento selectivo descrito anteriormente.

- **Depresores.** Son compuestos químicos que alteran la superficie del mineral para prevenir o evitar la adsorción del colector (Leja, 2004). Incrementa la selectividad en la flotación volviendo hidrofílicos a ciertos minerales, evitando su flotación (Wills, 1997).
- **Modificadores de pH.** Se utilizan para modificar la actividad de los iones hidrógeno e hidroxilo en la pulpa y proporcionar las condiciones para que ciertos minerales floten en ciertos rangos. El control del pH es un requisito indispensable para la separación selectiva por flotación. Algunos reactivos que ayudan a controlar el pH son: ácido sulfúrico, la cal y el carbonato de sodio (Leja, 2004).

El proceso de flotación se realiza en circuitos de concentración. Los circuitos empleados en general dependen de la naturaleza del mineral, los más comunes contienen las etapas de flotación primaria, flotación agotativa y flotación de limpias (Ralame, 1975).

Para el proceso de flotación los suministros de agua deben elegirse cuidadosamente, porque las materias extrañas que contengan pueden activar o deprimir, consumir reactivos, y en casos muy extremos, precipitarse en las tuberías y en las canaletas, llegando a obstruirlos con el tiempo. Estas especies extrañas pueden ser sales disueltas, sólidos inorgánicos ó materias orgánicas (Taggart, 1966).

### **1.3. Justificación.**

Desde un punto de vista operativo, se aprecia claramente el papel tan importante que juega la calidad del agua en la selectividad de la selectividad de los minerales. Algunas de las características mas notorias que afectan su calidad son: a) concentración de iones calcio, magnesio, cobre y sulfato; b) sólidos suspendidos; c) pH; d) concentración de orgánicos. Desafortunadamente existen pocos estudios sistemáticos publicados en los cuales se haya evaluado el rol de algunos de estos factores en la selectividad de la flotación (Levay y colaboradores, 2001).

En Minera Sabinas, S.A. de C.V., operativamente se conoce la importancia de la calidad del agua en la flotación selectiva de los minerales y se plantea realizar un estudio sistemático de las características y variabilidad de las diferentes aguas nuevas y de diferentes puntos del proceso, para conocer sus efectos y controlarlos y mejorar los grados y recuperaciones de los concentrados producidos.

### **1.4. Objetivos.**

#### **Objetivo General.**

Realizar un estudio sistemático de las características y variabilidad de la calidad del agua así como evaluar su efecto en la flotación del circuito cobre en la Planta 2 de Unidad Sabinas; con el fin de proponer alternativas de mejora para reducir los efectos nocivos de las corrientes y/o componentes del agua en la flotación del circuito de cobre.

### **Objetivos Específicos.**

Conocer por medio de muestreos a los suministros de agua de la Planta, la concentración de las diferentes especies disueltas en las aguas.

Evaluar a través de pruebas en el laboratorio el efecto que tienen las diferentes corrientes de agua sobre la recuperación y selectividad en la flotación.

Evaluar por medio de pruebas de laboratorio los efectos que causan los diferentes componentes de las aguas sobre los resultados metalúrgicos.

Proponer alternativas de tratamiento y/o manejo de las aguas para reducir los efectos adversos de algunos de sus componentes en la flotación a través de los resultados obtenidos.

### **1.5. Hipótesis.**

En este trabajo se quiere comprobar que si se disminuye la concentración (en el agua de proceso) de las especies que producen efectos negativos a la flotación, se obtendrán beneficios en la recuperación y en la calidad del concentrado.

### **1.6. Estructura de la tesis.**

El presente trabajo consta de seis capítulos los cuales contienen los siguientes temas:

Capítulo 1. Se comenta la importancia del agua, se explica brevemente el proceso de flotación de sulfuros minerales, se justifica la necesidad de realizar esta investigación y se describe la estructura de la presentación de este trabajo.

Capítulo 2. Describe la mineralogía y los procesos de operación de las plantas concentradoras de la unidad minera donde se realiza la investigación. Además se realiza una breve explicación de los conceptos termodinámicos que se emplean en la investigación.

Capítulo 3. Expone trabajos de otros autores sobre el efecto de la calidad del agua en la selectividad de la flotación que anteceden a la realización de este trabajo.

Capítulo 4. Describe la forma como se realizó la experimentación: Análisis de las aguas de las principales corrientes de la planta 2, Muestreo al circuito de cobre y Pruebas en el laboratorio.

Capítulo 5: Presenta y discute los resultados obtenidos.

Capítulo 6. Presenta las conclusiones y las recomendaciones que se obtienen en base al análisis de resultados.

Al final de la tesis se presenta la bibliografía consultada en éste trabajo, así como varios apéndices en donde se presentan los procedimientos llevados a cabo en la experimentación y los resultados de las pruebas realizadas.

## **CAPITULO 2.**

### **ANTECEDENTES.**

#### **2.1. Minera Sabinas.**

Minera Sabinas se encuentra situado en la porción Norponiente del Estado de Zacatecas, aproximadamente a 185 kilómetros de la ciudad Capital, con una elevación promedio sobre el nivel del mar de 2720 metros. Siendo sus coordenadas geográficas 23°30' Latitud Norte y 103°30' al Oeste del Meridiano de Greenwich. El depósito está situado en el altiplano, cerca de la frontera Este de la Sierra Madre Occidental de la frontera Oeste de la Mesa Central (Scheer y Skerstupp, 2001).

Sabinas forma parte de la Faja de Plata tendiendo al noroeste del cinturón que contiene importantes depósitos de plata (Scheer y Skerstupp, 2001).

El yacimiento de Sabinas está clasificado como "skarn", se encuentra alojado en el contacto de los estratos de piedra caliza derivado de la plataforma y la intrusión de granodiorita (Scheer y Skerstupp, 2001).

El depósito de skarn en Sabinas presenta una compleja mineralización en donde se pueden identificar sulfuros como la galena (PbS), esfalerita (ZnS), bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), pirrotita ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ ), arsenopirita (FeAsS), pirita ( $\text{FeS}_2$ ), y la ganga no sulfurosa es calcita y cuarzo.

Además del depósito de skarn se encuentra el yacimiento epitermal, el cual se caracteriza por vetas en donde se pueden encontrar minerales como plata nativa (Ag) y argentita ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ), así como los encontrados en el depósito de skarn bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), esfalerita (ZnS), galena (PbS), pirita ( $\text{FeS}_2$ ), pirrotita ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ ) y arsenopirita (FeAsS). La ganga es calcita (Scheer y Skerstupp, 2001 y Jiménez, 2005).

Para procesar los minerales antes mencionados, Minera Sabinas cuenta con 2 plantas concentradoras, las cuales utilizan el proceso de flotación selectiva Pb/Zn (Planta 1) y Cu/Zn (Planta 2) para obtener concentrados de Pb, Zn y Cu.

En la Planta 1 la reducción de tamaño se lleva a cabo por medio de la trituración primaria seguida por molienda semi autogena (SAG) donde los medios de molienda son bola de acero forjado y para la molienda secundaria bola de alto cromo; los concentrados finales se obtienen en el proceso de flotación, empleando los circuitos de Pb, Zn y separación plomo-cobre. Los circuitos de Pb y Zn cuentan con la etapa primaria, agotativa y 3 limpias. El concentrado de la tercera limpia de Pb se envía al circuito de separación, el



cual cuenta con 2 etapas primarias, una agotativa y dos limpias, de donde se obtienen los concentrados de Pb y Cu. El concentrado de Zn se obtiene de la tercera limpia de Zn. Ver Fig. 2.1.1.

En la planta 2 la reducción de tamaño se lleva a cabo en un circuito de trituración, seguida por molienda convencional con medios de molienda de alto cromo, los concentrados finales se obtienen en el proceso de flotación, utilizando los circuitos de Cu, Zn y separación plomo-cobre. El circuito de Cu cuenta con etapas primarias, una agotativa y 3 limpias. El concentrado de la tercera limpia de Cu se envía al circuito de separación, el cual cuenta con una etapa primaria, y una limpia, de está limpia se obtienen los concentrados de Pb y Cu. El circuito de Zn tiene 2 etapas primarias, una agotativa y 3 limpias. El concentrado de Zn se obtiene de la tercera limpia. Ver Fig. 2.1.2.

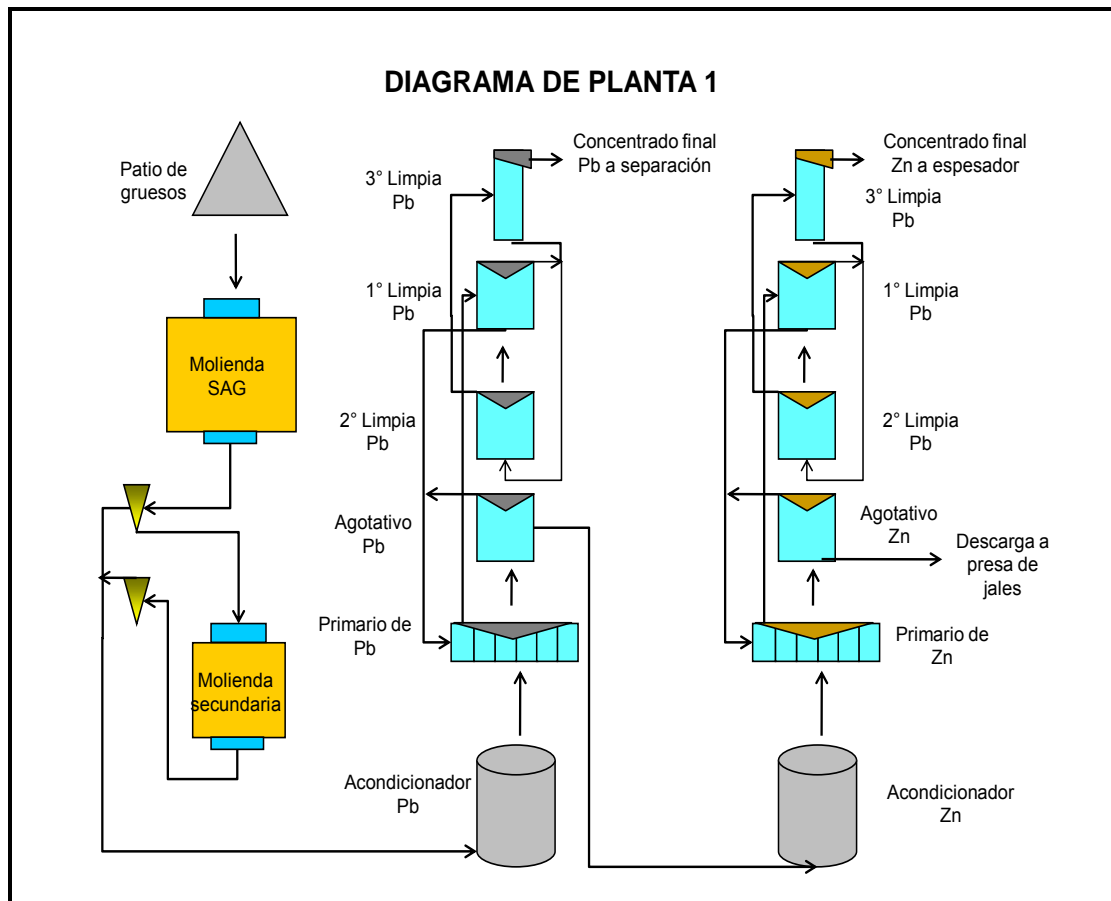


Figura 2.1.1 Diagrama de flujo de la Planta 1.

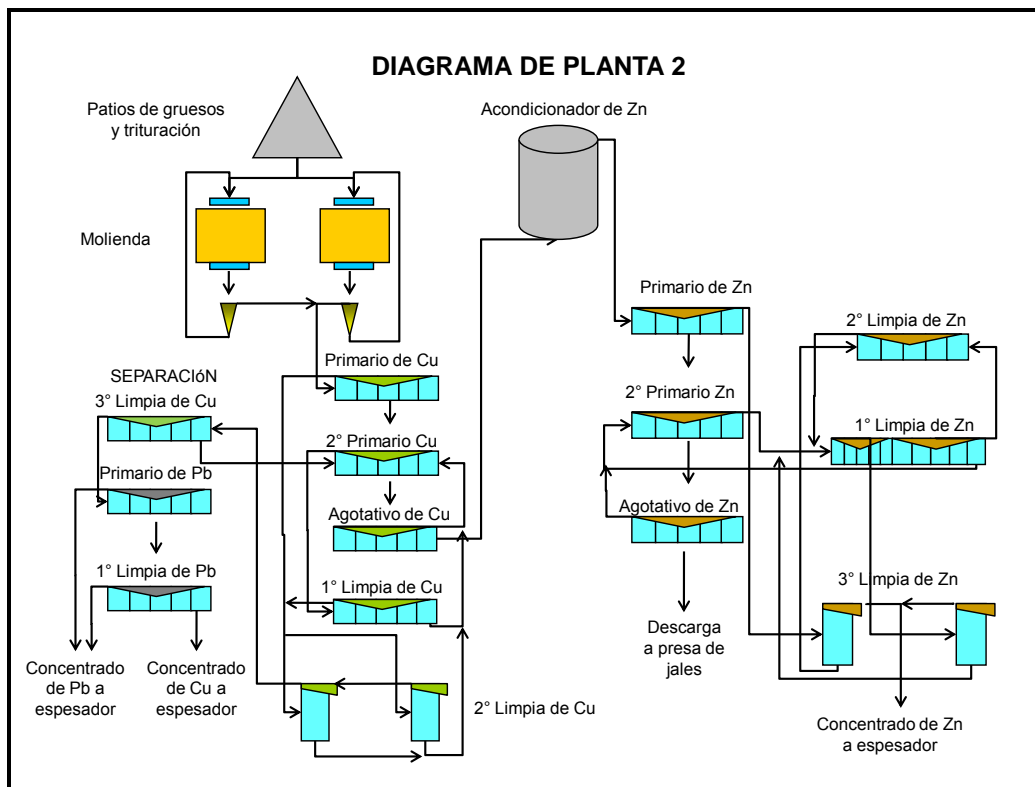


Figura 2.1.2. Diagrama de flujo de la Planta 2.

## 2.2. Conceptos termodinámicos utilizados (pH, Eh, OD, DOD, T, disolución de los iones metálicos).

Muchas plantas monitorean las condiciones de la pulpa utilizando solamente el pH como única variable de control en sus procesos de flotación operando con un pH constante. El control de pH normalmente lo realizan mediante un sensor de pH ligado a un lazo de control de adición de cal. Un valor de pH que produce los mayores beneficios y que se determina experimentalmente, se selecciona como valor de referencia “set point” (Greet y colaboradores, 2005a).

Usar solamente el pH como estrategia de control no es suficiente para detectar las probables condiciones que afectan los resultados metalúrgicos.

La medición y control de otros parámetros que afectan la química de la pulpa ( $E_h$ , oxígeno disuelto y temperatura) proporciona información sobre otras variables físicas y químicas que pueden estar afectando el proceso de flotación, lo cual, no es todavía una práctica común en las Plantas Concentradoras (Greet y colaboradores, 2005a).

Una variable muy importante para seguir la evolución de las reacciones electroquímicas en los sistemas de flotación de sulfuros es el potencial de óxido-reducción ( $E_h$ ). Un trabajo realizado por Natarajan e Iwasaki (1973)

mostró que el  $E_h$  puede ser medido confiablemente en pulpas de laboratorio y planta (Greet y colaboradores, 2005a).

Woods (1976) proporcionó argumentos convincentes que muestran que todas las reacciones en la superficie de los sulfuros minerales son de naturaleza electroquímica y numerosos trabajos (Greet, 2007; Greet y colaboradores, 2003, 2005a y 2005b; Levay y colaboradores, 2001; Chung, 2009) han demostrado que es posible el uso de la medición de  $E_h$  para estimar la oxidación de los sulfuros minerales, así como la adsorción de colectores en la superficie de los minerales. Sin embargo Woods advierte sobre un peligro notable con respecto al uso de mediciones de  $E_h$  en la flotación, ya que la lectura obtenida corresponde a potenciales mixtos o mezclados y debe ser considerada con reserva (Greet y colaboradores, 2005a).

Ralston (1991), proporciona una revisión extensa sobre el papel del  $E_h$  en la flotación de los sulfuros minerales y cita el ejemplo del efecto del  $E_h$  sobre la disminución de la recuperación de la calcopirita en la flotación. Con esto reconoció que es posible separar varios sulfuros de cobre y pirita en la operación bajo diferentes valores de  $E_h$  (Greet y colaboradores, 2005a).

Woodcock y Jones (1970), fueron quizás los primeros en medir y comparar los parámetros de las propiedades químicas de pulpas de sulfuros metálicos en plantas concentradoras. Esencialmente en ellas se observaron tendencias muy similares a través de los circuitos de molienda y flotación de 6 estudios realizados en plantas concentradoras de sulfuros de Pb y Zn en Australia. Allí observaron que el potencial de la pulpa se volvía más oxidante cuando la pulpa pasaba a través de la planta y el contenido de oxígeno disuelto se incrementaba de niveles bajos en el circuito de molienda, a valores cercanos a la saturación en el circuito de flotación. Grano y colaboradores (1993) notaron tendencias muy similares en la molienda y circuitos primarios y agotativos de Pb en la planta concentradora de Hilton cercana a Mount Isa Mines Limited en Queensland, Australia (Greet y colaboradores, 2005a).

Con respecto al papel de la temperatura en la flotación, uno de sus efectos se ha reportado en el trabajo de O'Connor y colaboradores (1984). El trabajo muestra que al incrementarse la temperatura de la pulpa, la recuperación de pirita se incrementa (Greet y colaboradores, 2005a).

La química de la pulpa hace referencia a las mediciones requeridas durante el muestreo en molienda y flotación. Las variables termodinámicas que se monitorean son: Potencial de Hidrógeno (pH), Potencial Oxido-Reducción ( $E_h$ ), Oxígeno Disuelto (OD), Demanda de Oxígeno Disuelto (DOD) y Temperatura (T).

Cuando para el monitoreo y control de un sistema de flotación analizamos las variables antes mencionadas, implícitamente estamos hablando de los aspectos electroquímicos que tienen influencia en las especies presentes en la pulpa, por esta razón en la presente sección se mencionan algunos aspectos termodinámicos de las variables que se monitorean en la química de la pulpa.

### Potencial de Hidrógeno (pH).

Debido a sus propiedades anfóteras (que se puede comportar como base ó como ácido) el agua se autoioniza de acuerdo a la reacción:



La constante de equilibrio para la reacción anterior es:

$$K = \{\text{H}^+\} \{\text{OH}^-\} / \{\text{H}_2\text{O}\} \quad (2.2)$$

La actividad del  $\text{H}_2\text{O}$  en soluciones acuosas diluidas o en agua pura es la unidad. La actividad de especies iónicas en soluciones acuosas diluidas es igual a su concentración. La ecuación 2.2 se reduce a:

$$K = K_w = \{\text{H}^+\} \{\text{OH}^-\} = [\text{H}^+] [\text{OH}^-] \quad (2.3)$$

Para derivar el valor de la constante de equilibrio ( $K_w$ ) de esta reacción, se parte de los cálculos de energía libre. Si consideramos que la autoionización del agua está en equilibrio a  $25^\circ\text{C}$  obtenemos:

$$K_w = [\text{H}^+] [\text{OH}^-] = 9.96 \cdot 10^{-15} (\approx 1 \cdot 10^{-14}) \quad (2.4)$$

La ecuación de  $K_w$  forma la base para la definición de la escala de pH.

$$\text{pH} + \text{pOH} = \text{p}K_w = 14 \quad (2.5)$$

Como las concentraciones de los iones  $\text{H}^+$  y  $\text{OH}^-$  son muy pequeñas, en 1909 el químico danés Sorensen definió el potencial de hidrógeno (pH) como el logaritmo negativo de la concentración molar (más exactamente de la actividad molar) de los iones hidrógeno. Esto es:

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+] ; \quad \text{pOH} = -\log [\text{OH}^-] \quad \text{y} \quad \text{p}K_w = -\log K_w \quad (2.6)$$

Para la interpretación de la escala de pH nos basamos en la ecuación (5) y decimos que cuando  $\text{pH} = \text{pOH} = 7$ , la solución es neutra, es decir, la concentración de  $[\text{H}^+]$  es igual a la concentración de  $[\text{OH}^-]$ . Se dice que la solución es ácida si los valores de pH menores de 7 indican que  $[\text{H}^+] > [\text{OH}^-]$ . Los valores mayores de 7 indican que  $[\text{H}^+] < [\text{OH}^-]$  y se dice que la solución es básica o alcalina (Snoeyink y Jenkins, 1998).

En el caso de la flotación, el pH tiene influencia importante en la modificación de la química de la solución (pulpa de flotación) ó de la superficie del mineral. Sus principales efectos son:

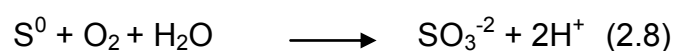
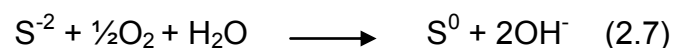
- En el potencial óxido-reducción ( $E_h$ ) de la pulpa.
- En la superficie de los sólidos. En la hidratación de la superficie, la densidad de carga, el potencial zeta, los tipos de iones adsorbidos y en general en la formación ó destrucción de los precipitados que recubren la superficie del mineral.
- En la ionización ó solubilidad de los colectores para la formación de complejos inorgánicos.
- En la concentración de iones inorgánicos que están presentes en la fase líquida de la pulpa.

La complejidad de estos efectos, particularmente en la cinética de flotación de las especies minerales, hacen necesario un monitoreo permanente del pH en la operación (Leja, 2004).

#### Potencial Óxido-Reducción ( $E_h$ ).

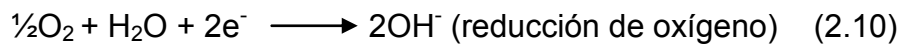
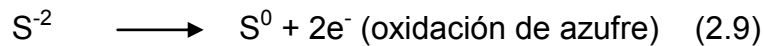
Los minerales se caracterizan por su reactividad química, principalmente por los diferentes estados de oxidación del azufre. En los sulfuros minerales (sulfuros metálicos), el azufre se encuentra en un estado de oxidación bajo (-2), éste puede ser oxidado en etapas a compuestos de azufre con alto estado de oxidación (hasta +8). Además, los minerales son susceptibles a la oxidación por el oxígeno atmosférico ó por agentes oxidantes (Leja, 2004).

El proceso de oxidación involucra la transferencia de electrones del mineral sulfuroso (azufre) al oxígeno (elemento que acepta electrones). El oxígeno disuelto en el agua es reducido a iones hidroxilo. Los hidróxidos formados por la hidrólisis, juegan un rol significativo en algunos procesos de la flotación, algunos de ellos sirven como especies activas que ayudan a promover la acción de los colectores. Las reacciones se representan como sigue (Leja, 2004):



Estas reacciones son llamadas reacciones de transferencia de carga ó reacciones oxidación/reducción (redox) ó reacciones electroquímicas y de su estudio se ocupa la electroquímica.

A continuación, la reacción (2.7) se separa en dos semireacciones que describen el mecanismo de oxidación y reducción, respectivamente.



En la primer semireacción se representa la oxidación del azufre, cambiando su estado de oxidación de -2 a 0, esto significa que dos de sus electrones son transferidos (donados) a otra especie; en este caso son transferidos al oxígeno, que es el elemento que acepta los electrones y por lo tanto cambia su estado de oxidación de 0 a -2. La segunda semireacción representa la reducción del oxígeno (Leja, 2004).

Las semireacciones de oxidación y reducción se pueden llevar a cabo cada una por caminos completamente diferentes en una celda electroquímica, donde el agente oxidante (llamado cátodo, es donde ocurren las reacciones de reducción) y el agente reductor (llamado ánodo, es donde ocurren las reacciones de oxidación) se encuentran físicamente separados uno del otro, estos se nombran electrodos o semiconductores (Snoeyink y Jenkins, 1998).

La celda electroquímica también se compone de una solución que contiene especies iónicas usualmente derivadas de la disolución de compuestos, la cual mantiene en contacto los dos electrodos y actúa como un puente salino que permite el transporte de iones en la solución.

Cuando en la celda electroquímica se están efectuando las semireacciones de oxidación y reducción, el flujo de electrones se realiza en el conductor externo en la dirección del electrodo que se reduce y el flujo continuará hasta que las especies que se oxidan y se reducen alcancen el equilibrio. El voltímetro registrará la diferencia de potencial entre los dos electrodos en todo momento hasta que la reacción en la celda alcance el equilibrio. Mientras la reacción se ésta efectuando la diferencia de potencial disminuirá y se aproximará a cero, indicando así que la reacción global ha alcanzado el estado de equilibrio. La Figura 2.2.1, muestra el arreglo de la celda electroquímica (Snoeyink y Jenkins, 1998).

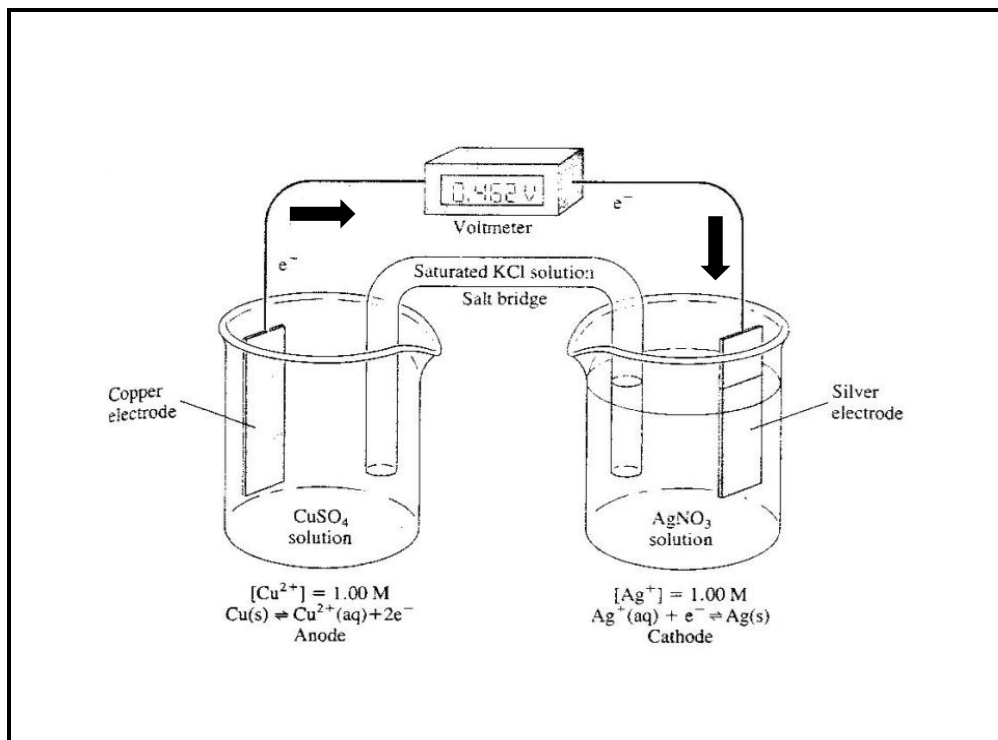
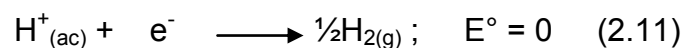


Figura 2.2.1. Arreglo de celda electroquímica.

El potencial que se desarrolla en la celda electroquímica se llama fuerza electromotriz (fem); si las especies en la celda tienen una actividad unitaria, la temperatura es de 25°C y la presión de 1 atm a la fem se le asigna el símbolo de  $E^\circ_{\text{celda}}$ . Como no siempre las reacciones se llevan a cabo en una celda, con frecuencia se utiliza la notación  $E^\circ$  en lugar de  $E^\circ_{\text{celda}}$

Los valores de  $E^\circ$  para las diversas semireacciones (semiceldas) se miden en referencia a una semireacción a la cual se le asigna un valor de cero a 25°C y 1 atm. Esta reacción es la reducción del ion hidrógeno presente en solución con una actividad unitaria a hidrógeno gas:



Si colocamos en una celda electroquímica un electrodo de gas hidrógeno (electrodo patrón, SHE) a  $P = 1$  atm conectado a otro electrodo (semireacción de interés), donde la temperatura sea de 25°C y las actividades de las especies en la solución sean unitarias, se obtiene el potencial estándar del electrodo de interés ( $E^\circ_i$ ).

La ecuación de Nernst se puede aplicar a una de las semireacciones (reacciones de electrodo) de la celda, estando en combinación con la reacción del electrodo estándar de hidrógeno y despreciando los efectos de las actividades de las especies en solución. La ecuación de Nernst entonces queda representada en función de los reactantes y productos (que son distintos

a los electrones) de la semireacción que describe la reducción. En esta expresión se sigue la práctica común de referirse al potencial  $E$  como  $E_h$ . Se usa el subíndice  $h$  para enfatizar que el potencial tiene significado en referencia a la reacción del electrodo estándar de hidrógeno (SHE).

La ecuación (2.12) es conocida como la ecuación de Nernst:

$$E_h = E^\circ - (0.059/n) \log (i_{\text{prod}}/i_{\text{reac}}) \quad (2.12)$$

$(i_{\text{prod}}/i_{\text{reac}})$  Cociente de las actividades de la especie  $i$  en su estado reducido y oxidado.

Los valores de  $E_h$  y  $E^\circ$  (expresados en mV) se definen en términos de las actividades de las especies individuales (Snoeyink y Jenkins, 1998).

En condiciones dinámicas como en la flotación el potencial es un potencial mezclado que involucra varias reacciones transfiriendo carga. El potencial mezclado o mixto es un término general que se usa para referirse al potencial medido en un sistema complejo. Cuando las mediciones se refieren solo a iones en el sistema, es llamado potencial de la solución. Cuando se refiere a fases sólidas conductoras o semiconductoras en contacto es llamado potencial galvánico. El potencial medido en la pulpa de un mineral es el resultado neto de reacciones anódicas en la superficie del mineral (oxidación) y del proceso catódico (reducción de oxígeno), y es llamado potencial de la pulpa ( $E_p$ ). El valor de referencia al electrodo estándar de hidrógeno es calculado al sumar el valor del potencial estándar del electrodo que se use de referencia. Cuando el potencial de la pulpa es referido al electrodo estándar de hidrógeno es común el uso de la denotación  $E_h$  (Leja, 2004).

Las mediciones del potencial de la pulpa se están convirtiendo en una práctica común en las plantas concentradoras. Para el control del potencial de la pulpa se utilizan reactivos adecuados los cuales cambian la naturaleza del potencial hacia el lado catódico ó anódico. Si se aumenta la concentración de oxígeno en la pulpa ó se agregan agentes oxidantes, el potencial se mueve hacia el lado anódico (e.g., se hace más positivo). En cambio, el potencial de la pulpa tiende hacia el lado catódico (e.g., se hace más negativo) con agentes reductores como el sulfito ó dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) (Leja, 2004). Otro método es bajar la concentración de oxígeno en la pulpa desplazando el oxígeno mediante el burbujeo de nitrógeno (Leja, 2004).

#### Oxígeno Disuelto (OD).

En la flotación de minerales el oxígeno es necesario como aceptador de electrones para consumir los electrones de los colectores y de los sulfuros (los



cuales se oxidan a iones sulfato); cuando el oxígeno no se encuentra disponible, la transferencia de electrones es reprimida y las partículas con poca adsorción química del colector desarrollarán un grado insuficiente de hidrofobicidad para la flotación.

Generalmente, en la pulpa los minerales consumen el oxígeno disuelto como resultado de las reacciones de oxidación y por el aumento de temperatura generada durante la molienda. La reoxigenación de la pulpa de la descarga del molino se alcanza gradualmente a medida que la pulpa pasa a través de los ciclones, acondicionadores y celdas de flotación. La flotabilidad óptima se logra cuando el agua de la pulpa está saturada con oxígeno y la superficie del mineral esta pre-oxidada solo hasta un determinado límite debajo del valor crítico.

La oxidación excesiva causa perjuicios para la flotación ya que aumenta el consumo de colector y disminuye la selectividad. Posibles causas de estos efectos adversos son la no adsorción del colector en la superficie del mineral, constituida de especies oxidadas, y el no lograr hacer la capa adsorbente hidrofóbica.

Por lo antes mencionado es de gran importancia conocer la cantidad de oxígeno que se encuentra disuelto en la pulpa del mineral. La cantidad de oxígeno disuelto en la pulpa proviene en gran parte de la mezcla de agua con aire causada por el movimiento del agua.

La solubilidad del oxígeno en el agua se ve disminuida por la presencia de sales disueltas (el agua de mar disuelve menos gases que el agua pura). Este comportamiento se debe a la utilización de agua en la hidratación de iones y esto a su vez ocasiona una reducción en la cantidad de moléculas de agua disponibles para disolver los gases (oxígeno) (Leja, 2004).

La interpretación del oxígeno disuelto en la pulpa de los minerales va muy relacionada a la interpretación de  $E_h$ , debido a que el oxígeno es necesario para la transferencia de electrones. En estudios realizados en diferentes plantas concentradoras se ha observado que cuando los valores de  $E_h$  son bajos, el consumo del oxígeno disuelto en la pulpa es alto, y por consiguiente, la cantidad de oxígeno disuelto en la pulpa tendrá valores bajos, como es el caso de los circuitos de molienda. Por el contrario, cuando los valores de  $E_h$  son altos, el consumo del oxígeno disuelto es bajo, por lo que se espera que los valores de oxígeno disuelto incrementen, lo cual se observa en los circuitos de flotación. Por lo tanto, se espera que en los gráficos de los estudios realizados a plantas de beneficio, los perfiles de  $E_h$  y oxígeno disuelto dentro de los circuitos de molienda y flotación tengan tendencias similares (Greet y colaboradores, 2005a).

### Demanda de Oxígeno Disuelto (DOD).

El contenido de oxígeno en la pulpa es determinado por un balance entre la demanda de oxígeno del mineral y el oxígeno suministrado. Si la demanda de oxígeno es elevada, el contenido de oxígeno en equilibrio será bajo; esto se conoce por el monitoreo continuo de oxígeno disuelto en la pulpa, en este sentido, el contenido de oxígeno puede ser usado como una variable. Sin embargo, si la demanda de oxígeno es baja, la pulpa estará cercana a la saturación con oxígeno y entonces la oxidación de la superficie del mineral habrá alcanzado su estado de oxidación de equilibrio. En otras palabras, si se quiere conocer el grado de oxidación de la superficie del mineral, este puede ser evaluado mejor determinando la demanda de oxígeno.

Generalmente, los resultados típicos reportados sobre la demanda de oxígeno, muestran demandas relativamente altas para la molienda y demandas que tienden a cero a medida que la pulpa avanza en el circuito de flotación.

Estudios realizados en plantas concentradoras para determinar la demanda de oxígeno han demostrado que el consumo de oxígeno disminuye cuando el tiempo de molienda se incrementa. Esto es contrario a lo esperado ya que un incremento en el área superficial aumentaría la demanda de oxígeno, aunque también es cierto que la oxidación se incrementa con el tiempo y que el espesor de la capa oxidada también crece con el tiempo, disminuyendo la velocidad de reacción. Otras pruebas han mostrado que la aireación es benéfica en la depresión de sulfuros de hierro. El hierro es muy reactivo al oxígeno, y la demanda es muy superior a la de otros sulfuros. Además, se ha observado que colectores y modificadores bajan sustancialmente la demanda de oxígeno, porque obstruyen el acceso directo del oxígeno a la superficie del sulfuro, lo que minimiza el efecto de la aireación.

Por esta razón, cuando se busca establecer el significado de la demanda de oxígeno en la flotación, se deben de considerar las cantidades de reactivos y la abrasión de la bola en la molienda cuando se mide el oxígeno, ya que estos factores tienen influencia sobre los resultados de flotación, por eso, es importante que este parámetro pueda ser monitoreado en cualquier parte del circuito (Leja, 2004).

La demanda de oxígeno disuelto de la pulpa se estima midiendo la evolución del perfil de concentración de oxígeno disuelto en el tiempo. El concepto de la curva de demanda de oxígeno de la pulpa (gráfica de velocidad con la que el oxígeno es consumido ppm/min vs tiempo de aireación), caracteriza la susceptibilidad de la superficie del mineral a sufrir oxidación.

### Temperatura (T).

En las plantas concentradoras se ha observado que la temperatura ejerce una gran influencia sobre la capacidad de adsorción del colector, en este sentido, la temperatura se convierte en un factor que afecta la cinética de la flotación (Leja, 2004).

Algunos sistemas pueden ser influenciados por la temperatura al incrementar la solubilidad del mineral, dando lugar a la producción de un gran número de iones metálicos. Un ejemplo de lo anterior se reportó para una planta de Sudáfrica, donde se observó el efecto de la temperatura en la flotación; los resultados del laboratorio mostraron que al incrementarse la temperatura de la pulpa aumenta la recuperación de pirita (Greet y colaboradores, 2005a).

### Disolución de los iones metálicos.

Las aguas empleadas en las plantas concentradoras contienen una gran variedad de especies disueltas, además de las que se generan en los procesos del beneficio de minerales. Un aspecto importante que debe de considerarse, es la activación de minerales por iones metálicos que contaminan la superficie. A esto le llamamos activación inadvertida ó indeseable, la cual provoca que el mineral flote en etapas donde no se espera que flote; esto perjudica la flotación selectiva.

Una fuente principal de los iones metálicos es la oxidación de minerales de sulfuro. Con cierta combinación de minerales la oxidación es mayor debido a interacciones galvánicas. Una superficie ligeramente oxidada logra una mejor flotación de los sulfuros, las especies óxi, hidróxi, sulfóxi formadas en la superficie del mineral pueden interactuar con colectores; pero las superficies extensamente oxidadas reducen la recuperación y selectividad de la flotación, ya que se reduce la hidrofobicidad del mineral de valor, además de reducir la diferencia de hidrofobicidad entre el mineral de valor y la ganga.

La oxidación extensiva de la superficie del mineral de valor se puede llevar a cabo debido a la acción de la intemperie, en el minado, en el almacenamiento, en la trituración, molienda ó flotación, por lo que resulta importante determinar en dónde y que tan rápido se lleva a cabo dicha oxidación, a fin de evitar efectos adversos en la flotación (Leja, 2004).

En los últimos años se han desarrollado técnicas para analizar química y físicamente la superficie de los minerales. Una de las técnicas que se ha venido empleando en la caracterización de los minerales de sulfuro, es la determinación de la magnitud de la oxidación superficial por medio de la

extracción de los iones metálicos (cationes) presentes en especies oxidadas con un ligando llamado EDTA (ácido etilendiaminotetraacético), un compuesto que forma complejos con la mayoría de iones metálicos (Leja, 2004).

La extracción con EDTA se ha empleado en la extracción de hidróxidos metálicos presentes en la superficie de minerales de sulfuro. La técnica es la siguiente: Un peso conocido de mineral es mezclado con un volumen conocido de una solución al 3% de EDTA. La cantidad de EDTA debe de estar en exceso. Las superficies de los minerales serán acondicionadas con EDTA para determinar la cantidad de iones removidos de la superficie de los minerales. Solamente las especies de metales oxidados serán disueltas mediante el EDTA. Esta prueba proporciona una medida de la oxidación de las superficies. De esta manera se estima la cantidad de iones metálicos sobre la superficie del mineral. Al extracto de EDTA se le analiza el contenido de metales por absorción atómica. Aunque la prueba es sencilla, está limitada para óxidos e hidróxidos metálicos, los cuales están usualmente presentes en la superficie del mineral debido a los enlaces electrostáticos. El EDTA no solubiliza especies metálicas enlazadas químicamente, por ejemplo, los sulfuros de cobre formados en la superficie de la esfalerita debido al intercambio de iones cobre por los iones zinc.

La extracción con EDTA se emplea por la habilidad de este ligante para solubilizar productos oxidados de sulfuros metálicos. La termodinámica nos dice que los óxidos, hidróxidos, sulfatos y carbonatos de Pb, Zn y Fe tienen solubilidad con EDTA. Se puede determinar la oxidación de la galena y esfalerita mientras que la de la pirita es más complicada, debido a que el EDTA no hace diferencia entre el hierro oxidado de la pirita y el hierro oxidado de la bola de acero en la molienda (Rumball y Richmond, 1996).

La técnica de extracción con EDTA proporciona una herramienta poderosa para definir la extensión y origen de la oxidación en los circuitos de flotación, además de identificar al mineral más reactivo, en dónde y que parámetros afectan su oxidación, información que ayuda en la optimización de los procesos.

## **CAPÍTULO 3.**

### **REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.**

Este capítulo se enfoca a conocer trabajos relevantes que han realizado otros autores estudiando el efecto de la calidad del agua en la selectividad de la flotación de sulfuros metálicos en otras plantas concentradoras. Se comentará las metodologías que han planteado en las investigaciones, los efectos que han encontrado y a qué se atribuyen, así como los tratamientos que han realizado o propuesto para eliminar ó evitar los efectos adversos en los procesos de flotación.

#### **3.1. Uso de agua recirculada y consecuencias.**

Algunos países han realizado reformas sobre los suministros de agua para la industria minera, con el objetivo de reducir el consumo de agua fresca. Esto ha ocasionado que el agua recirculada se convierta en la principal opción de uso. (Norgate y Lovel, 2006).

Otros factores por los que se ha incrementado el uso del agua recirculada son:

- El uso del agua de la localidad en donde se establece la planta concentradora, puede representar un consumo alto para el suministro del agua local.
- La producción y transporte del agua fresca es costoso y tiene efecto en los costos de operación.
- Los efluentes de las operaciones del proceso perjudican el medio ambiente, por el contenido de sólidos suspendidos, así como de contaminantes químicos tóxicos en solución, fracciones de reactivos de flotación y sus productos de degradación.

Los objetivos principales del uso de agua recirculada:

- Reducción de la demanda del agua fresca.
- Reducción del volumen del efluente (descarga al medio ambiente) (Rao y Finch, 1989).

Los beneficios que se obtienen se ven en el aspecto económico, social y del medio ambiente. En el medio ambiente las concentraciones de las especies disueltas o suspendidas disminuyen porque quedan retenidas en el agua recirculada (Johnson, 2003).

La recuperación adecuada de agua de cada uno de los espesadores, asegura maximizar el uso de agua recirculada y minimiza el consumo de agua fresca. El agua recirculada no necesitará ser tratada si: el agua fresca es de alta calidad, los reactivos contienen especies que perjudiquen poco al proceso y si el mineral tiene una contribución mínima de especies (productos minerales con baja solubilidad). (Johnson, 2003; Levay y Schumann, 2006).

Las propiedades del agua recirculada están modificadas porque contiene diferentes especies disueltas, por lo que, las propiedades de las aguas recirculadas son diferentes a las de las aguas frescas. Una combinación adecuada de estas aguas es deseable para que la calidad del agua sea estable y evite efectos negativos en el proceso (Johnson, 2003; Rao y Finch, 1989; Levay y Schumann, 2006; Levay y colaboradores, 2001).

El agua constituye la mayor proporción de la pulpa en los circuitos de flotación (Schumann y colaboradores, 2003), el uso del agua es de 80 a 85% (Levay y colaboradores, 2001), pero pocas investigaciones se han enfocado al entendimiento y control de la calidad del agua, ya que históricamente se ha considerado como un medio de transporte inerte (Schumann y colaboradores, 2003; Norgate y Lovel, 2006); el cambio de actitud para considerar una evaluación del agua ha surgido por la utilización de efluentes de agua residual tratada, aguas saladas y del agua recirculada de la presa de jales, espesadores, desagües y filtros, las cuales, contienen impurezas. Con esto surge la necesidad de realizar estudios detallados de la calidad del agua de proceso y mantener un control que minimice los efectos adversos en la flotación de sulfuros (Schumann y colaboradores, 2003; Levay y colaboradores, 2001; Johnson, 2003); lo cual puede ser logrado por un tratamiento al agua, de tal manera que su influencia pueda ser tolerada (Johnson, 2003).

Algunas compañías mineras forman comités para administrar el uso del agua, estos comités tienen como objetivos prevenir y minimizar la contaminación del agua, recircular y reusar el agua y monitorear las descargas al medio ambiente (Van Niekerk y colaboradores, 2006).

Para alcanzar los objetivos (consumos mínimos de agua fresca, disminución de contaminantes al medio ambiente) se enfocan en las prioridades de las áreas claves; realizan, monitorean y ajustan programas de trabajo; realizan evaluaciones en las áreas; identifican fallas potenciales de los suministros de agua; consideran a la sociedad, la economía y ecosistemas y comunican políticas y objetivos formales, considerando que sean reales y alcanzables (Levay y Schumann, 2006).

### **3.2. Metodologías para determinar los efectos de la calidad del agua.**

En los años 90 algunas minas comenzaron a efectuar estudios de la calidad del agua, examinando los suministros potenciales de agua y su influencia en la flotación de minerales. Los estudios se realizaron a nivel laboratorio evaluando la influencia que tenía cada una de las aguas en los resultados de la flotación, con el objetivo de encontrar una estabilización adecuada de los suministros de agua disponibles para el uso de la planta. Con estos estudios se identificó que la calidad del agua tiene una influencia significativa en los procesos de flotación (Schumann y colaboradores, 2003).

A continuación se presentan algunas metodologías que siguieron algunos autores en sus investigaciones sobre los efectos de la calidad del agua en la flotación de minerales sulfurosos, que nos sirven de guía para la realización de este proyecto.

Una línea de investigación fue elaborada por la mina de Endeavor, Cobar (Cooper y colaboradores, 2006), la metodología tiene su origen a partir de que se implementa un plan de mejora que incluye crecimiento en los objetivos de producción, lo cual implicaría un aumento en el consumo de agua. Para hacer más eficiente el consumo de agua se crea el comité para la administración del agua, encargado de desarrollar una metodología que haga más eficiente el uso de agua. La metodología consta de:

- Desarrollo de balance de agua. Fue necesario hacer cambios de medidores e instalación de nuevos medidores en otras tuberías. Con ellos ya se pudo cuantificar el uso de agua.
- Identificación de áreas con desperdicio de agua, así como de áreas de oportunidad para reducir el consumo de agua fresca.
- Desarrollo de diagrama de uso de agua de donde surgen 4 categorías: Agua para sellos de bomba, agua para filtros, agua para preparación de reactivos y agua para misceláneos.
- A partir del diagrama se determinó que tipo de aguas se usarían (fresca o recirculada) según la categoría.
- Se toman acciones para maximizar la recuperación de agua.
- Se concientiza a los trabajadores (Cooper y colaboradores, 2006).

Otra línea de investigación más elaborada fue desarrollada y publicada por una mina de Newcrest llamada Cadia Hill Gold (Schumann y colaboradores, 2003), en la que se relaciona estudios de las corrientes de aguas y sus efectos en la flotación. La metodología empleada se describe de la siguiente manera:

- Identificación de los suministros potenciales del agua que se usa para la operación de la planta.
- Pruebas de flotación en el laboratorio con los diferentes tipos de aguas, para identificar el efecto de la calidad del agua.
- Análisis del agua. Obtener los constituyentes inorgánicos (especies iónicas) y orgánicos (mediciones de carbón orgánico total y análisis de microorganismos dentro de las muestras), que se encuentran en el agua.
- Comparación de resultados de las pruebas de flotación con los parámetros de la calidad del agua (análisis del agua), para determinar que constituyentes tienen mayor influencia en los resultados de la flotación. Realización de gráficas.
- En base a la información anterior, obtener una correlación entre la calidad del agua y los resultados de la flotación.
- Análisis de mecanismos tales como: condiciones de pH vs ORP; adsorción o precipitación de especies solubles o partículas coloidales sobre la superficie del mineral; influencia de la fuerza iónica; influencia de las especies disueltas sobre las características de la espuma; interacción de especies disueltas con colectores; interacción de especies disueltas con depresores y dispersantes; influencia de especies químicas disueltas en la disolución del mineral.
- Considerar los reactivos que se emplean en cada planta, ya que la presencia de ellos en el agua de recirculación puede afectar a la otra planta donde no se dosifica.
- Establecer base de datos para correlacionar la composición del agua con resultados de flotación, de donde se obtienen los parámetros importantes con los que se evaluará si se requiere tratamiento al agua recirculada.
- Elaboración de balance de materia para el agua.
- Pruebas en planta (Schumann y colaboradores, 2003).

Las continuas investigaciones han detectado la necesidad del control de la calidad del agua por varios factores que están involucrados, los cuales no son comprendidos normalmente. Algunos efectos solo pueden ser apreciados considerando el circuito de manera completa (Levay y colaboradores, 2001). Al respecto el Ian Wark Research Institute (IWRI), integró una metodología ver Fig. 3.2.1. (a partir de otros estudios) (Levay y colaboradores, 2001); donde es posible conjugar un modelo que prediga la química de la pulpa a partir de mediciones continuas del agua de la pulpa y de la superficie del mineral.



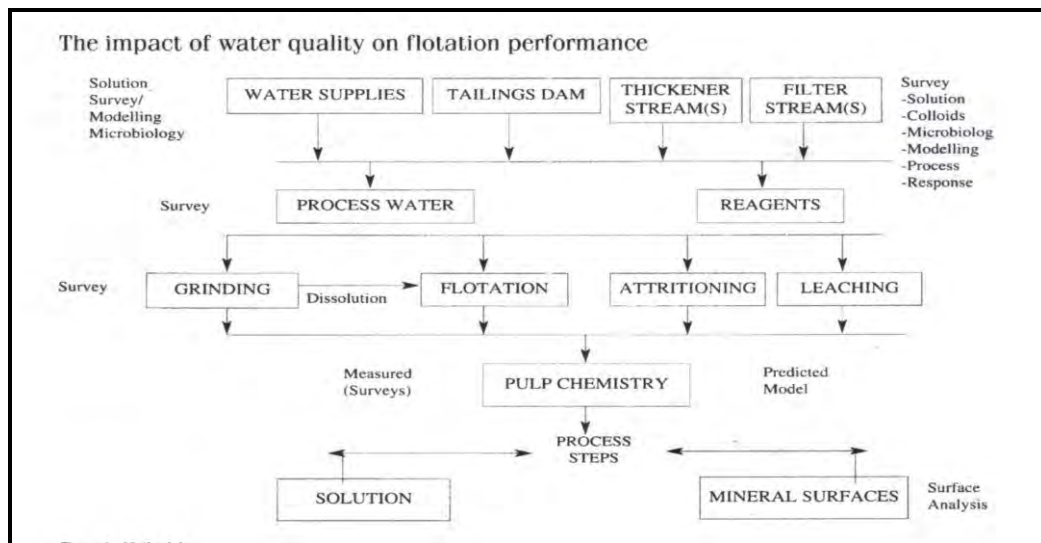


Figura 3.2.1. Esquema de la metodología implementada por IWRI.

La metodología combina:

- Estudio y modelación de la solución
- Estudio microbiológico.
- Análisis y modelación de la superficie del mineral.
- Respuesta del proceso.

El estudio y modelación de la solución así como el estudio microbiológico se hace a todas las corrientes de suministros de agua y se hacen mediciones adicionales de pH, Eh, OD, COT, SDT, y especies iónicas. Además se emplea el uso de modelos termodinámicos (paquetes) relacionados a especies y precipitación como:

- Geochem-pc. Predice especies y fases de precipitación. Se estudia la acción microbiológica su cálculo y efecto en condiciones aeróbicas y anaeróbicas con el tiempo de almacenamiento.
- Miinteq. Efecto de las temperaturas en las especies y precipitaciones en la solución. Se estudia la extracción del material coloidal oxidado por acomplejamiento de EDTA, se compara en soluciones ensayadas con y sin acidificación.
- Solgaswater. Para diagramas de Pourbaix (Eh-pH). Para determinar el control de especies.

Lo anterior es para lograr un mejor control cinético (precipitación, equilibrio de la solución), de las especies iónicas que permanecen.

Para el análisis de superficie de la partícula del mineral en diferentes fases, se lleva a cabo por la combinación de XPS (en inglés X-ray photoelectron spectroscopy) y TOFSIMS (en inglés time-of-fly secondary ion mass

spectroscopy) con la extracción química de las especies oxidadas en la capa superficial usando EDTA.

Para citar los datos del estudio microbiológico se ha evaluado principalmente los efectos adicionales de la calidad del agua debidas a la fuerza y continuidad de la reacción en las colas y recirculación. Se necesita más investigación para que se comprenda el proceso (Levay y colaboradores, 2001)

Algunos de los beneficios que se obtienen al aplicar esta metodología son: predecir efectos de variación en las especies al adicionar modificadores de pH, así como tener una correlación de material coloidal vs especies sobre la superficie de la partícula del mineral.

### **3.3. Efectos en la flotación de sulfuros de las especies presentes en el agua de proceso.**

En 1998 una mina de Newcrest llamada Cadia Hill Gold comenzó estudios a nivel laboratorio de cada uno de sus suministros de agua, en ellos se analizaron los componentes de las aguas, como son los constituyentes inorgánicos (cationes metálicos y otras especies iónicas) y los orgánicos (carbón orgánico total y microorganismos), y se compararon los resultados de la flotación con las diferentes calidades de aguas, de donde se identificaron los componentes con más influencia en los resultados operativos (Schumann y colaboradores, 2003):

- Gases disueltos. Por ejemplo, el  $\text{CO}_2$  se disuelve para formar ácido carbónico, que se ioniza para producir iones  $\text{H}^+$  y  $\text{HCO}_3^-$ . Otros gases que se disocian son  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{HCN}$ . Estos forman ácidos débiles cuando se disocian en el agua.
- Hay otros gases que se disuelven en el agua pero no se ionizan como el  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  y  $\text{CH}_4$ . El más importante por su efecto sobre los sistemas acuosos es el  $\text{O}_2$ . El  $\text{O}_2$  disuelto oxida la superficie metálica del mineral lo que causa corrosión (Kemmer y McCallion, 2001).
- Sólidos coloidales suspendidos. La precipitación de partículas coloidales como cristales y geles, son provocadas por el cambio de concentraciones inducido por el cambio de pH,  $E_h$ , combinaciones de suministro de agua y adición de reactivos.
- Estas especies coloidales pueden permanecer disueltas en la solución y pegarse a la superficie de la partícula formando una capa superficial hidrofóbica. El material coloidal de esta categoría incluye  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Pb}(\text{OH})_2$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  (tiosales),  $\text{CO}_3^{3-}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , ácido silícico ( $\text{H}_2\text{SiO}_3$ ) y aluminosilicatos;

todas estas especies se han encontrado en la superficie de la partícula (Levay y colaboradores, 2001).

- El sulfato es probable que se precipite como sulfato de calcio, más que como sulfato de metal (e.g., Cu, Pb, Zn, Fe) ya que las concentraciones de los metales son bajas, mientras que la del calcio es relativamente alta (Grano y colaboradores, 1995).
- Más del 70% de las superficies de minerales de sulfuros se cubren de capas de  $\text{CaSO}_4$  (Levay y colaboradores, 2001; Grano y colaboradores, 1995 y 1997). En el caso de la galena, las partículas de  $\text{CaSO}_4$  se presentan fuertemente heterocoaguladas sobre su superficie debido a los bajos valores del potencial Z (-117mV) (Grano y colaboradores, 1995; Sun 1943); esto reduce considerablemente su flotación (Grano y colaboradores, 1995 y 1997).
- Compuestos inorgánicos disueltos. Una parte de los iones disueltos provienen de las aguas naturales, de aguas subterráneas ó de aguas recirculadas. Los iones metálicos (cationes) disueltos en estas aguas son los responsables de la dureza del agua y las especies aniónicas presentes son las responsables de la alcalinidad del agua. Las aguas con altas concentraciones de cationes son consumidores de colectores aniónicos y las aguas con altas concentraciones de aniones pueden acomplejar iones metálicos; además, los aniones en las aguas alcalinas pueden actuar como activadores o depresores en la flotación.
- Algunos efectos causados por los iones más comunes en la flotación de sulfuros son:
  - Los iones de plata puede activar galena (Rykl, 1964) y esto probablemente podría causar la liberación de una cierta cantidad de plomo en la solución (Coetzer y colaboradores, 2003).
  - El plomo forma un complejo de cianuro insoluble en agua (Leja, 1982). Aunque los iones de plomo presentes probablemente estarán como sulfato de plomo,  $\text{PbSO}_4$ , o hidróxido de plomo,  $\text{Pb(OH)}_2$ , con solubilidades de 155 y 42 ppm (Weast y Astle, 1983), respectivamente. Según Ayres y colaboradores (2002), el hidróxido de plomo sólo empezara a precipitar en un nivel de pH entre 8 y 10,5 y en niveles de concentración por encima de 100 ppm. Por debajo de este nivel, el plomo se presentará como metal disuelto (Coetzer y colaboradores, 2003).

- La activación accidental de esfalerita se efectúa por la hidrólisis de plomo derivados de la oxidación de galena (Grano y colaboradores, 1997; Coetzer y colaboradores, 2003).
- Los iones de cobre están probablemente presentes como  $\text{CuOH}^+$  y la mayoría como un precipitado de  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  en las condiciones alcalinas considerables (Latimer, 1952). El hidróxido de cobre es extremadamente insoluble en un nivel de pH de 8, con una solubilidad de sólo 0,001 ppm (Ayes, et al., 2002). Estas especies hidrolizadas de cobre pueden activar a la esfalerita en especial a través del precipitando  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  (Wang y colaboradores, 1989; Gerson y colaboradores, 1999; Chen y Yoon, 2000; Coetzer y colaboradores, 2003).
- Por otro lado, las altas cantidades de cobre en solución se puede deber probablemente al cianuro libre (60 ppm), el cual podría causar la disolución de cobre en la superficie de los minerales de cobre. Los minerales que se activan con cobre son galena, esfalerita y piritita (Allison, 1982), mediante la formación de un complejo soluble de cianuro de cobre como el  $\text{Cu}(\text{CN})_2^-$  y  $\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-}$  (Seke y Sandenbergh, 2002; Coetzer y colaboradores, 2003).
- Sales de plomo, manganeso (II) (Fuerstenau, 1975), cobre (Kraeber y Boppel, 1934) y zinc (Coetzer y colaboradores, 2003), se sabe que activan la flotación de cuarzo a un nivel de pH considerado. Además tienden a liberar iones como el calcio, el magnesio, el silicio y el manganeso (especialmente con iones de cobre y plomo) a partir de minerales de ganga (dolomita y cuarzo) (Coetzer y colaboradores, 2003). Estas sales pueden influir en la estabilidad de la espuma y la selectividad durante la flotación de sulfuros (Coetzer y colaboradores, 2003). Las sales de cationes trivalentes tienen un alto efecto depresivo (Rao y Finch, 1989).
- Compuestos orgánicos disueltos. Las especies orgánicas disueltas son adsorbidas por el mineral o son degradadas (Schumann y colaboradores, 2003). La materia orgánica en el agua puede afectar la flotación si sus componentes actúan en la superficie o funcionan como dispersantes o floculantes (Rao y Finch, 1989).
- Metabolismo, actividad microbiológica. La presencia y consecuencia de esta acción microbiológica aun no ha sido determinada.
- Impurezas de reactivos usados. Surfactantes residuales o productos de la degradación de estos reactivos pueden interferir con la estabilidad de

espuma, así como la depresión de los minerales de valor (Coetzer y colaboradores, 2003; Rao y Finch, 1989).

- Además se identificó que la composición química del agua de proceso es afectada por:
  - Disolución de fases solubles del mineral.
  - Oxidación superficial.
  - Adición de reactivos durante el procesamiento de los minerales (Levay y Schumann, 2006).

Todo lo anterior nos sirve de marco de referencia en el estudio de la composición química del agua y su influencia en los resultados de la operación, pero todavía es necesario entender los subprocesos ó mecanismos en los que participan las especies en solución, de los cuales aún hay escasa investigación (Schumann y colaboradores, 2003).

Algunos mecanismos propuestos son (Levay y colaboradores, 2001; Schumann y colaboradores, 2003; Levay y Schumann, 2006):

- Adsorción o precipitación de especies orgánicas e inorgánicas del agua de proceso en la superficie de las partículas del mineral.
- La concentración de los reactivos y sus reacciones, sus productos de reacción.
- Reacciones químicas entre los constituyentes del agua de proceso y las especies químicas presentes en la superficie de las partículas del mineral.
- Interacciones entre especies químicas y microbiológicas con los reactivos adicionados durante la flotación.
- Variaciones en las condiciones de pH y  $E_h$ .
- Influencia de las especies químicas disueltas en el agua sobre las características de la espuma (estructura, estabilidad).
- Influencia de las especies químicas disueltas del mineral en la disolución oxidación.
- La acción microbiológica en el circuito y en el almacenamiento de jal.

Consecuencias en el proceso de los mecanismos antes mencionados:

- Pérdida de la recuperación:
  - Recubrimiento de la superficie del mineral de valor.
  - Adsorción competitiva de activadores y reactivos con otras especies.
  - Pérdida de reactivos debida a la precipitación, reacciones inadvertidas y sobre recubrimientos.
- Pérdida de grado:
  - Cubrimiento no selectivo en mineral de valor y ganga.
  - Ineficiencia en la separación de mineral y ganga.
  - Activación inefectiva.

- Pérdida en la eficiencia de la separación en los procesos siguientes a la molienda.
- Productos contaminados.
- Recubrimiento hidrofóbico de material microbiológico en minerales sin valor, causando flotación no deseada.
- Proceso afectado por dispersantes y floculantes (Levay y colaboradores, 2001).

### 3.4. Tratamientos a aguas recirculadas.

Las técnicas de tratamiento de agua residual se han estado examinando para poderlas aplicar al agua recirculada a la flotación. Los tratamientos de agua involucran: Disminuir acidez, remover metales, remover sales disueltas, remover sólidos suspendidos, remover materiales biológicos y microorganismos (Norgate y Lovel, 2006; Johnson, 2003; Rao y Finch, 1989). Estas técnicas incluyen procesos de adsorción física (usando carbón activado, carbón mineral ó arcilla de bentonita ó salmueras de mineral), neutralización/precipitación, oxidación biológica de orgánicos, intercambio iónico por medio de resinas, ósmosis inversa, congelación atmosférica (Rao y Finch, 1989).

Las operaciones de mina y metalúrgicas generan diferentes efluentes. El contenido de compuestos tóxicos en los efluentes dependen de los minerales y de los procesos metalúrgicos, cuando estos compuestos están en concentraciones altas es cuando se requiere algún tratamiento para el agua antes de descargarla ó de recircularla.

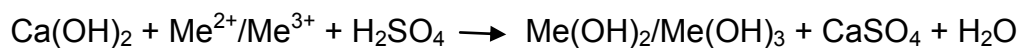
Efluentes que requieren tratamiento:

- Los drenajes ácidos de mina ó drenajes ácidos de roca (AMD ó ARD) son generados por la oxidación natural de los sulfuros (principalmente pirita y pirrotita), al exponerse al aire y al agua (Kuyucak, 2002). Los drenajes ácidos de mina se caracterizan por valores bajos de pH, alto contenido de metales pesados y sulfatos. La solubilidad de muchos metales se incrementa a condiciones de pH bajo, causando elevadas concentraciones de iones metálicos como Fe, Mn, Al, Zn, Cu, Ni, Pb, Cd y As.
- Descargas con concentraciones elevadas de amoníaco ó nitratos, la presencia de estas especies en las descargas se debe a la hidrólisis de cianuro ó a la disolución de residuos de agentes explosivos. La amina forma complejos con los metales pesados (Cu, Zn, Ag, Ni). Su presencia puede inhibir la precipitación de estos metales a valores de pH arriba de 9 (Kuyucak, 2002).

- Aguas de proceso con contenido de compuestos derivados de cianuro ( $\text{SCN}^-$ ,  $\text{OCN}^-$ ,  $\text{NH}_3$  ó  $\text{NO}_3^-$ ) generados en las operaciones metalúrgicas (cianuración) en donde se recuperan metales preciosos.
- Aguas de proceso con alto contenido de tiosales (tiosulfatos, politionatos, sulfitos y sulfatos). Las tiosales son compuestos de oxígeno y azufre producidos en molienda o flotación de minerales sulfurosos, que alteran el pH de la pulpa (bajan el pH).

Opciones de tratamientos para drenajes ácidos de mina:

- Neutralización/precipitación. Es eficiente para tratar metales pesados (Cu, Zn, Cd, Mn, Pb,  $\text{Fe}^{2+}$ ) porque su solubilidad es baja a valores de pH mayores de 9 ya que precipitan fácilmente. Con reactivos (generalmente es cal, aunque también se emplea caliza,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , NaS, NaOH y  $\text{NH}_3$ ) se neutraliza el pH y se precipitan los metales, la reacción principal de este proceso es:

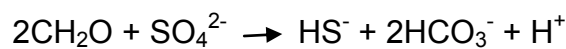


Los hidróxidos metálicos precipitan cuando alcanzan sus puntos límites de solubilidad, lo cual ocurre a cierto valor de pH, debajo de este valor los metales son solubles (algunos hidróxidos se solubilizan a valores de pH por arriba de 12). La solubilidad del hidróxido metálico nos dice si el proceso de neutralización es eficiente (Kuyucak, 2006).

- Proceso de lodos de alta densidad (HSD). Actualmente se le llama así al proceso de neutralización que emplea cal. Este proceso consta de dos pasos (Kuyucak y Sheremata, 1995). En el primero se aumenta el pH de la corriente que entra al proceso con el lodo recirculado al primer reactor. En el segundo el pH es ajustado usando suficiente cal para precipitar los metales, la aireación es ocasionada en el reactor para oxidar el Fe ( $\text{Fe}^{2+}$  a  $\text{Fe}^{3+}$ ) y producir un lodo más estable (Kuyucak y colaboradores, 1995). Los lodos pueden ser filtrados al vacío para alcanzar un 50% de sólidos y así pueden ser usados junto con los jales como relleno. Los beneficios de usar este proceso son los bajos costos y obtener una buena calidad de agua recuperada (Kuyucak, 2006; Van Niekerk y colaboradores, 2006).

CSIR de Sudáfrica desarrollo un conjunto de tratamientos de neutralización basados en caliza, los cuales incluyen el reuso de bicarbonato y carbonato de calcio generados en los procesos. Algunas desventajas de este proceso es que la caliza se encuentra cubierta con otros precipitados, la cinética es lenta por lo que sus tiempos de retención en el reactor son elevados, el manejo de la caliza es complicado (almacenamiento, dosificación) (Van Niekerk y colaboradores, 2006).

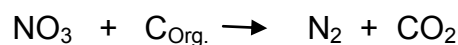
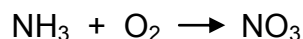
- Tratamiento con cal en línea. La neutralización se lleva a cabo en un paso, consiste en agregar cal en una parte del bombeo, se recomienda para bajar acidez.
- Proceso basado en la reducción de sulfatos biológicamente (SRB). Bajo condiciones anaeróbicas, reductivas y en presencia de fuentes nutrientes de carbón orgánico, la reducción de sulfato a base de bacterias puede convertir el sulfato a sulfito. En este proceso el CO<sub>2</sub> es un producto de la respiración del proceso SRB y esto produce bicarbonato, aumentando el pH, mientras se forman complejos de sulfuros metálicos insolubles. Las ecuaciones que representan este proceso son:



Los parámetros críticos de este proceso son la temperatura, nutrientes, alcalinidad, tiempo de retención, población de bacterias, contaminación de los efluentes y flujos. Cuando el proceso es activo las principales fuentes de nutrientes son etanol y gas natural; cuando el proceso es pasivo son aserrín, viruta y estiércol. Otras fuentes usadas son el azúcar, hidrógeno y lodos de agua residual (Kuyucak, 2006; Van Niekerk y colaboradores, 2006).

Opciones de tratamientos para descargas con concentraciones elevadas de amoníaco ó nitratos (Kuyucak, 2006):

- Método ampliamente usado es la degradación natural en presas de retención. La degradación natural del amoníaco implica la transpiración de nitrógeno como gas disuelto en las aguas residuales. Las reacciones son:



Este método convierte al amoníaco en un subproducto no tóxico.

Opciones de tratamientos para aguas de proceso con contenido de cianuro:

- La degradación natural en presas de retención es el proceso más empleado. El proceso de degradación es semejante al del amoníaco. El cianuro es destruido convirtiéndolo en un compuesto insoluble que no pueda ser tomado por los organismos.



Opciones de tratamientos para aguas de proceso con alto contenido de tiosales:

- La degradación de tiosales basado en la oxidación biológica se puede llevar a cabo por el proceso SRB (Kuyucak, 2006).
- Tecnologías de desalinización por membrana. Incluye como tratamientos unitarios la neutralización (cal/caliza), suavización ó cristalización del exceso de yeso, micro/ultrafiltración y osmosis reversible (Van Niekerk y colaboradores, 2006).

Generalmente no son usados en la industria minera por el volumen que se maneja de los flujos.

Tecnologías de tratamientos pasivos:

Drene de caliza, lagunas de oxidación, camas de reducción de sulfatos, camas empaquetadas de flujo por gravedad (Van Niekerk y colaboradores, 2006).

Otros tratamientos que se han estado utilizando para eliminar especies específicas son:

- Uso de carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Elimina el calcio y evita ó redissuelve el yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) precipitado sobre la superficie de la galena y la calcopirita (Grano y colaboradores, 1995; Martínez, 2007; Grano y colaboradores, 1997; Sun 1943).
- Empleo de hidróxido de sodio NaOH en lugar de CaO para minimizar la concentración de iones calcio en solución (Martínez, 2007).
- Empleo combinado de carbonato de sodio con hidróxido de sodio para minimizar la concentración de iones calcio en solución (Martínez, 2007).
- Uso de ácido oxálico para precipitar  $\text{Ca}^{2+}$  y bajar pH (Rao y Finch, 1989).
- Intercambiadores iónicos de resinas para eliminar  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  (Rao y Finch, 1989).
- Empleo de hidroxiapatita para adsorber iones de metales pesados presentes en la solución y evita que activen especies minerales no deseadas.
- Empleo de aluminato de sodio ( $\text{NaAlO}_2$ ) para precipitar a los metales pesados.
- Ósmosis inversa para estabilizar algunos de los contaminantes del agua.

- Empleo de otros agentes acomplejantes tales como el N-(2-aminoetil)-1,2-etanodiamina (DETA) ó N,N'-bis (2-aminoetil)-1,2-etanodiamina (TETA), para acomplejar los iones de los metales pesados, de esta forma los desactiva y se evita la flotación de minerales indeseables (Martínez, 2007).
- Carbón activado para remover especies orgánicas han causado mejoras en el grado. Se reduce el COT y aparentemente también es efectivo para reducir microorganismos, controlando el pH de 6.3 a 6.8 (Levay y colaboradores, 2001).

En general, para implementar y diseñar el tratamiento adecuado de agua se considera la cantidad y calidad del agua a tratar, el tipo de especies (parámetros) que se requiera remover/reducir, objetivos de la calidad del agua, capital y costos de operación (Kuyucak, 2006).

Los procesos de tratamiento se diseñan para producir un efluente con la calidad adecuada para que sea reciclado o reusado en procesos mineros, riego, recreación, generación hidroeléctrica ó para otras industrias vecinas.

## **CAPITULO 4.**

### **EXPERIMENTACIÓN.**

En este capítulo se describe la metodología que se toma como base para la realización de la parte experimental del proyecto. Además se describe como se realizó la parte experimental, equipos y procedimientos que se implementaron.

#### **4.1. Metodología.**

La metodología que se toma como base en este estudio fue desarrollada por el Ian Wark Research Institute (IWRI) (Levay y colaboradores, 2001) y ya ha sido utilizada en otras plantas concentradoras, principalmente en Australia. Se dan más detalles de la metodología en el capítulo 3.

En el caso de Minera Sabinas esta metodología se adaptó cubriendo 5 etapas principales, de la siguiente manera:

- Inventario de la Química de la Pulpa.

Esta etapa hace referencia a la realización de mediciones durante el muestreo en la Planta y en las pruebas de laboratorio, de las variables termodinámicas: Potencial de Hidrógeno (pH), Potencial Oxido-Reducción ( $E_h$ ), Oxígeno Disuelto (OD), Demanda de Oxígeno Disuelto (DOD) y Temperatura (T). Con el fin de obtener un perfil de cada una de ellas que nos ayude a comprender las reacciones que sufren los minerales y tomar acciones a favor o en contra, dependiendo de su efecto sobre el comportamiento metalúrgico de los minerales de interés.

- Disolución de los Iones Metálicos (IM).

La técnica de extracción de iones metálicos con EDTA proporciona una herramienta poderosa para definir la extensión y origen de la oxidación de los minerales de interés en los circuitos de flotación, además de identificar al mineral más reactivo, en dónde y que parámetros afectan su oxidación; información que ayuda en la optimización de los procesos.

- Inventario de la calidad del agua.

Para determinar la influencia de la calidad del agua sobre el proceso es necesaria la realización de un inventario de la calidad del agua, el cual consiste de un balance de agua para evaluar las proporciones de cada una de las corrientes de agua que participan en las plantas, así como de un muestreo para la evaluación de las especies presentes en las corrientes. El muestreo se

realiza siguiendo procedimientos (Norma Mexicana NMX-AA-003, 004, 007, 008, 051 y 058) que aseguran el filtrado de partículas coloidales suspendidas, la conservación de las especies metálicas en la solución (e.g., adicionando  $\text{HNO}_3$  a  $\text{pH}<2$ ) y la conservación de las especies no metálicas en la solución ( $\text{CO}_3$ ,  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{CN}$ ,  $\text{Cu}(\text{CN})_x$ ), adicionando  $\text{NaOH}$  a  $\text{pH}>10$ . Las muestras se mantienen en refrigeración hasta ser analizadas. Procedimiento sobre muestreo de aguas en el apéndice A.

Para cada corriente se considerará su grado de acidez ó de alcalinidad y los iones presentes ( $\text{Pb}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{CN}^-$ ,  $\text{SDT}$ ,  $\text{SS}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$ ), y cuáles de ellos pueden tener impacto en los resultados de la flotación. El efecto de las diferentes calidades de agua será evaluado con pruebas en el laboratorio en paralelo con los resultados obtenidos del muestreo.

- Muestreos detallados de la planta.

El muestreo en planta se realiza con el fin de obtener una descripción de la situación actual en la que se encuentra la operación de la planta y de la calidad de los productos. Del muestreo se obtiene información de la eficiencia de los bancos de flotación, el perfil de los grados y recuperaciones obtenidos en los bancos, cinéticas de flotación de los diferentes minerales en los bancos de flotación, cargas circulantes, tanto de mineral de valor como de contaminantes, recuperaciones a diferentes fracciones de tamaño, se miden los efectos de cambios realizados al circuito (diferentes reactivos ó un medio molidor diferente), porcentaje de sólidos y muestras para estudios mineralógicos. Con el muestreo se obtiene una “fotografía” de las condiciones de operación existentes. Detalles de la realización del muestreo en la planta en nuestro estudio se comentan en la sección 4.3.

- Pruebas de flotación en el laboratorio.

Las pruebas en el laboratorio se realizan para evaluar la respuesta a la flotación de los diferentes tipos de minerales, de los reactivos y de cambios en el diagrama de flujo de la flotación. Las pruebas también pueden ser usadas para desarrollar nuevas técnicas ó nuevos procedimientos. En nuestro estudio, se realizaron 35 series de pruebas, con el objetivo de investigar el efecto de la química de la pulpa y evaluar el comportamiento de la flotación ante diferentes tipos de calidades de agua. Detalles de las pruebas de laboratorio realizadas en la investigación se comentan en la sección 4.5.

## 4.2. Estudio de la calidad del agua.

En la presente sección se describe cómo se realizaron los balances de agua y los muestreos de agua para la planta 2.

### 4.2.1. Balance de agua en las plantas concentradoras de Sabinas.

Para desarrollar el balance de las aguas fue necesario elaborar los diagramas de flujo de las aguas para las dos plantas, obtener información de los consumos y posteriormente elaborar los balances de agua para cada planta y por último efectuar un balance de agua global.

### 4.2.2. Muestreo de agua.

En base a los suministros de agua que abastecen a la planta 2 se diseñó un esquema para el muestreo de las aguas. Las corrientes de agua que se eligieron para hacer el muestreo se presentan en la Figura 4.2.1.

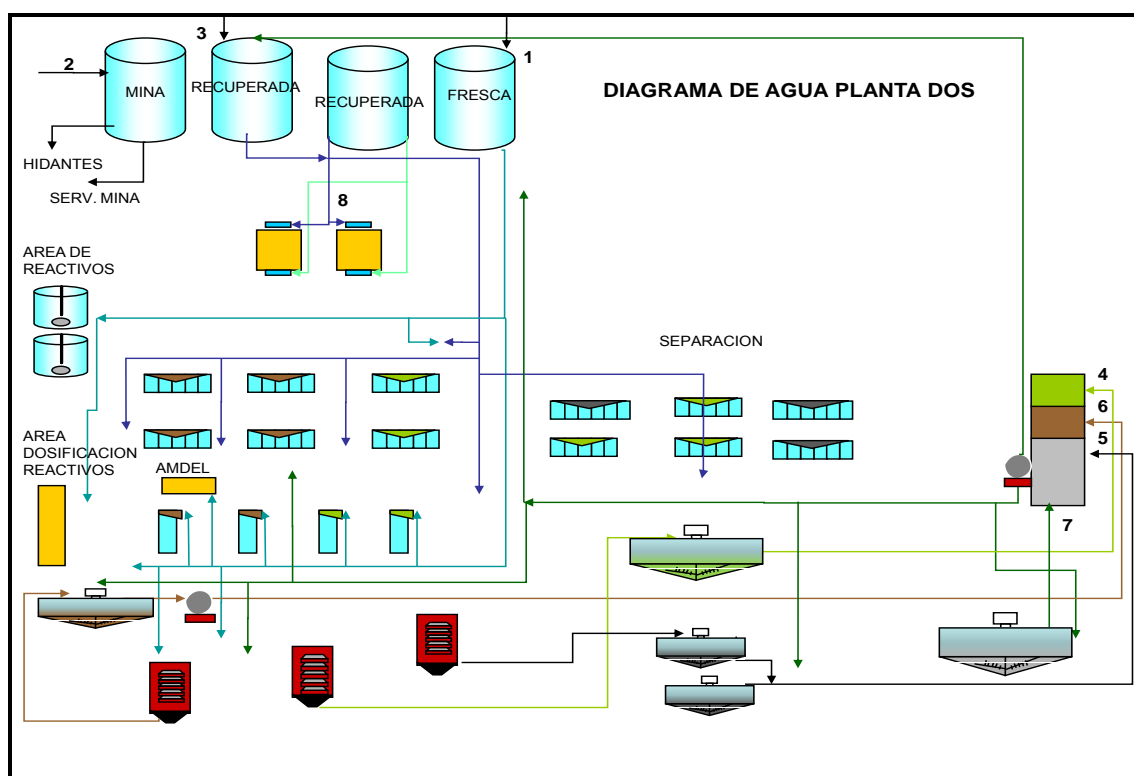


Figura 4.2.1. Distribución de aguas de la Planta 2. Los colores identifican los suministros de agua a cada área. Los números identifican los puntos de donde se obtuvieron las muestras de agua. 1. Agua vergel. 2. Agua mina. 3. Agua recuperada de presa 3. 4. Agua recuperada del espesador de cobre. 5. Agua recuperada del espesador de plomo. 6. Agua recuperada del espesador de zinc. 7. Agua recuperada del espesador de colas. 8. Agua alimentada a molinos (Las primeras 2 aguas son nuevas y las demás son proceso). El agua que se recupera de los espesadores se envía a dos áreas: A los tanques de agua recuperada y directamente a la Planta 2 a las áreas de molinos, flotación y espesamiento (servicios).

Las muestras obtenidas se enviaron al laboratorio para determinarles sus contenidos de Pb, Cu, Zn, Fe, Ag, Mg, Ca,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CN}^-$ , sólidos suspendidos y sólidos disueltos totales. Además se determinó el valor de su pH. Se enviaron dos muestras de cada flujo, una para determinar los elementos metálicos (Pb, Cu, Zn, Fe, Ag, Mg, Ca) y otra para determinar las especies no metálicas ( $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CN}^-$ ); además, para la corriente del agua que se alimenta a los molinos, se preparó otra muestra para determinarle su contenido de  $\text{CN}^-$ . Los muestreos de agua se realizaron de agosto 2008 a julio 2009. La tabla 4.2.1 describe los muestreos que se realizaron durante el estudio.

Los procedimientos para la realización de los muestreos y para la preparación de las muestras se presentan en el apéndice A.

Mes de muestreo.	Ago	Oct	Mar	Abr	May	Jun	Jul
Número de muestras enviadas para analizar iones metálicos (Pb, Cu, Zn, Fe, Ag, Mg, Ca).	8	8	8	8*	8*	8*	8*
Número de muestras enviadas para analizar especies no metálicas ( $\text{CO}_3^{2-}$ , $\text{HCO}_3^-$ , Sólidos disueltos, sólidos suspendidos).	8	8	8	8*	8*	8*	8*
Número de muestras enviadas para analizar cianuro	4	4	4	4*	4*	4*	4*

Tabla 4.2.1. Muestras enviadas a análisis químico. Los números que se presentan con un asterisco (\*) nos indican que en esos meses se le analizó el cobre y el cianuro a las corrientes del espesador de cobre, del espesador de colas, al agua recuperada de la presa 3 y en el agua que se alimenta los molinos.

Ajustes en el muestreo de agua. En las aguas recuperadas se observaron variaciones en la concentración de Cu, para los meses anteriores al mes de Abril, al compararse la concentración de Cu se observó una gran diferencia. Debido a esta diferencia y para verificar la certeza de los resultados obtenidos se realizaron algunos cambios en el análisis de muestras y en el número de muestras. En el análisis de muestra se mando ensayar el contenido de Cu en las aguas que se preparaban para determinar los elementos no metálicos, para las corrientes de aguas recuperadas del espesador de cobre, agua recuperada de la Presa 3 y en el agua recuperada del espesador de colas; además, para estas mismas corrientes se preparó otra muestra para determinarle su contenido de  $\text{CN}^-$ . Lo anterior se presentó en la Tabla 4.2.1.

### 4.3. Muestreo en la planta.

El muestreo en la planta se realizó a los circuitos de molienda y cobre. Los puntos de muestreo se presentan en la Tabla 4.3.1 y en las Figuras 4.3.1 y 4.3.2:

Puntos de muestreo en circuito de molienda	Puntos de muestreo en circuito de cobre
Cabeza de alimentación al molino.	Cabeza de alimentación a circuito de cobre.
Descarga del molino 1	Concentrado del primer primario de cobre.
Descarga de arenas del ciclón del molino 1.	Cola del primer primario de cobre.
Descarga de finos del ciclón del molino 1.	Concentrado del segundo primario de cobre.
Descarga de molino 2.	Cola segundo primario de cobre.
Descarga de arenas del ciclón del molino 2.	Concentrado del agotativo de cobre.
Descarga de finos del ciclón del molino 2.	Cola agotativo de cobre.
	Concentrado primera limpia de cobre.
	Cola primera limpia de cobre.
	Concentrado columna uno de cobre.
	Cola columna uno de cobre.
	Concentrado columna dos de cobre.
	Cola columna dos de cobre.
	Cabeza de tercera limpia plomo-cobre.
	Concentrado tercera limpia
	Cola tercera limpia.
	Concentrado primario de plomo.
	Colas primario plomo.
	Concentrado primera limpia de plomo
	Cola primera limpia plomo.

Tabla 4.3.1. Puntos de muestreo en los circuitos de molienda y flotación de cobre.

Para la realización del muestreo se siguieron los procedimientos para el muestreo del circuito de molienda de Planta 2 y muestreo del circuito de flotación de Plantas; incluidos en el apéndice A.

Para nuestro estudio los muestreos se realizaron en los circuitos de molienda y flotación. Estos muestreos incluyen mediciones de los parámetros que definen la química de la pulpa (T, pH, Eh, OD, DOD, metales oxidados). Durante la molienda y las primeras etapas de la flotación es en donde ocurren más cambios en las superficies de las partículas y durante el muestreo se seleccionan los puntos adecuados para monitorear dichos cambios. Por ejemplo en la descarga del molino, los finos del ciclón, la alimentación y descarga de los tanque acondicionadores, y las cabezas y colas de los primeros bancos de flotación. Se emplea medidor con electrodos (la descripción del medidor y electrodos utilizados en el muestreo se presentan en la sección 4.4), previamente calibrados con soluciones estándar y procedimientos estandarizados para medir la demanda de oxígeno disuelto (DOD) y la cantidad de metales oxidados (extracción con EDTA). Las muestras se almacenaron hasta el final del proyecto para poder realizar re-chequeos, si fueran

necesarios. (Ver procedimientos en apéndice A). Los diagramas de las Figuras 4.3.1 y 4.3.2 muestran los puntos de muestreo.

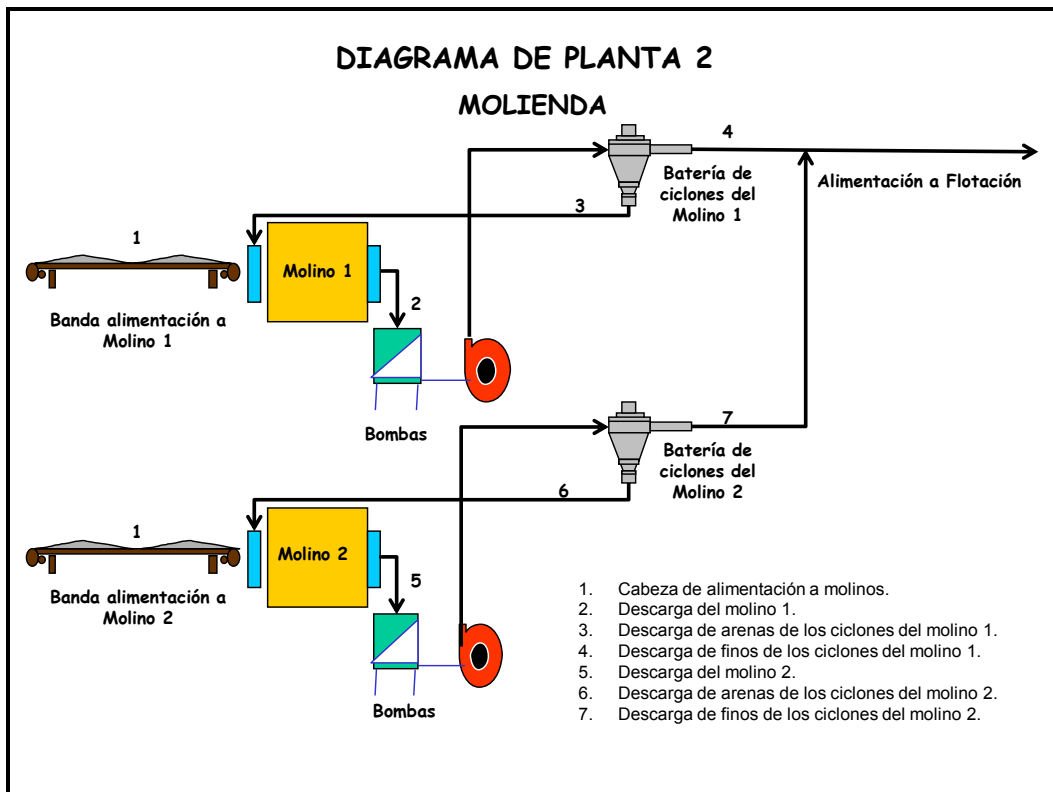


Figura 4.3.1. Diagrama de puntos de muestreo en el circuito de molienda.

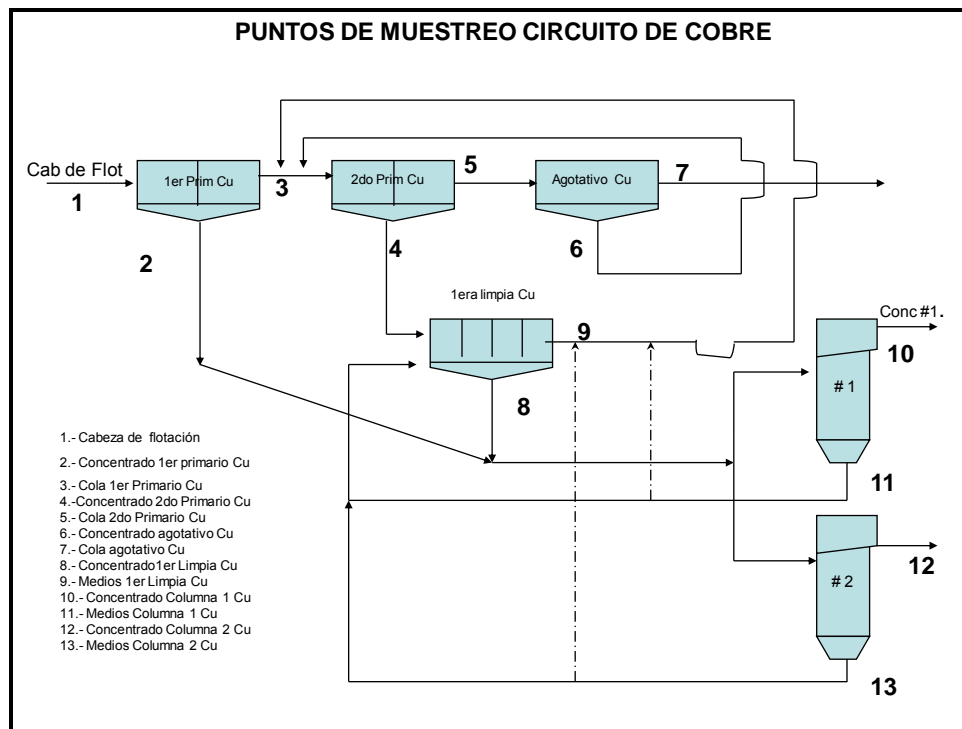


Figura 4.3.2. Diagrama de puntos de muestreo para el circuito de cobre en la planta 2.



Los datos obtenidos en el muestreo se procesan y se asegura de que se cumplan los balances de materia. Los datos se procesan / ajustan en un software distribuido por la empresa Algosys llamado MatBal (de las abreviaciones del inglés **Material Balance**; que minimiza el error mediante la metodología de mínimos cuadrados), el cual ayuda a detectar posibles errores en la toma de muestras o en los resultados de los ensayos, al comparar las variaciones entre los valores observados y los valores calculados. La información obtenida a partir de los balances de materia, sirven para diagnosticar la operación de los circuitos y poder tomar acciones de mejora.

#### 4.4. Mediciones para la química de la pulpa.

Para el estudio de química de la pulpa se midió el Potencial de Hidrógeno (pH), Potencial Oxido-Reducción ( $E_h$ ), Oxígeno Disuelto (OD), Demanda de Oxígeno Disuelto (DOD), la Temperatura (T) y los iones extraídos mediante EDTA de las corrientes que se presentan en la Tabla 4.4.1:

Puntos de muestreo en circuito de molienda	Puntos de muestreo en circuito de cobre
Cabeza de alimentación al molino.	Cabeza de alimentación a circuito de cobre.
Descarga del molino 1	Cola del primer primario de cobre.
Descarga de arenas del ciclón del molino 1.	Cola segundo primario de cobre.
Descarga de finos del ciclón del molino 1.	Cola agotativo de cobre.
Descarga de molino 2.	
Descarga de arenas del ciclón del molino 2.	
Descarga de finos del ciclón del molino 2.	

Tabla 4.4.1. Puntos de muestreo en los circuitos de molienda y flotación de cobre para la medición de la química de la pulpa.

Los procedimientos que se emplearon para llevar a cabo la medición de los diferentes parámetros, fueron los utilizados por el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CIDT) de Peñoles, incluidos en el apéndice A.

Describiendo brevemente el procedimiento, se corta una muestra de pulpa de una de las corrientes de interés, y se vierte dentro de un vaso de precipitados. La muestra se mezcla suavemente con los electrodos en el vaso de precipitados por dos minutos manteniendo los sólidos suspendidos, las lecturas de  $E_h$ , pH, oxígeno disuelto y temperatura con un medidor TPS modelo 90-FLMV y dichas mediciones fueron descargadas a una computadora laptop para el manejo de la información.

De manera particular para nuestro equipo y electrodos se hizo la calibración de la siguiente manera:

El  $E_h$  fue medido usando un electrodo combinado. El electrodo sensible es de platino y el electrodo de referencia es plata/cloruro de plata saturado con KCl; antes de su uso el electrodo fue calibrado usando una solución Zobell (1:1 solución del parte A y B) para dar 220 mV a una temperatura de 23°C y todos los valores de  $E_h$  fueron referidos al electrodo estándar de hidrógeno.

El pH fue medido usando un electrodo combinado con un electrodo de vidrio y fue calibrado usando soluciones búfer con estándar de 10 y 7.

El contenido de oxígeno disuelto en la pulpa se midió usando un electrodo polarográfico tipo Clark. El instrumento fue calibrado en una solución constituida por 100 mL de agua destilada y 2 g de sulfito de sodio para la calibración a cero mg de oxígeno disuelto por litro. Para la calibración en aire solo se deja que se establezca la lectura y se acepta.

Para las mediciones de la temperatura se utilizó un potenciómetro TPS. El potenciómetro se calibró usando un termómetro de mercurio como referencia; para el primer punto se utilizó un vaso de precipitados con agua a temperatura ambiente, donde se agitaron ambos medidores, una vez estabilizada la temperatura de ambos se comparan y se ingresa en el medidor la que tiene el termómetro de mercurio; para el segundo punto de calibración se utilizó un litro de agua con 10°C más a la temperatura ambiente, se agitaron ambos medidores, una vez estabilizada la temperatura de ambos se comparan y se ingresa al medidor la temperatura del termómetro de mercurio.

Para los iones extractables con EDTA se tomó la muestra para cada una de las corrientes antes descritas y se depositó en un frasco. Posteriormente se preparó según procedimiento proporcionado por Magotteaux, incluido en el apéndice A.

#### **4.5. Pruebas en el laboratorio.**

##### **4.5.1. Muestra.**

La muestra que se empleó para realizar las pruebas de laboratorio se tomó de las bandas que alimentan a los molinos, al final del muestreo que se realizó en la planta. Se tomaron alrededor de 200 kg de muestra. La cantidad de muestra necesaria para la ejecución de las pruebas fue preparada de acuerdo al procedimiento preparación de muestras a granel, incluido en el apéndice A. Cuando se terminó de preparar la muestra, esta se almacenó en un refrigerador con el fin de evitar su oxidación. Una porción de la muestra se preparó para enviarla a ensaye y obtener los valores de la cabeza del mineral empleado en las pruebas.

La composición química del mineral utilizado para la realización de las pruebas se presenta en la Tabla 4.5.1.

<b>Muestra</b>	<b>Ag(g/ton)</b>	<b>Pb (%)</b>	<b>Zn (%)</b>	<b>Cu (%)</b>	<b>Fe (%)</b>
Cabeza	64.38	0.04	1.47	0.67	6.8

Tabla 4.5.1. Presenta los ensayos de cabeza de la muestra empleada en las pruebas de laboratorio.

#### **4.5.2. Descripción de pruebas en el laboratorio.**

La molienda en el laboratorio generalmente se realiza en recipientes cilíndricos rotatorios de acero que se conocen como molinos de rodamiento de carga, los que contienen una carga suelta de cuerpos de molienda, el medio de molienda, libre para moverse dentro del molino y pulverizar así las partículas del mineral. El medio de molienda puede ser: bolas o barras de acero. En este tipo de molinos el propósito es ejercer un estrecho control sobre el tamaño del producto que garantice una liberación adecuada del mineral, similar o muy cercana a la que se obtiene en la planta, pero tiene la desventaja de no conocer las condiciones químicas de la pulpa, las cuales son también importantes en los procesos de separación de minerales.

Para nuestras pruebas se utilizó un molino diseñado por Magotteaux (Ver Figura 4.5.1), el cual tiene la capacidad de producir la liberación y tamaño de partícula muy similar al obtenido en planta, además tiene la ventaja de controlar y monitorear las variables de la química de la pulpa; en otras palabras, reproduce en el laboratorio las condiciones de la planta (Greet y colaboradores, 2005b).

El molino Magotteaux para el laboratorio tiene la capacidad de regular y controlar los siguientes parámetros:

- Variación de la velocidad del molino.
- Controlar la temperatura.
- Controlar la química de la pulpa durante la molienda.
- Inyección de gases.
- Adición de reactivos.
- Monitoreo continuo del sistema durante la molienda.

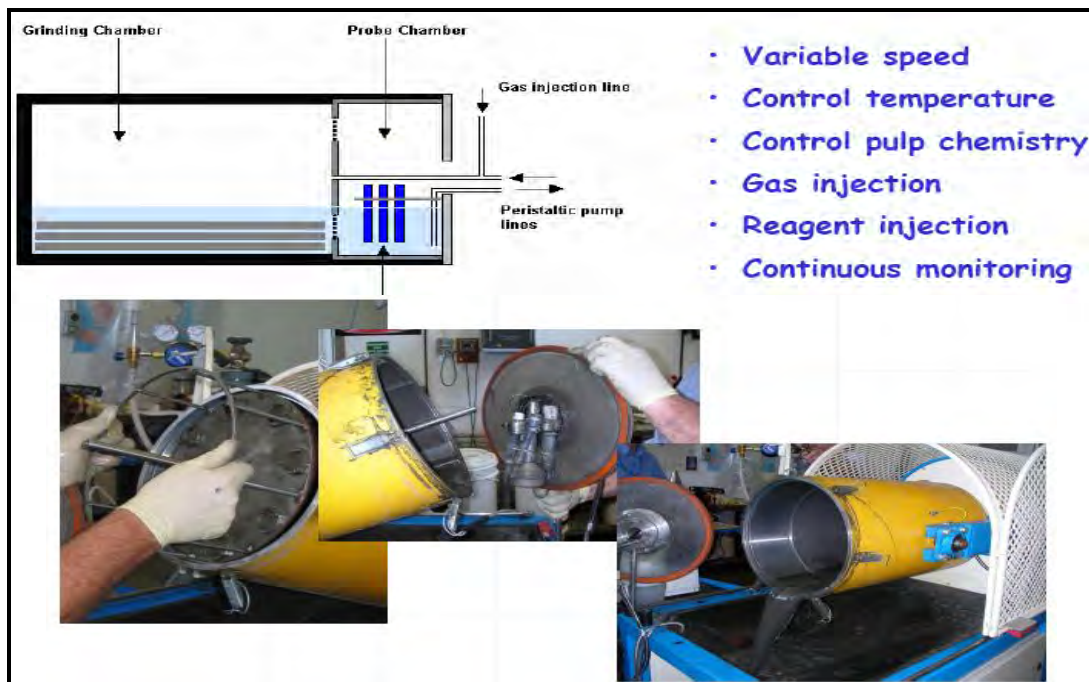


Figura 4.5.1. Molino Magotteaux empleado para las pruebas del laboratorio (Greet, 2007).

Para nuestra investigación se realizaron un total de 35 pruebas, las cuales se llevaron a cabo en 4 etapas. En todas las etapas la variable principal fue el agua. La Tabla 4.5.2 presenta un resumen de las pruebas.

Para la realización de las pruebas primero se colectó la muestra de la alimentación a la planta (la muestra se colectó al mismo tiempo que se realizó un muestreo en la planta) y se preparó para la realización de las pruebas en el laboratorio. Después con la muestra colectada se calibró el molino Magotteaux, los medios de molienda que se emplearon fueron barras de acero de alto cromo, con el fin de simular a los medios de molienda que actualmente utilizan los molinos de la planta. La calibración del molino se realizó con el fin de obtener un producto con la misma distribución de tamaño que el sobreflujo del ciclón, así como las condiciones químicas de la pulpa de la descarga de la molienda a la flotación.

Las pruebas de molienda permitieron la medición en línea de: pH,  $E_h$ , OD, T con un medidor TPS modelo 90-FLMV (mismo que se usó para mediciones al momento de hacer el muestreo en la planta), y a partir de los valores de las variables se controla la operación del molino con el fin de reproducir las condiciones de la planta. Los parámetros de cada una de las variables se obtuvieron del muestro en la planta y se cargaron a un software que está incluido como complemento del molino.

Las pruebas en el molino se realizaron de la siguiente manera:

Se colocaron 3 kg de mineral con 2 L de agua, además se le adicionó colectores S-8222 (Diisopropil-ditiofosfato de sodio) y A-3418 (Diisobutil-ditiofosfinato de sodio), y sulfato de zinc a una concentración del 10%.

En la Tabla 4.5.2 se presentan los esquemas y las diferentes dosificaciones de reactivos que se trabajaron en cada una de las cuatro etapas de las pruebas.

Etapa de investigación	Tipos de agua	Reactivos	Molienda	Circuito Cu
1	Proceso 1 Proceso 2 Proceso 3	ZnSO <sub>4</sub> (g/Ton) A-8222 (g/Ton) A-3418 (g/Ton) CC-574 (g/Ton) pH Tiempo (min)	560 13 5.5  18	4 5.5 28.5 8.5 6
2	Potable Vergel Noria Mina Presa 3 Piletas Alimentación a molinos Dilución a molinos	ZnSO <sub>4</sub> (g/Ton) A-8222 (g/Ton) A-3418 (g/Ton) CC-574 (g/Ton) pH Tiempo (min)	560 13 5.5  18	4 5.5 28.5 8.5 6
3	Potable Vergel Alimentación a molinos Tratada Tratada in situ	ZnSO <sub>4</sub> (g/Ton) A-8222 (g/Ton) A-3418 (g/Ton) CC-574 (g/Ton) pH Tiempo (min)	560 1.42   18	1.42 3.61 16.28 8.5 6
4	Potable Vergel Alimentación a molinos Tratada Tratada in situ	ZnSO <sub>4</sub> (g/Ton) A-8222 (g/Ton) A-3418 (g/Ton) CC-574 (g/Ton) pH Tiempo (min)	747 1.42   18	1.42 3.61 16.28 8.5 6

Tabla 4.5.2. Número de etapas que cubrió el estudio, los tipos de aguas que se utilizaron en cada etapa, así como el esquema de reactivos de cada una de ellas. El agua potable se propuso como agua de referencia. La mayoría de las pruebas para cada agua se hicieron por duplicado, a excepción del agua empleada en la primera etapa.

Cuando el molino se pone en operación, comienza con una velocidad de 10 rpm para el acondicionamiento de la muestra por un espacio de 3 min. Posteriormente, cuando comienza la molienda, el molino alcanza la velocidad

definitiva en base a la calibración que se obtuvo y así permanece el tiempo de operación, el cual también se obtuvo durante la calibración.

Después de la molienda se toma una porción de muestra, la cual se acondiciona con EDTA para la extracción de iones y la solución de extracción se prepara y envía a ensayar.

La pulpa obtenida de la molienda fue vaciada en una celda de 5 L. Antes de comenzar la flotación se le tomaron las lecturas de los parámetros de química de la pulpa con el medidor TPS modelo 90-FLMV y se agregaron los colectores S-8222 y A-3418, y el espumante CC-574 (Metilisobutilcarbinol). Las dosificaciones se reportan en las Tablas 4.5.2 para cada una de las cuatro etapas de la pruebas.

Para el circuito Cu/Pb se obtuvieron 7 concentrados en los siguientes tiempos: 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0 y 6.0 minutos. Cada concentrado se obtuvo de manera manual, arrastrando la espuma de la superficie de la celda, manteniendo un espacio de 10 segundos entre cada toma de muestra.

Los concentrados obtenidos se prepararon y se enviaron a ensayar junto con las colas finales de las pruebas.

A continuación en la Figura 4.5.2 se presenta un diagrama que muestra el proceso empleado en la realización de las pruebas de molienda y flotación.

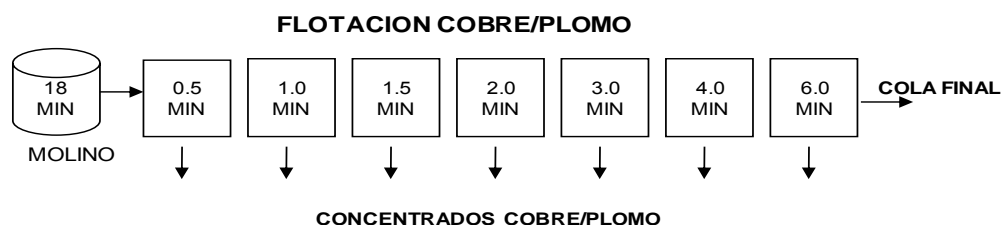


Figura 4.5.2. Diagrama que muestra el esquema de la realización de las pruebas en el laboratorio.

Para el análisis de resultados se realizaron balances metalúrgicos, se hicieron conversiones de elementos a especies minerales (ver apéndice B). Los resultados proporcionados por los cálculos realizados se representarán en gráficas grado contra recuperación y de selectividad.

### 4.5.3. Otras pruebas.

En la búsqueda de técnicas que describen la oxidación de los minerales, se encontraron dos procedimientos de la técnica de extracción de especies oxidadas con EDTA, uno nos permite conocer el grado de oxidación de los sulfuros minerales de un cuerpo mineral y otro nos permite conocer los sulfuros minerales oxidados en la superficie de las partículas minerales en una pulpa

(Rumball y Richmond, 1996). Ambos procedimientos se incluyen en el apéndice A.

El segundo procedimiento es el que se ha estado mencionando en las secciones anteriores. El procedimiento para conocer la oxidación total del mineral también se realizó en este estudio. El procedimiento se aplicó a la cabeza del mineral que se empleó en todas las pruebas realizadas para el estudio del agua.

Otras pruebas que se realizaron en esta investigación fueron con el agua que se alimenta a los molinos, para conocer la cantidad de carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) necesario para reducir considerablemente la concentración de Ca en el agua que se alimenta a los molinos. Cada prueba consistió en tomar una muestra de agua (2 L), agregarle  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (diferentes dosificaciones) y agitar por 15 min. Posteriormente se filtra la solución y enviar a ensaye.

## **CAPÍTULO 5**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos durante el desarrollo de este proyecto. El capítulo se divide en tres secciones. En la primera sección se presentan los resultados de los estudios de la calidad del agua, en la segunda se presentan los resultados de la química de la pulpa mediante muestreos realizados en la planta 2 y en la tercera sección se presentan los resultados de la química de la pulpa mediante pruebas realizadas en el laboratorio.

#### **5.1. Resultados del estudio de la calidad del agua.**

El propósito de conocer la calidad del agua que ingresa al proceso, es para identificar las especies que se encuentran presentes en las corrientes de agua que abastecen a la planta, así como conocer en que proporciones lo hacen. Esta información nos servirá de apoyo para determinar posteriormente con las pruebas de laboratorio, que especies afectan los resultados.

En esta sección primero se presentan los balances de agua de plantas 1 y 2, y un balance global; posteriormente se presentan los resultados de los muestreos de agua realizados.

##### **5.1.1. Balances de aguas.**

El balance de agua de las plantas concentradoras estuvo basado en los datos obtenidos de los consumos de agua fresca (medidores de flujos para agua del Vergel y de la Noria) y de agua recirculada (medidores de flujo para agua recuperada de piletas). El agua fresca que entra a las plantas está compuesta por el agua del vergel, de la noria y del bombeo de mina. El agua recirculada que entra a las plantas se compone del agua que se bombea de la sección 3 de la Presa de jales, la que se bombea de la sección 2 de Presa de jales y de las piletas de agua recuperada de los espesadores. Los balances para cada planta y para ambas plantas se presentan en los diagramas de las Figuras 5.1.1 y 5.1.2:



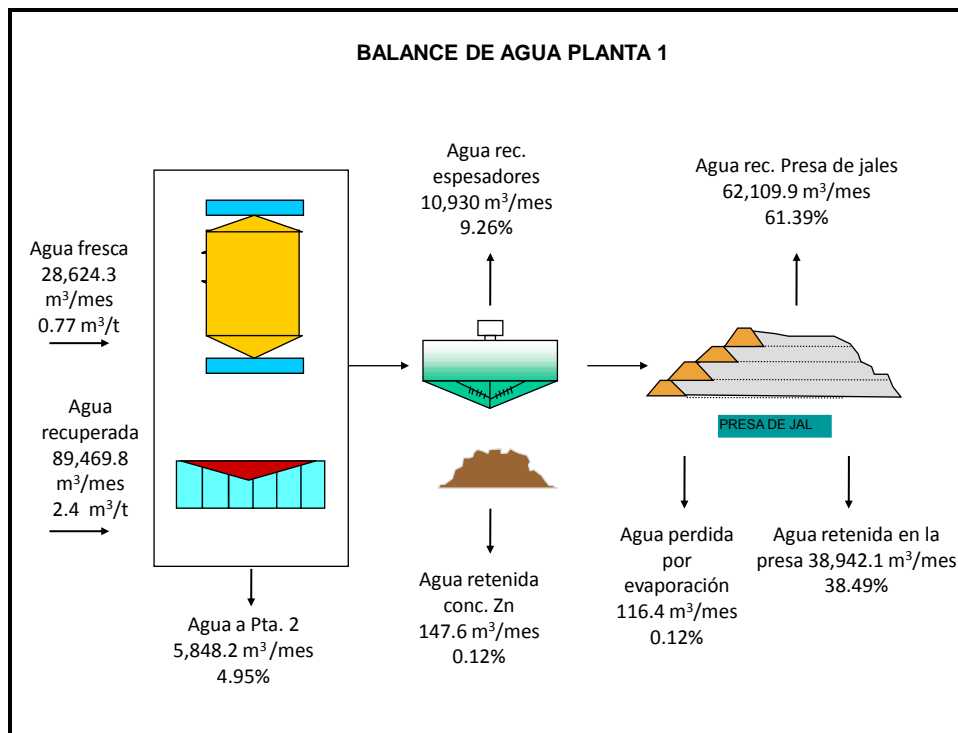


Figura 5.1.1. Balance de agua de la Planta 1, muestra las corrientes principales de entradas y salidas de agua, con los respectivos valores de los flujos mensuales.

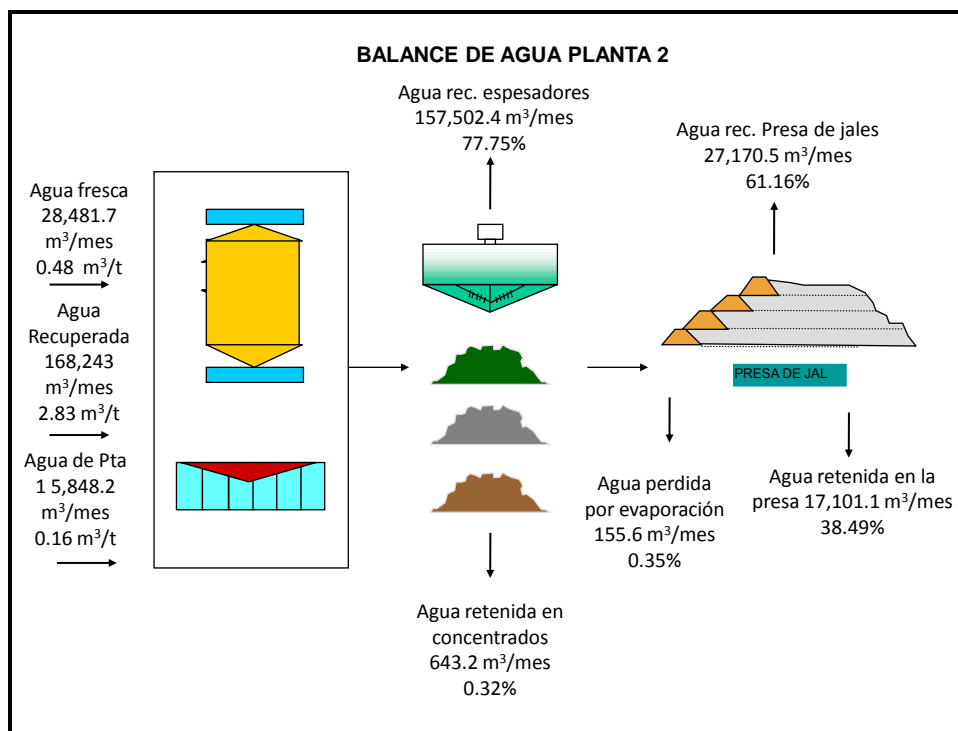


Figura 5.1.2. Balance de agua de la Planta 2, muestra las corrientes principales de entradas y salidas de agua, con los respectivos valores de los flujos mensuales.

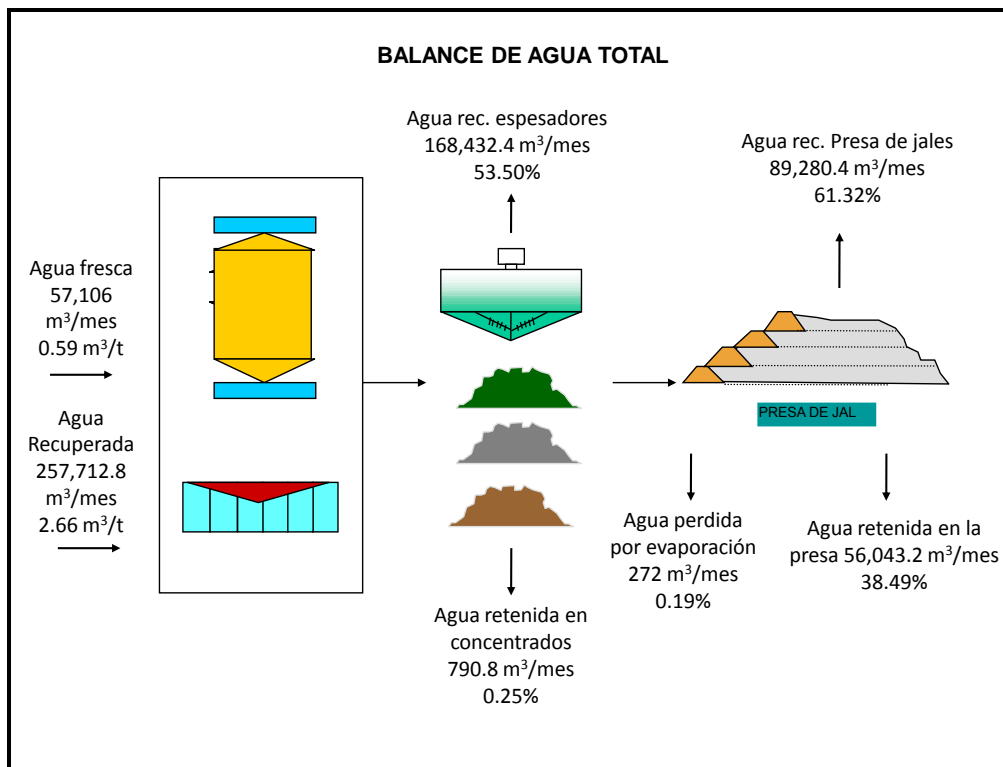


Figura 5.1.3. Balance de agua global, en donde se representan las corrientes principales de entradas y salidas de agua a las plantas, con sus respectivos valores de los flujos mensuales.

De los resultados obtenidos en cada uno de los balances, se obtiene la distribución de consumos de cada planta y global de las dos plantas. La tabla 5.1.1 y la Figura 5.1.4, muestran estas distribuciones.

Distribución de consumo de agua en Unidad Sabinas.					
Plantas	Fresca [m3/t]	Recuperada [m3/t]	Fresca [%]	Recuperada [%]	Total [%]
Planta 1	0.77	2.4	24.29	75.71	100
Planta 2	0.48	2.83	14.50	85.50	100
Global	0.59	2.66	18.15	81.85	100

Tabla 5.1.1. Distribución de los consumos de agua por planta y global.

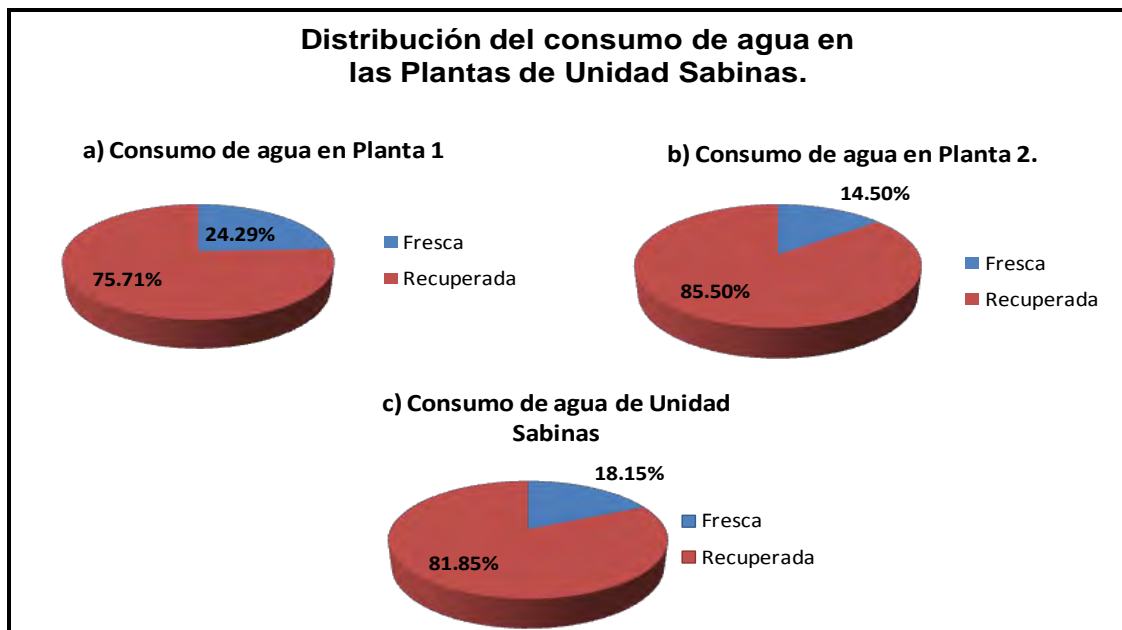


Figura 5.1.4 Distribución de los consumos de agua fresca y recuperada en Unidad Sabinas. a) Distribución del consumo de agua en la Planta 1. b) Distribución del consumo de agua en la Planta 2. c) Distribución del consumo de agua en las Plantas de Unidad Sabinas.

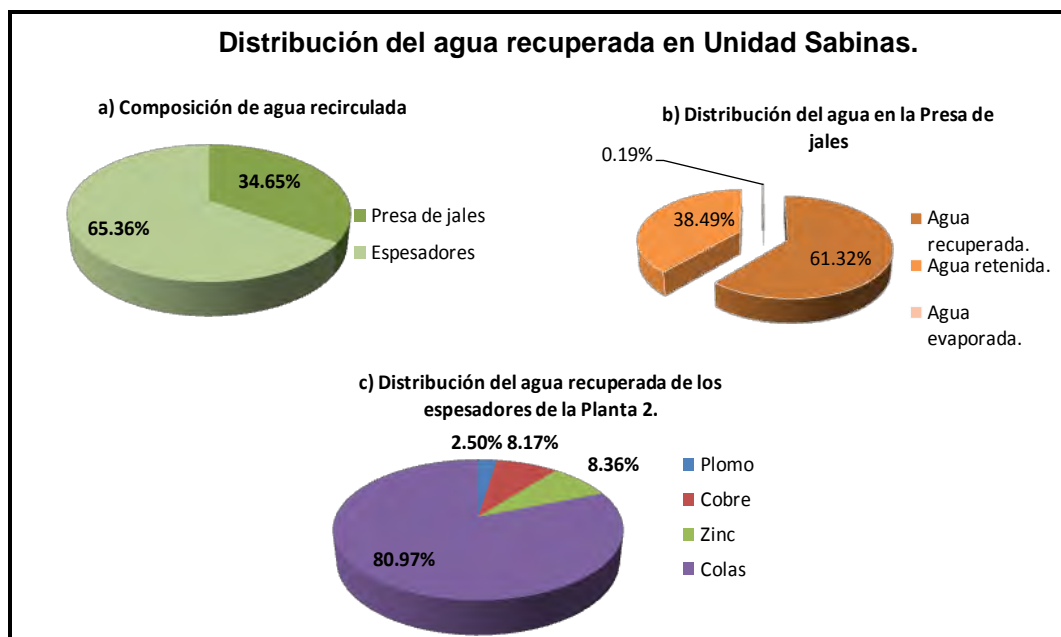


Figura 5.1.5. Distribución del agua recuperada de Unidad Sabinas. a) Proporción con que contribuyen la Presa de jales y los espesadores en la obtención del agua recirculada para las Plantas concentradoras de Sabinas. b) Distribución de agua que se descarga en la Presa de jales. c) Proporción en que se recupera el agua de cada espesador en la Planta 2, con respecto al total de agua recuperada de los espesadores.

Como se muestra en la Tabla 5.1.1, el consumo total de agua fresca por cada tonelada de mineral procesado es de  $0.59 \text{ m}^3/\text{t}$  y de agua recuperada de  $2.66 \text{ m}^3/\text{t}$ , resultando un total de agua consumida para el proceso de  $3.25 \text{ m}^3/\text{t}$ . Cabe mencionar que la mayor cantidad de agua que es consumida por el proceso es agua recirculada y de ahí se deriva su importancia en el proceso.

Con respecto al agua recirculada (Figura 5.1.5 a) y a los balances de agua, observamos que del volumen total de agua recuperada, el 65.36% es agua recuperada de los espesadores y el 34.64% proviene de la presa de jales. Por esa razón, durante el proyecto se realizó un seguimiento especial al agua recuperada de cada uno de los espesadores de la Planta 2. Los resultados de esta acción se muestran en la siguiente sección.

Respecto al agua recuperada de la Presa de jales, en la Figura 5.1.5 b); observamos que del agua total que ingresa a ella corresponde al 46.24% del agua total que ingresa al proceso y de ese volumen se recupera el 61.32%, lo que significa que la presa de jales tiene un nivel aceptable de recuperación de agua.

La Figura 5.1.5 c), nos muestra la recuperación de agua de cada espesador de la Planta 2.

Nuestro estudio se enfocó a determinar el efecto de la calidad agua en el proceso de flotación para el circuito de cobre en la Planta 2, ya que desde un punto de vista de flotación, dicho circuito es más sensible a las características del agua y parámetros de la pulpa. Es conveniente hacer un par de comentarios adicionales:

- En la distribución de las aguas se observa, que parte del agua consumida por la Planta 2, proviene de la Planta 1 e ingresa en el circuito de separación; esta agua es recuperada en los espesadores de concentrados de plomo y de cobre. Lo anterior se marca en el balance de agua de la Planta 1 (Figura 5.1.1).
- Del total de agua recuperada de los espesadores en Planta 2, el 93.53% ingresa nuevamente al proceso (principalmente en el área de molinos), antes de que este volumen de agua llegue a los tanques de agua recuperada. Esta situación, como lo veremos más adelante en los resultados de las pruebas de laboratorio, causa mucha variabilidad en el pH del agua de proceso (con una tendencia alcalina) manifestándose turno a turno y día con día afectando por consecuencia el control del proceso así como los resultados de la operación.

La variabilidad en el pH y su tendencia alcalina presumiblemente se debe a la contribución de las aguas recuperadas de los espesadores de zinc y de colas

finales (como veremos en los resultados de los muestreos tienen un pH alcalino), ya que al consumirse más cal de la necesaria en el circuito de zinc aumenta el valor de pH del agua que se recupera en estos espesadores. Esto causa que la porción de agua que ingresa nuevamente al proceso (a los molinos) vaya ligeramente alcalinizada. Del agua total recuperada de los espesadores en la Planta 2, el 89.14% corresponde al agua que se recupera de los espesadores de zinc y de colas finales.

Para mayor apoyo a lo comentado en esta sección, a continuación se presentarán y discutirán los resultados obtenidos de los muestreos realizados a las diferentes aguas.

**5.1.2. Análisis de los muestreos de aguas.**

En esta sección se presentan las tablas y las gráficas que muestran los resultados del análisis químico de cada una de las corrientes y se discuten los resultados.

La Tabla 5.1.2, presenta una relación del nombre de la corriente, especies analizadas y el tipo de agua al que pertenece cada corriente. Los procedimientos para la preparación de muestras están en el apéndice A. En la Tabla 5.1.3, se presentan los valores promedio de las concentraciones de las especies analizadas, así como su desviación estándar y su variabilidad en cada corriente. Las gráficas que muestran los resultados del análisis químico de cada una de las corrientes se muestran en el apéndice D.

<b>Nombre de la corriente</b>	<b>Tipo de agua</b>	<b>Especies analizadas.</b>
Vergel	Fresca	Pb, Cu, Zn, Fe, Ca, Mg, SO <sub>4</sub> , CO <sub>3</sub> , HCO <sub>3</sub> , SS y STD
Mina	Fresca	
Espesador de Pb	Recuperada	
Espesador de Zn	Recuperada	
Espesador de Cu	Recuperada	Pb, Cu, Zn, Fe, Ca, Mg, SO <sub>4</sub> , CO <sub>3</sub> , HCO <sub>3</sub> , CN, SS y STD
Espesador de Colas	Recuperada	
Presa 3	Recuperada	
Alimentación a molino	Proceso	

Tabla 5.1.2. Relación de corrientes, tipos de aguas y especies analizadas, de los análisis químicos realizados durante los muestreos del proyecto.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Especies analizadas	Vergel			Mina			Agua recuperada de la Presa 3		
	Promedio [ppm]	Desviación estándar [ppm]	Variabilidad	Promedio [ppm]	Desviación estándar [ppm]	Variabilidad	Promedio [ppm]	Desviación estándar [ppm]	Variabilidad
Pb	0.07	0.12	1.65	0.09	0.16	1.77	0.05	0.05	1.04
Cu	0.03	0.04	1.15	0.11	0.20	1.76	5.85	7.51	1.28
Zn	0.24	0.18	0.73	1.17	0.71	0.61	0.29	0.13	0.43
Fe	0.34	0.43	1.27	0.83	0.99	1.19	0.67	0.91	1.36
Ca	68.61	17.89	0.26	679.73	89.42	0.13	641.64	107.20	0.17
Mg	4.02	1.47	0.36	19.76	5.86	0.30	11.71	6.38	0.54
SO4	40.25	24.99	0.62	1296.57	130.82	0.10	1496.69	249.40	0.17
CO3	2.94	8.66	2.94	0.00	0.00	0.00	4.66	10.64	2.28
HCO3	30.58	74.68	2.44	17.45	42.68	2.45	8.77	21.32	2.43
SS	7.43	3.66	0.49	35.43	21.98	0.62	34.57	34.65	1.00
STD	393.43	136.72	0.35	2762.00	344.71	0.12	3224.29	507.99	0.16
Comentarios	Agua pura, concentraciones bajas de los elementos analizados.			Agua con concentraciones considerables de Ca, SO4 y STD.			Agua con concentraciones considerables de Ca, SO4 y STD.		

Especies analizadas	Agua recuperada espesador de Pb			Agua recuperada espesador de Zn			Agua recuperada espesador de Colas		
	Promedio [ppm]	Desviación estándar [ppm]	Variabilidad	Promedio [ppm]	Desviación estándar [ppm]	Variabilidad	Promedio [ppm]	Desviación estándar [ppm]	Variabilidad
Pb	1.10	1.59	1.45	0.37	0.84	2.25	0.06	0.07	1.16
Cu	40.75	15.80	0.39	13.85	13.34	0.96	12.50	14.70	1.18
Zn	0.58	0.75	1.28	5.19	12.05	2.32	0.24	0.24	1.00
Fe	1.22	2.31	1.90	1.41	2.70	1.92	1.32	2.00	1.51
Ca	657.19	95.73	0.15	733.84	42.97	0.06	785.80	36.72	0.05
Mg	5.83	2.20	0.38	5.58	1.52	0.27	2.25	2.53	1.13
SO4	1655.79	313.38	0.19	1685.59	345.39	0.20	1803.10	377.59	0.21
CO3	6.80	10.39	1.53	2.94	5.81	1.97	46.28	39.25	0.85
HCO3	34.90	55.08	1.58	17.45	42.68	2.45	8.79	21.31	2.42
SS	427.14	662.14	1.55	578.29	760.46	1.32	166.00	159.35	0.96
STD	3662.29	475.62	0.13	3448.57	322.86	0.09	3786.86	458.13	0.12
Comentarios	Agua con concentraciones considerables de Cu, Ca, SO4, SS y STD.			Agua con concentraciones considerables de Ca, SO4, SS y STD.			Agua con concentraciones considerables de Ca, SO4 y STD.		

Especies analizadas	Agua recuperada espesador de Cu			Agua alimentada a los molinos.		
	Promedio [ppm]	Desviación estándar [ppm]	Variabilidad	Promedio [ppm]	Desviación estándar [ppm]	Variabilidad
Pb	0.53	1.11	2.08	0.28	0.57	2.05
Cu	86.85	35.94	0.41	18.38	14.29	0.78
Zn	1.88	2.45	1.30	12.19	16.55	1.36
Fe	0.92	1.54	1.67	0.85	1.11	1.31
Ca	711.60	72.81	0.10	709.20	75.87	0.11
Mg	5.93	2.84	0.48	8.16	4.01	0.49
SO4	1644.16	252.29	0.15	1706.64	347.66	0.20
CO3	2.51	4.41	1.75	3.93	8.97	2.28
HCO3	47.99	76.18	1.59	21.81	53.36	2.45
CN Total	36.67	17.91	0.49	6.67	5.73	0.86
CN Libre	33.33	17.1529071	0.51	4.67	3.40	0.73
SS	123.71	95.59	0.77	34.29	22.28	0.65
STD	3656.29	668.51	0.18	3431.14	380.05	0.11
Comentarios	Agua con concentraciones considerables de Cu, Ca, SO4, CN y STD.			Agua con concentraciones considerables de Ca, SO4 y STD.		

Tabla 5.1.3. Los promedios de los siete muestreos realizados a las concentraciones de las especies analizadas, así como las desviaciones estándar y la variabilidad, son presentados para cada una de las corrientes que se estudiaron en el proyecto.

De acuerdo a lo observado en la Tabla 5.1.3, las especies que tienen una concentración considerable en las aguas frescas y recirculadas de la Planta 2 son: iones de Cu, los iones Ca, iones  $SO_4^{2-}$  y sólidos disueltos totales (STD).

Para identificar de una forma más clara que flujo contribuye en mayor proporción en el contenido de iones Cu, se obtienen los porcentajes de los iones Cu totales para cada una de las corrientes. Lo anterior se muestra en la Tabla 5.1.4:

Porcentaje de iones cobre totales en cada flujo	
Corriente	Cu [%]
Agua Rec Esp Pb	25.48
Agua Rec Esp Zn	8.66
Agua Rec Esp Cu	54.29
Agua Rec Esp Colas	7.81
Agua Rec Presa 3	3.66
Mina	0.07
Vergel	0.03

Tabla 5.1.4. Porcentaje de los iones cobre totales para cada una de los flujos de agua que se emplearon en la investigación. La corriente del espesador de Cu contribuye con la mayor cantidad de iones Cu para el agua que se recircula a la Planta 2.

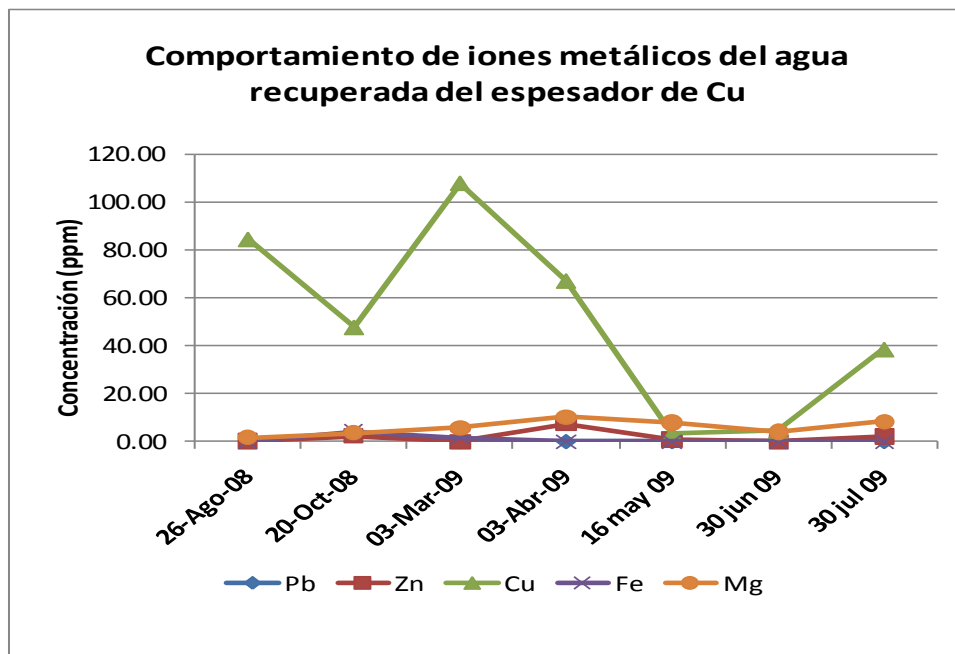


Figura 5.1.6. Concentración de los iones metálicos de interés en el agua recuperada del espesador de cobre. Agua con concentraciones considerables de iones Cu, aunque se observa un descenso en los últimos muestreos, esta tendencia modifica el monitoreo de los iones Cu.

La concentración de los iones Cu recuperados del agua del espesador de Cu (agua con mayor concentración de esta especie, Figura 5.1.6), es muy baja en los muestreos de mayo y junio; para verificar si estas lecturas son correctas, se prepararon tres muestras de las aguas recuperadas del espesador de cobre y de la alimentación a molinos; para analizar el cobre en la muestra para análisis de metales, de no metales y de cianuro libre y poder estimar correctamente la concentración de iones cobre.

Los resultados obtenidos de la propuesta anterior se observan en las Figuras 5.1.7 y 5.1.8:

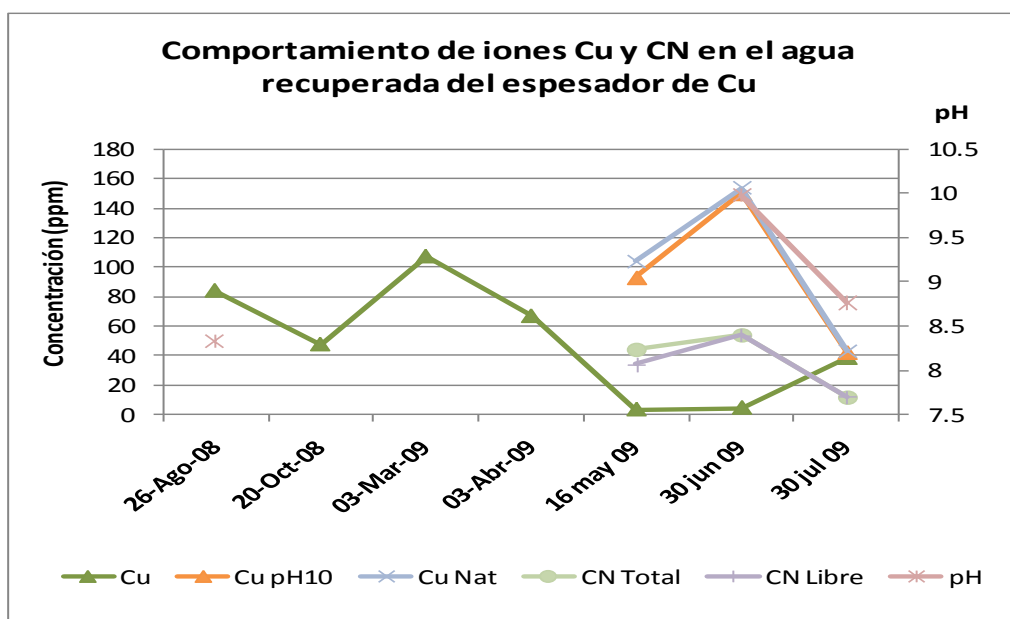


Figura 5.1.7. Concentración de los iones cobre y cianuro en el agua recuperada del espesador de cobre.

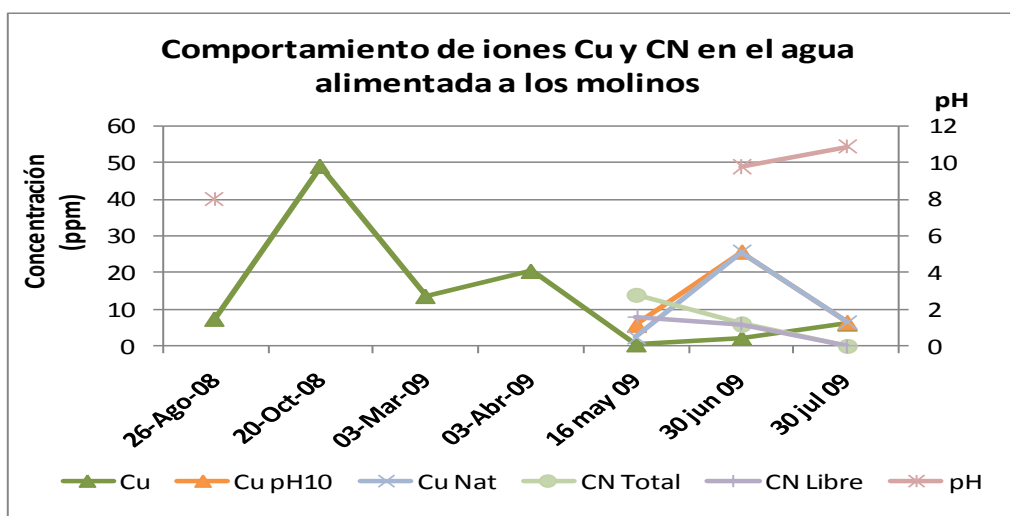


Figura 5.1.8. Concentración de los iones cobre y cianuro en el agua que es alimentada a los molinos.



Los resultados obtenidos confirman la presencia de los iones de Cu y cianuro en el agua que se recupera del espesador de Cu y en el agua que se alimenta a los molinos. También se confirma que la medición del cobre por el método ácido es incorrecta.

Se sabe que los iones cianuro forman complejos con los iones cobre, muy estables bajo condiciones alcalinas, mientras que a pH ácido ( $<3$ ), precipitan en forma de  $\text{CuCN}$  (Coetzer y colaboradores, 2003; Lu y colaboradores, 2002). En el apéndice C se explica en forma gráfica la presencia de estas especies en el agua.

Esto significa que iones cianuro y el pH alcalino proporcionan las condiciones para que los iones Cu se encuentren acomplejados en el agua recuperada del espesador de Cu.

En la sección 5.1.1 se mencionó que el agua que se recupera de los espesadores es enviada a dos áreas; una porción considerable al proceso, siendo consumida normalmente en molienda y una porción pequeña es enviada a los tanques de agua recuperada de la Planta 2. Por esta razón, en el agua que entra a los molinos se encuentren presentes iones Cu e iones CN; esto se muestra en la gráfica de la Figura 5.1.8. En esta corriente se encontraron concentraciones bajas de estas especies, comparadas con las encontradas en el espesador de Cu, debido a que las concentraciones de estas especies se diluyen al mezclarse las corrientes de las aguas recuperadas de los demás espesadores.

Obsérvese también en la Figura 5.1.8, que el pH (8-11) del agua que se alimenta a los molinos es ligeramente mayor que el pH (8.3-10) del espesador de cobre en la Figura 5.1.7, esto se debe a que el pH (10-11) del espesador de colas finales es ligeramente mayor al del agua que se alimenta a los molinos, al diluirse el agua recuperada del espesador de colas el pH baja, aunque la corriente de alimentación a los molinos no deja de ser alcalina. Esto proporciona condiciones favorables para que los iones Cu se encuentren acomplejados en este flujo.

Otra especie que se encuentra en concentraciones significativas es el Ca. Las tendencias del Ca en las corrientes de la Planta 2 se muestran en la siguiente Figura:

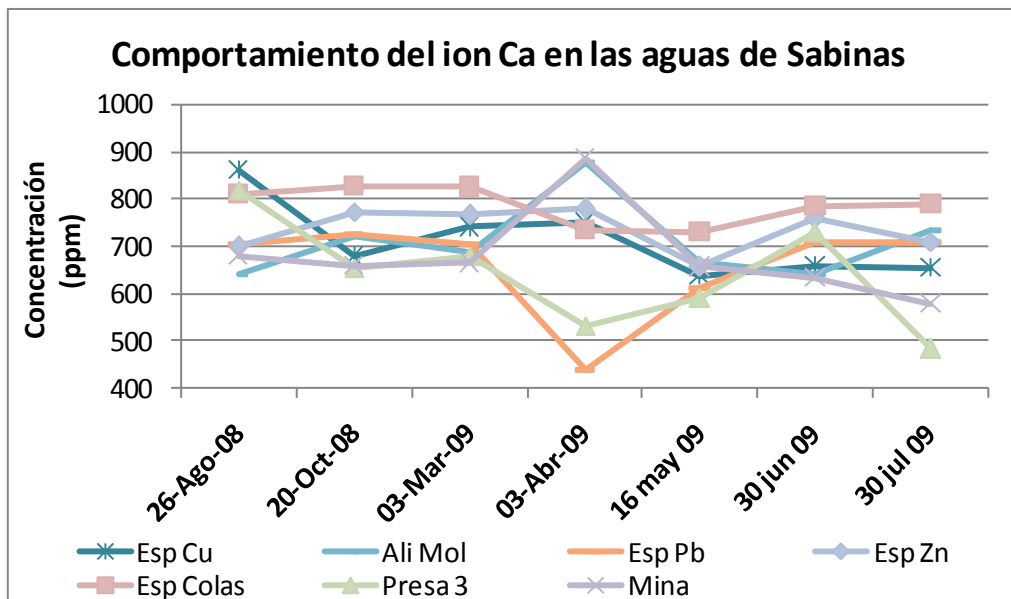


Figura 5.1.9. Concentración de los iones Ca en las corrientes de agua de la Planta 2. Se observan concentraciones altas para la mayoría de las corrientes.

El calcio reacciona con los sulfatos presentes en la solución formando sulfato de calcio ó yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), y tiende a precipitarse sobre la superficie de las especies minerales que son más oxidables, como es el caso de la galena (Grano y colaboradores, 1995). El yeso se encuentran presente en concentraciones considerables en el agua que se alimenta a los molinos, las cuales pueden ser causantes de una falta de selectividad en la flotación, debido a la precipitación de yeso sobre la superficie de los minerales y a la adsorción insuficiente de los colectores, demandando una mayor concentración de reactivos para su adsorción adecuada y que se pueda flotar la partícula.

Complementando lo anterior, la importancia de los iones sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) radica en que la concentración de los iones Ca y  $\text{SO}_4^{2-}$  determinan el equilibrio de la precipitación del yeso.

En resumen, las especies que se encuentran presentes en concentraciones considerables y que pueden afectarnos en el proceso son: Cu, Ca,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{CN}^-$ . Dichas especies se presentan en la Tabla 5.1.5.

Los datos de la Tabla nos muestran que corrientes contribuyen con más concentración de estas especies.

Los iones Cu se encuentran en mayor concentración en las aguas recuperadas de los espesadores de de Cu y Pb, y se generan debido a la adición del cianuro de sodio, que disuelve parcialmente al mineral de cobre, bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ). El cianuro se agrega en este punto de proceso para realizar la separación plomo-cobre y deprimir el cobre para flotar el plomo selectivamente. Los iones Ca se encuentran en mayor concentración en el

agua recuperada de los espesadores de Colas y de Zn, la presencia de calcio en estas aguas se puede atribuir a la cal (CaO) que se agrega en el circuito de Zn. El calcio en el agua de mina se genera principalmente por la disolución de la calcita (CaCO<sub>3</sub>), que es el principal mineral de ganga en el mineral de valor.

<b>Corriente</b>	<b>Cu [ppm]</b>	<b>Ca [ppm]</b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> [ppm]</b>	<b>CN<sup>-</sup> [ppm]</b>
Alimentación a molinos	18.38	709.20	1706.64	6.67
Agua Rec Esp Pb	40.75	657.19	1655.79	
Agua Rec Esp Zn	13.85	733.84	1685.59	
Agua Rec Esp Cu	86.85	711.60	1644.16	36.67
Agua Rec Esp Colas	12.50	785.80	1803.10	
Agua Rec Presa	5.85	641.64	1496.69	
Mina	0.11	679.73	1296.57	
Vergel	0.03	68.61	40.25	

Tabla 5.1.5. Concentraciones promedio en que se espera se encuentren las especies de Cu, Ca, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y CN<sup>-</sup>; así como la tendencia de la distribución de las mismas especies en las aguas de la Planta 2.

Los iones sulfatos se encuentran en mayor proporción en las aguas recuperadas de los espesadores de Colas y de Zn. Sus altas concentraciones provienen de la oxidación de los sulfuros minerales así como de la adición de los reactivos con SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, ZnSO<sub>4</sub> agregados para deprimir a la esfalerita en el circuito de cobre.

Los iones de CN<sup>-</sup> se encuentran principalmente en el agua recuperada del espesador de Cu y provienen solamente de la adición del cianuro de sodio en la etapa de separación plomo-cobre.

## **5.2. Resultados de la Química de la Pulpa derivados del muestreo realizado en la Planta 2.**

Anteriormente se hizo mención de la importancia del agua en los procesos de separación, de estos procesos nos enfocamos en estudiar los efectos de la calidad del agua en las etapas de molienda y flotación porque en ellas es donde se lleva a cabo la mayor interacción entre el mineral y el agua. Para identificar los efectos de la calidad del agua sobre los minerales es necesario saber en qué condiciones se producen estos efectos; para conocer las

condiciones en que se encuentra la pulpa se realizan mediciones de las variables de la química de la pulpa y los resultados que obtuvimos son los que se comentan en esta sección.

Los resultados que se presentan corresponden al muestreo realizado en la Planta 2 el día 29 de julio del 2009. El orden de presentación de los resultados es el siguiente: primero se presentan los resultados de química de la pulpa, después los resultados de la extracción de iones metálicos con EDTA y finalmente los resultados del balance metalúrgico.

### 5.2.1. Química de la pulpa.

Los valores de las variables que caracterizan la química de la pulpa se obtuvieron de los muestreos realizados a los circuitos de molienda y de flotación del circuito de cobre. Las tomas de las muestras se hicieron por triplicado y los promedios de cada etapa del proceso nos muestran el perfil de comportamiento del pH,  $E_h$ , oxígeno disuelto, demanda de oxígeno disuelto y temperatura de la pulpa a su paso por el proceso. Las Figuras 5.2.1 a la 5.2.5 se presentan estos perfiles:

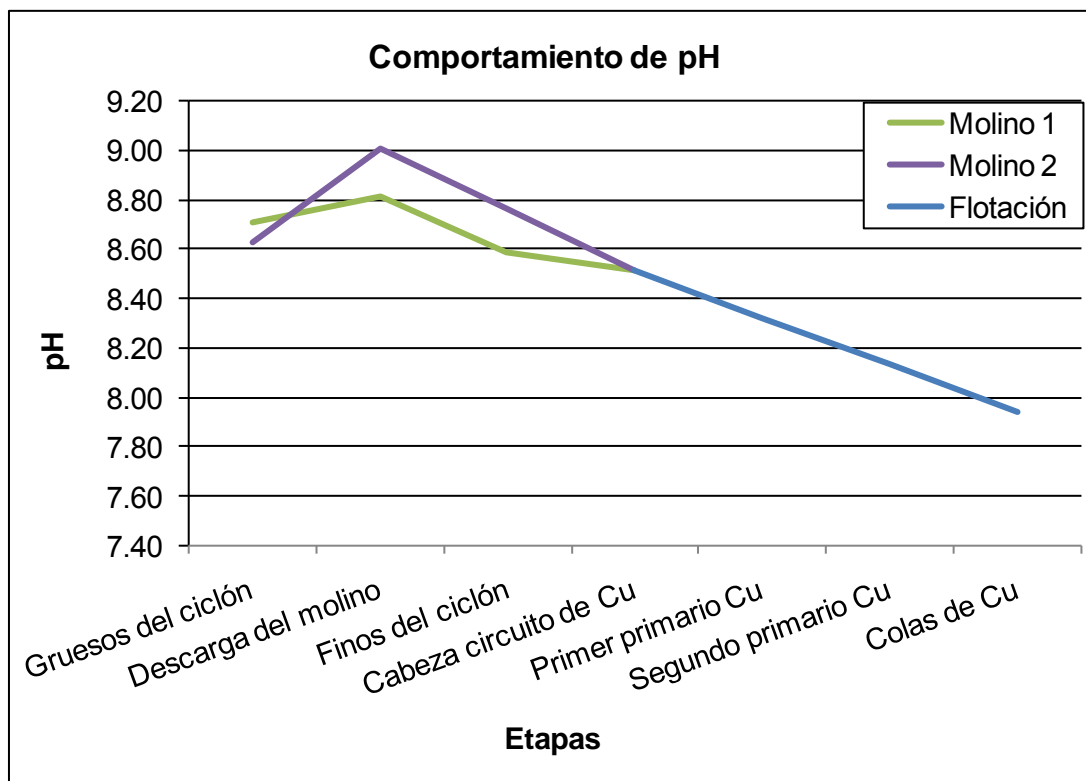


Figura 5.2.1. Perfil del pH en molinos y circuito de cobre en planta 2. El pH en molienda con tendencia ligeramente alcalina y en flotación con tendencia hacia la neutralidad.

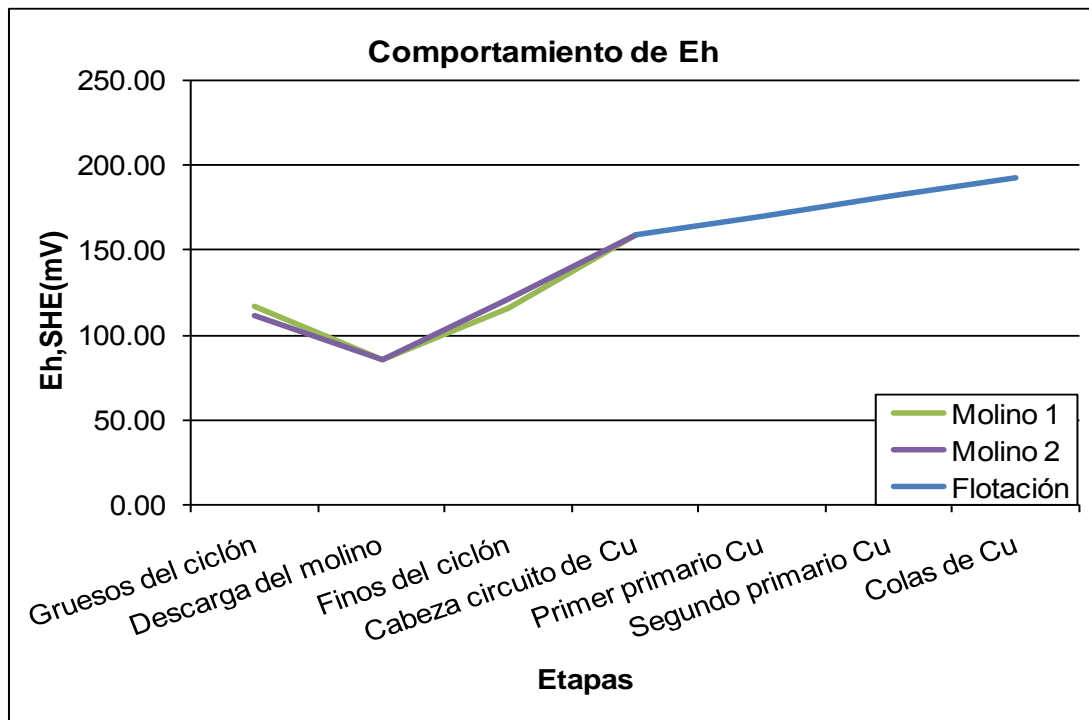


Figura 5.2.2. Perfil del  $E_h$  en molinos y circuito de cobre en planta 2. Valores bajos de potencial en molienda indicando la presencia de reacciones de media celda de manera intensa. En flotación las reacciones de media celda bajan de intensidad.

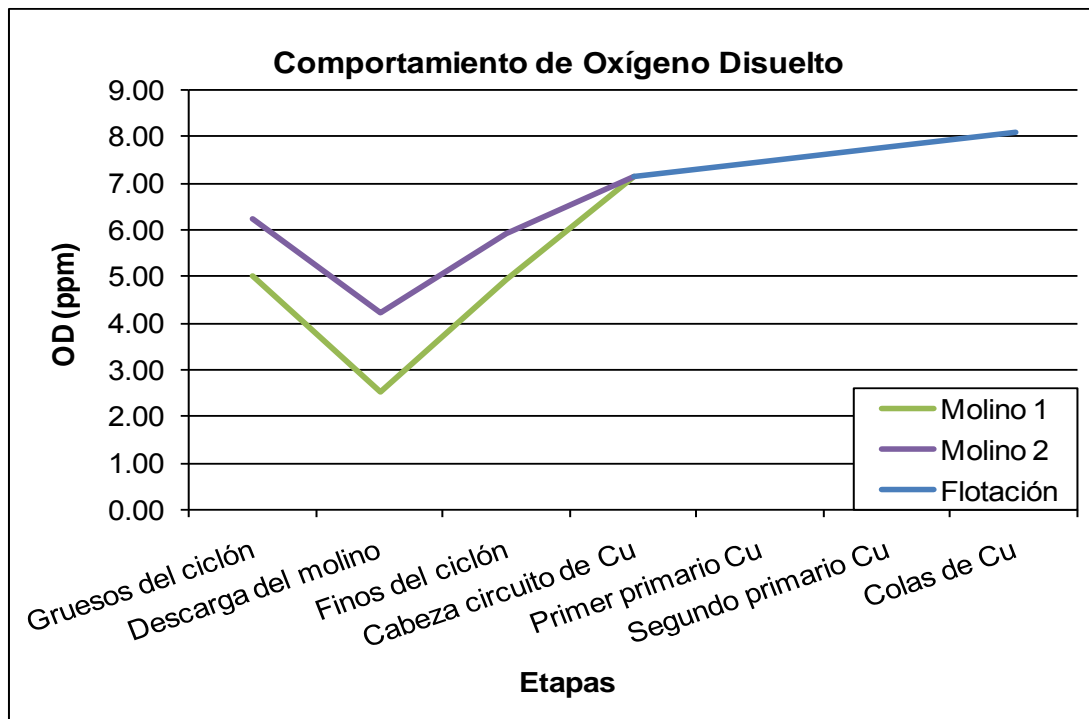


Figura 5.2.3. Perfil del OD en molinos y circuito de cobre en planta 2. Consumo de oxígeno en molienda, por lo que la concentración de oxígeno disuelto es baja. En flotación el consumo de oxígeno es escaso por lo que la concentración de oxígeno aumenta.

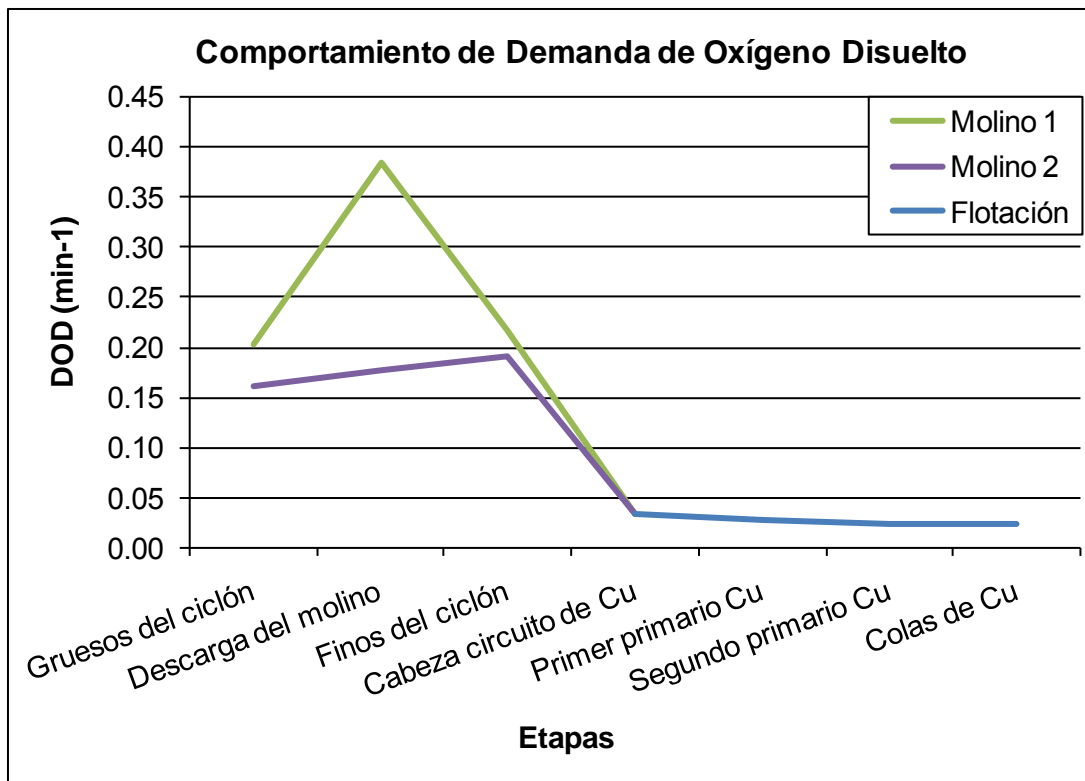


Figura 5.2.4. Perfil de DOD en molinos y circuito de cobre en planta 2. El oxígeno se consume en molienda. En flotación el consumo es casi nulo.

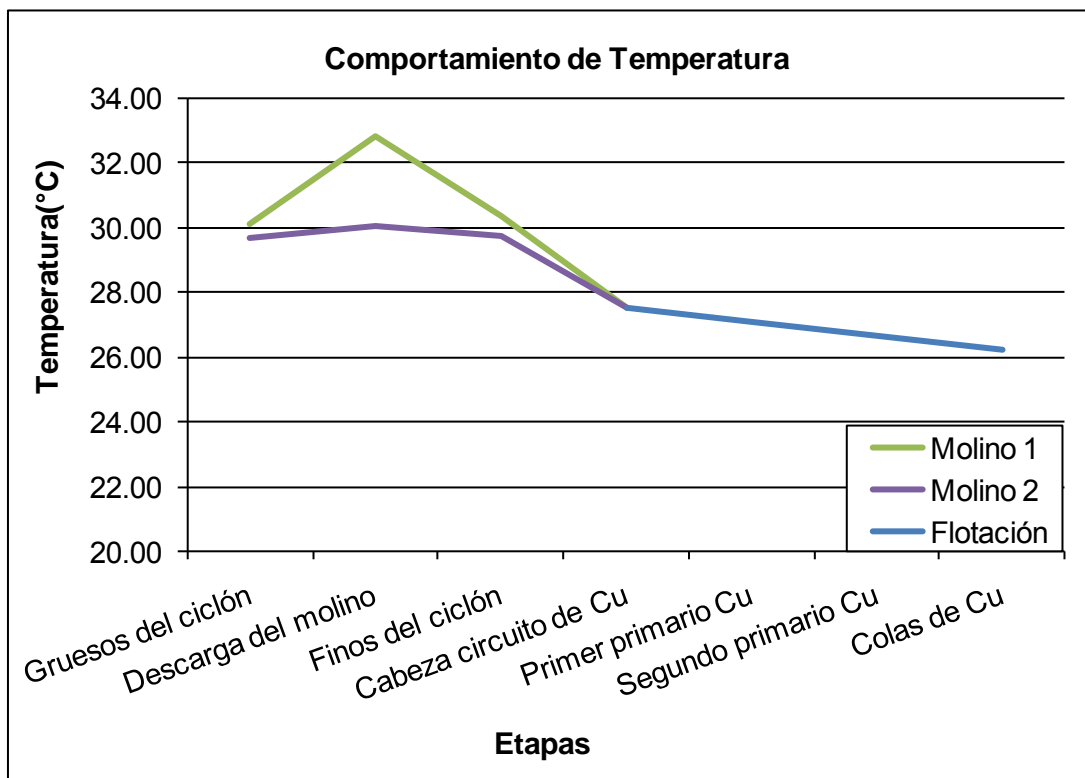
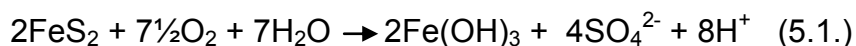
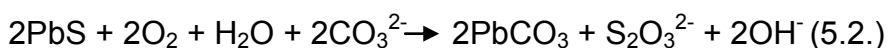


Figura 5.2.5. Perfil de la temperatura en molinos y circuito de cobre en planta 2. Debido al abrasión en molienda la temperatura es más elevada que en flotación.

En la Figura 5.2.1 se presenta el comportamiento del pH de la pulpa en todo el proceso. Del perfil mostrado podemos decir que en los molinos la pulpa es ligeramente alcalina y que al pasar a flotación tiende a ser neutra. En otras palabras esto quiere decir que la concentración del ion hidrógeno está aumentando, esto se puede deber a que en la etapa de flotación domina ligeramente la oxidación de la pirita de acuerdo a lo reportado por Rumball y Richmond (1996), representado en la reacción 5.1:



En la molienda la pulpa es corrosiva y el proceso de oxidación es más intenso. Sin embargo, el pH tiende a incrementarse ligeramente, lo que significa que la reacción que domina en esta etapa es la reportada por Rumball y Richmond (1996):

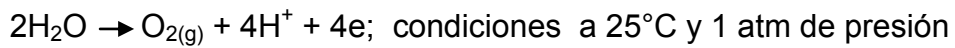


Indicándonos que la reacción dominante es la oxidación de la galena, razón por la cual el pH tiende a ser ligeramente alcalino. Esto se puede deber a la aireación de la pulpa así como al uso bola de alto cromo en los medios de molienda, lo que minimiza la oxidación de fierro proveniente de los medios y esto a su vez favorece la oxidación de la galena. Además, en la molienda domina la oxidación de la galena por que se oxida más rápidamente que cualquier otro sulfuro debido a la interacción galvánica con la pirita/pirrotita (Chung, 2009; Leja, 2004; Huang y Grano, 2005). En la flotación, se puede decir que la galena prácticamente se oxidó al equilibrio por lo que el oxígeno ahora está disponible para reaccionar con la pirita.

En la Figura 5.2.2 se muestra el comportamiento del  $E_h$ . En los molinos se observan valores bajos de potencial, estos valores significan que hay una transferencia de electrones en la pulpa, indicando que la pulpa es reductora, es decir, que predominan las reacciones de media celda que ceden electrones. Al estarse consumiendo los agentes oxidantes (oxígeno) en la pulpa, los valores del potencial tienden a disminuir, indicando que en la pulpa se está llevando el proceso de oxidación en los sulfuros minerales, el perfil del  $E_h$  en la etapa de molienda muestra eso precisamente. Al ir la pulpa avanzando en el proceso, va dejando de ser reductora y los valores del potencial comienzan a incrementarse. Al inicio, la tendencia a disminuir de los valores de la potencia es muy marcada por la presencia de mineral fresco en los molinos y el proceso de oxidación es intenso, pero al ir avanzando en el proceso tienden a ser constantes los valores del potencial, indicando con esto que en la flotación el proceso de oxidación es mínimo ó nulo.

Para reforzar lo comentado en el párrafo anterior, se identifica de manera gráfica en qué etapas del proceso se están efectuando reacciones de media

celda en la pulpa (las cuales ocasionan transferencia de electrones) y en cuales no, para esto se gráfica el  $E_h$  vs pH (Figura 5.2.6.) para las diferentes etapas del proceso. Esta gráfica nos va ayudar a determinar si la variación de los valores de potencial se debe solo a cambio de pH ó a reacciones de media celda que se estén llevando a cabo en la pulpa. Partimos de la reacción de oxidación del agua:



$$E_h = 1.23 - 0.059\text{pH} \quad (5.3.)$$

De acuerdo a la ecuación 5.3, si la pendiente entre  $E_h$  vs. pH es substancialmente distinta a -0.059, es indicativo que hay reacciones de media celda presentes en la pulpa.

La Figura 5.2.6 nos presenta la relación  $E_h$  vs pH durante la molienda y la flotación.

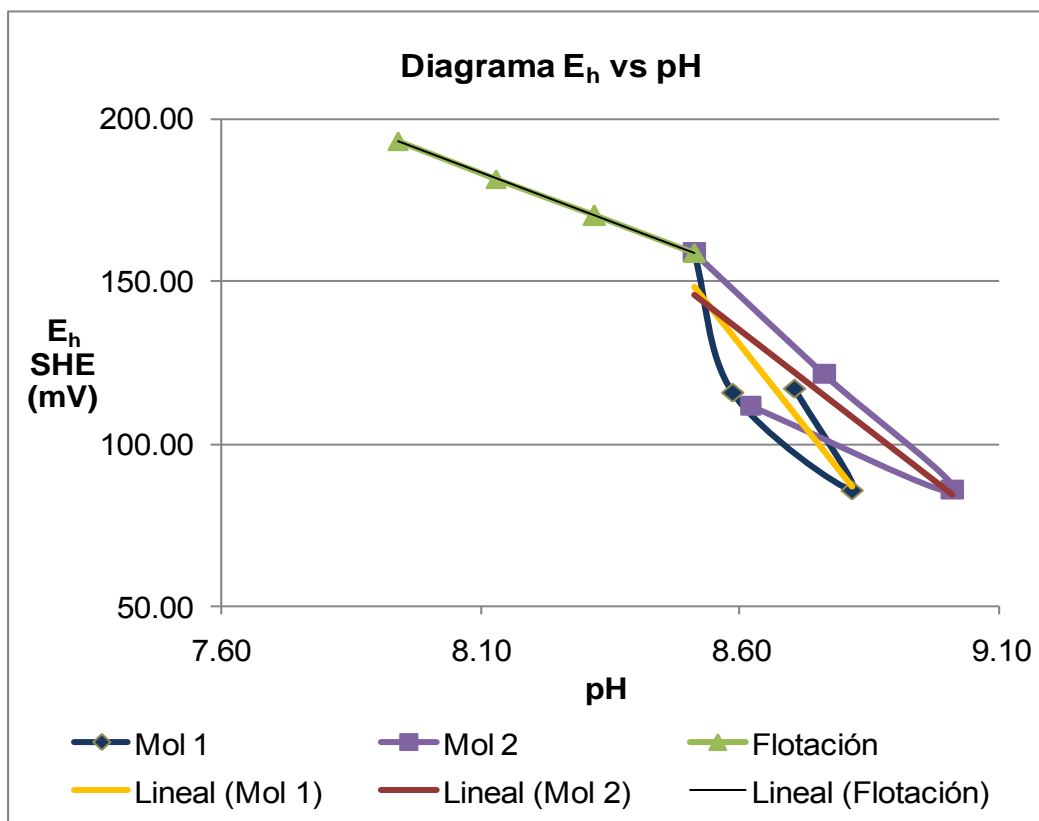


Figura 5.2.6. Comportamiento del potencial con respecto al pH en molinos y circuito de cobre en planta 2. La línea de tendencia del molino 1 (color amarillo), tiene una pendiente de -0.203 indicando que hay reacciones de media celda presentes en la pulpa. La línea de tendencia del molino 2 (color guinda), tiene una pendiente de -0.124 indicando que hay reacciones de media celda presentes en la pulpa. La línea de tendencia de la flotación (color negra), tiene una pendiente de -0.059 indicando que no hay reacciones de media celda presentes en la pulpa de la flotación.

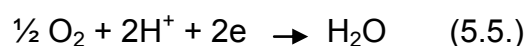
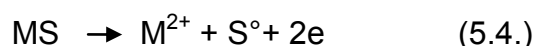


Las tendencias de los molinos y de la flotación en la gráfica de la Figura 5.2.6 se ajustan linealmente y se calcula el valor de las pendientes. Con los resultados anteriores podemos decir que efectivamente en la molienda hay reacciones de oxidación, y son las causantes de que los valores del potencial sean bajos. Por el contrario, para la flotación el valor de la pendiente es casi igual que el de la ecuación 5.3, indicándonos que no hay reacciones de media celda llevándose a cabo, por lo tanto, el incremento de los valores de potencial se deben a la disminución de pH a medida que se avanza en el circuito. (Chung, 2009).

En la gráfica de OD (Figura 5.2.3.), se muestra la misma tendencia que la de  $E_h$ ; la semejanza de las tendencias se debe a la presencia y a la no presencia de reacciones de media celda en la pulpa (como ya se mencionó anteriormente en la gráfica de  $E_h$ ). Cuando reacciones de media celda se están llevando a cabo se registran valores bajos de potencial y el oxígeno disuelto es consumido en el proceso de oxidación por los sulfuros minerales, por lo que las concentraciones de oxígeno disuelto que se registra en la pulpa son bajas. Cuando no hay reacciones de media celda presentes, los valores de potencial son más altos en la pulpa, indicándonos que el consumo de oxígeno es mínimo ó nulo y las concentraciones de oxígeno disuelto en la pulpa que se registran son más elevadas, tendiendo a llegar a la saturación.

En la gráfica de la Figura 5.2.3, se observa para la etapa de molienda que la concentración de oxígeno disuelto va descendiendo, debido a que el oxígeno presente en la pulpa está siendo consumido por el mineral, es decir, se están oxidando los minerales. En la etapa de flotación, la pulpa consume poco o nada de oxígeno porque la mayor parte de la superficie de mineral ya se encuentra oxidada, al mismo tiempo que la aireación de la pulpa en la flotación promueve el incremento del oxígeno disuelto en la pulpa de la flotación; esto en la gráfica se observa con una tendencia ascendente en la concentración de oxígeno disuelto.

Se sabe que el oxígeno es un agente oxidante y en los sulfuros minerales se tiende a oxidar el azufre provocando con esto la presencia de azufre elemental y la generación de iones metálico en la pulpa, de acuerdo a reacciones 5.4 y 5.5:



Además, la presencia del oxígeno disuelto en la pulpa provoca el aumento de la concentración de iones oxhidrilo (o disminución de la concentración de  $H^+$ , que es equivalente). La presencia de oxígeno en la pulpa se debe a la continua interacción aire-pulpa, causada por el traslado de la pulpa a las diferentes

partes del proceso y por el oxígeno disuelto en el agua que entra al proceso. Su presencia es importante porque ayuda a la superficie del mineral en la adsorción de los colectores y a la depresión de otros minerales como es el caso de la pirita.

Relacionando las gráficas de  $E_h$  y de OD podemos decir que los valores bajos de estas variables implican una pulpa corrosiva en la cual se están llevando a cabo procesos de oxidación (consumo de oxígeno) y que valores altos o constantes indican que el proceso de oxidación es mínimo ó nulo, debido a que el estado de oxidación de la superficie mineral ha alcanzado el equilibrio.

En la gráfica 5.2.4., se presenta el comportamiento de la demanda de oxígeno disuelto (DOD); de manera semejante a lo visto en las gráficas de  $E_h$  y OD, se observa coincidencia en el comportamiento: en molienda hay consumo de oxígeno debido a las reacciones de oxidación que se están presentando en la pulpa. Cuando comienza el proceso de flotación la demanda de oxígeno disminuye, debido a que la superficie mineral prácticamente ha alcanzado su estado de oxidación de equilibrio.

En el último gráfico 5.2.5., se presenta el comportamiento de la temperatura a lo largo del proceso. En la etapa de molienda se observan temperaturas más altas, las cuales se pueden atribuir al gran consumo de energía así como al desprendimiento de calor como una contribución de las reacciones exotérmicas que se están llevando a cabo en esta parte del proceso. La temperatura en general baja en la flotación y se mantiene relativamente constante.

La tendencia de las variables que definen la química de la pulpa en nuestro proceso de la Planta 2, nos han mostrado de manera general que en la etapa de molienda las reacciones de oxidación de la superficie del mineral ocurren más intensamente que en el proceso de flotación. Además nos muestra que todos las variables termodinámicas reflejan los fenómenos químicos y electroquímicos que están ocurriendo en la pulpa; entender el significado y la relación que existe entre estas variables termodinámicas, se puede convertir en una herramienta importante para detectar cambios de las propiedades químicas de la pulpa, relacionadas a la mineralogía y a la calidad del agua de proceso; lo anterior nos puede ayudar a predecir impactos potenciales en los resultados metalúrgicos de la planta.

### **5.2.2. Extracción de iones metálicos con EDTA.**

Sabemos que el agua de proceso contiene varias especies disueltas, entre ellas los iones metálicos. Los iones metálicos son principalmente producidos por la oxidación de minerales de sulfuro, de allí la importancia de esta técnica.

A continuación se presentan los resultados de la extracción de iones metálicos que se obtuvieron del muestreo realizado a la planta en los circuitos de molienda y flotación de cobre. Se presentan los perfiles de los iones extraídos para cada molino, por esa razón en la etapa de molienda se duplican las tendencias para cada ion.

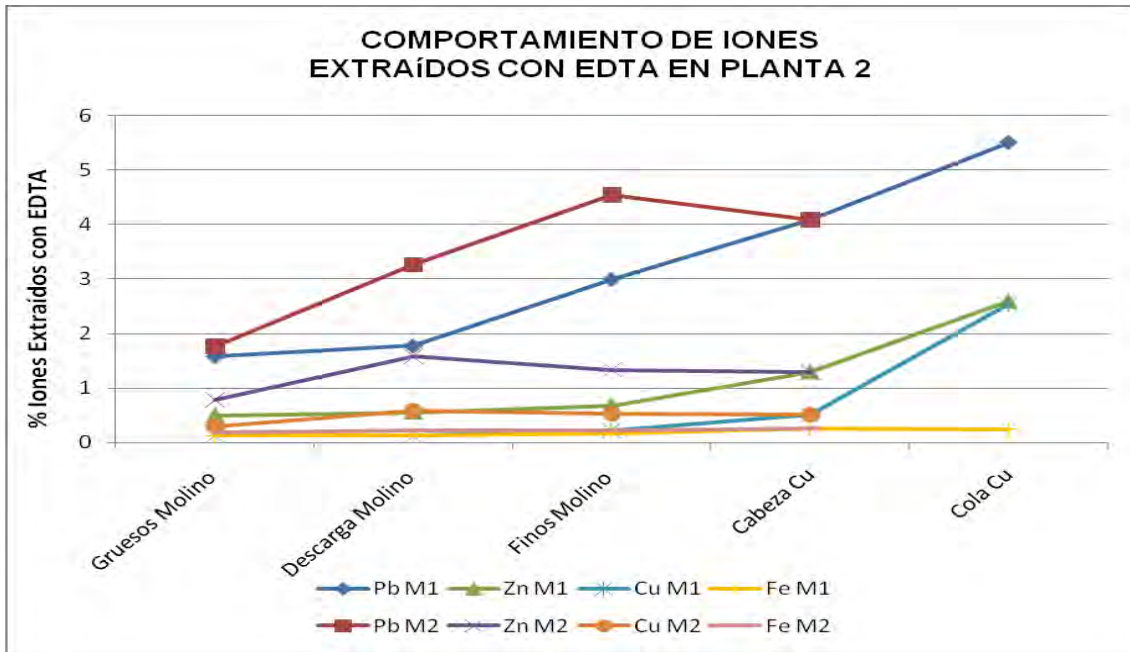


Figura 5.2.7. Perfiles de concentración de los iones Pb, Zn, Cu y Fe extraídos con EDTA. En el eje "y" se grafica el porcentaje en peso del metal presente en el mineral en forma de especies oxidadas distintas al sulfuro.

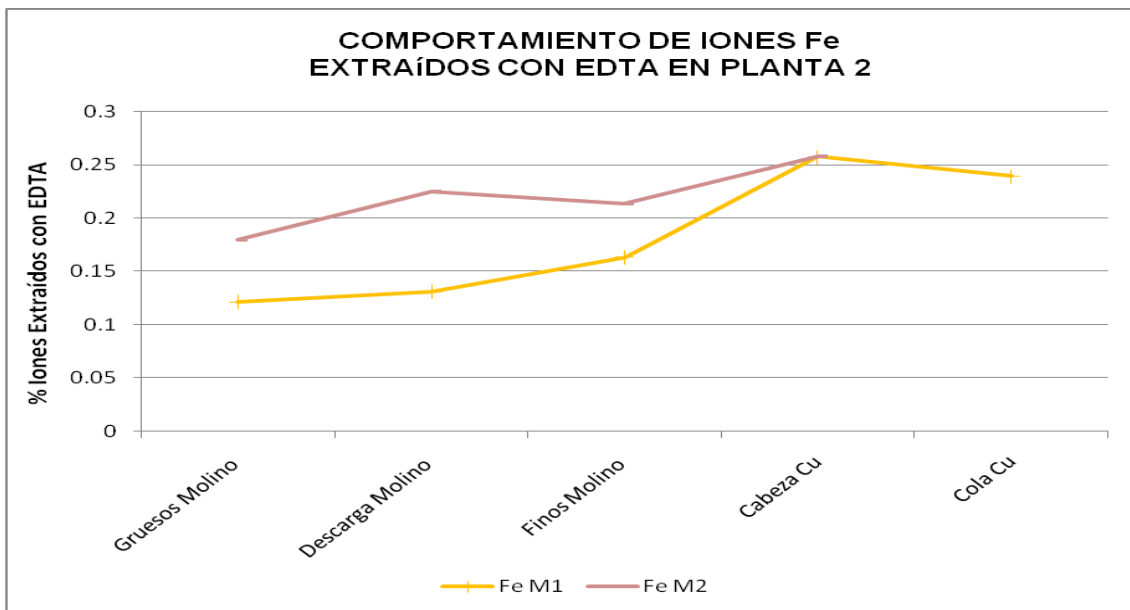


Figura 5.2.8. Perfil de concentración de iones hierro en la etapa de molienda y flotación de cobre. La baja concentración de iones hierro provenientes de la abrasión y oxidación de los medios de molienda disminuyen considerable el consumo de oxígeno.

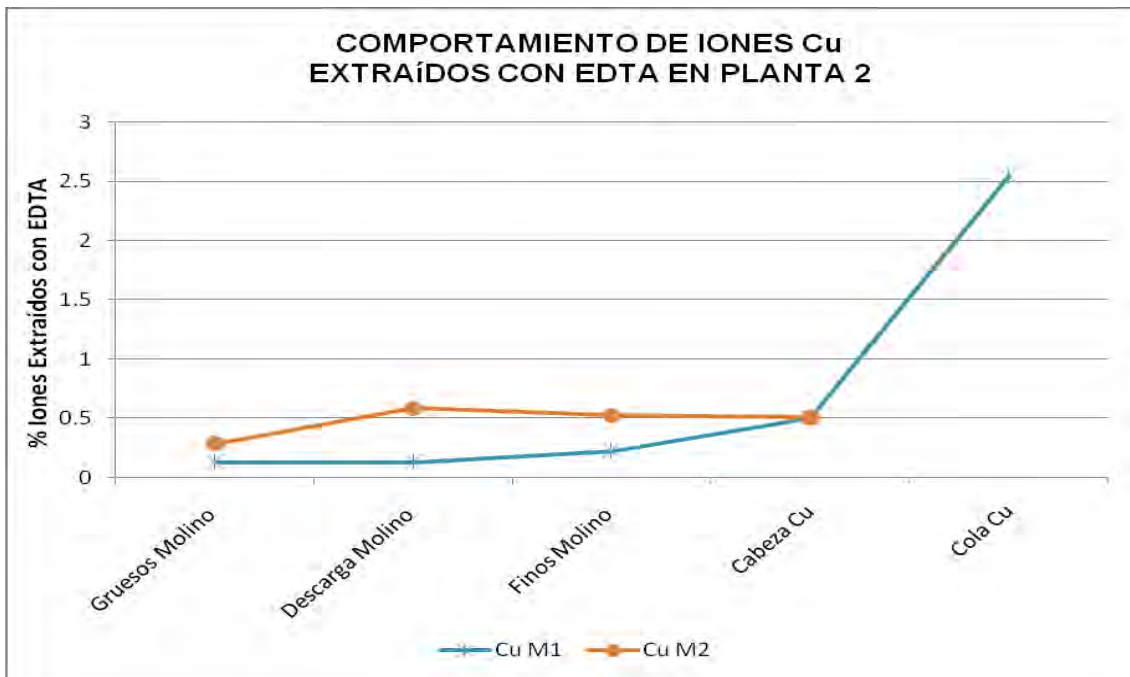


Figura 5.2.9. Perfil de concentración de los iones Cu en molienda y flotación de cobre. La presencia del cobre oxidado es mayor en flotación que en molienda debido a la adición del cianuro de sodio en la separación, que disuelve parcialmente al mineral de cobre, bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ).

Se puede apreciar en la gráfica 5.2.7, que la galena es la especie mineralógica que se oxida más y su comportamiento continúa así a lo largo del proceso. La oxidación de la galena es más rápida que cualquier otro sulfuro porque tiene un menor potencial de reposo con respecto a los demás minerales (Leja, 2004). Además se ve favorecida por la aireación de la pulpa y el uso de bola de alto cromo en los medios de molienda. La aireación favorece la oxidación de la galena porque hay más oxígeno disuelto disponible, este incremento en la concentración del oxígeno disuelto se debe al bajo consumo del oxígeno disuelto por parte del hierro proveniente de los medios de molienda. El uso de bola de alto cromo disminuye la concentración de hierro en la pulpa (Figura 5.2.8), es decir, reduce la oxidación del hierro y en consecuencia la presencia de iones Fe en la pulpa. Algunas investigaciones reportan las comparaciones de los niveles de iones Fe extraídos cuando se usa bola de acero forjada y cuando se usa bola con alto cromo, esperándose generalmente un valor mayor (casi el doble) para los iones extraídos con bola forjada con respecto a los extraídos con bola de alto cromo. En el caso de Minera Madero se reportó 0.28% y un 0.15% de iones extraídos de Fe para la bola forjada y para la bola de alto cromo respectivamente (Chung, 2009).

Los minerales que tienden a oxidarse más fácilmente después de la galena, son la esfalerita y la calcopirita/bornita (Leja, 2004).

La oxidación de la pirita/pirrotita es menor debido a su naturaleza más noble (mayor potencial de reposo), en comparación con las demás especies sulfuros. De hecho, su disolución es relativamente baja debido a que están protegidas galvánicamente por el contacto con otros sulfuros menos nobles. Es por esta razón, como se observa en la Figura 5.2.7, el plomo, zinc y cobre son los mayores consumidores de oxígeno (Leja, 2004) y a su vez los mayores generadores de iones tanto en la pulpa como en el agua (cuando esta es recuperada).

La extracción de iones con EDTA en general nos muestra que al haber disminuido la concentración de iones Fe en la pulpa (debido al uso de bola de alto cromo en molinos), los sulfuros de plomo, zinc y cobre son los que tienden a oxidarse en mayor proporción (Chung, 2009) y a producir más iones metálicos, por lo que debemos tomar precauciones en este sentido, en especial con los iones de cobre y plomo en el circuito de cobre, porque su presencia puede activar el zinc en este circuito (Figura 5.2.9). El plomo puede ocasionar la activación inadvertida de la esfalerita por la hidrólisis del plomo derivada de la oxidación de la galena (Grano y colaboradores, 1997; Coetzer y colaboradores, 2003). Las especies hidrolizadas de cobre pueden activar a la esfalerita en especial a través del precipitando  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  (Wang y colaboradores, 1989; Gerson y colaboradores, 1999; Chen y Yoon, 2000; Coetzer y colaboradores, 2003). Lo anterior nos sugiere una modificación en nuestro esquema de reactivos ó por otro lado analizar la causa de su presencia y ver otra alternativa para evitar sus efectos.

### 5.2.3. Balance metalúrgico.

El balance metalúrgico se ajustó usando el software MatBal. La Tabla 5.2.1, nos presenta un resumen los resultados del muestreo realizado en la planta.

Flujo	Ensayes (%)						Recuperación (%)				
	Peso (TPH)	Ag (g/t)	Pb	Zn	Cu	Fe	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe
Cabeza Flotación	85.00	61	0.07	2.3	0.7	4.5	100	100	100	100	100
Conc 1er Prim	2.26	2211	1.90	10.1	20.2	16.4	96.2	72.0	11.6	75.4	9.7
Conc 3ra Limpia	2.05	2612	2.11	9.4	22.9	16.8	76.0	72.6	9.7	77.6	9.0
Cola de Cu	82.95	15	0.02	2.1	0.2	4.2	24.0	27.4	90.3	22.4	91.0

Tabla 5.2.1. Grados y recuperaciones de los distintos elementos en los concentrados de los bancos del circuito de cobre de la Planta 2.

Los resultados del balance metalúrgico nos muestran la importancia de la buena operación del primer primario del circuito de Cu, ya que la mayor parte de los minerales se recupera en este banco.

El concentrado de la tercera limpia que va al circuito de separación cuenta con aceptables recuperaciones de Pb y Cu y va con niveles aceptables de Zn y Fe.

En resumen, el balance nos muestra una operación adecuada en el circuito de Cu y la oportunidad de mejorar las recuperaciones de Ag en este circuito.

Complementando la información del balance metalúrgico con los datos obtenidos del estudio de la química de la pulpa, en términos generales podemos decir que en la etapa de molienda el proceso de oxidación que se lleva a cabo es el adecuado, ya que los minerales de interés adquieren la oxidación necesaria tanto para que sean colectados fácilmente, como para que sean deprimidos. Esto se refleja en la etapa de flotación de cobre, donde manteniendo las condiciones de la pulpa y las dosificaciones de reactivos adecuadas, se obtienen las recuperaciones presupuestas de los elementos de interés.

### **5.3. Resultados de las pruebas del laboratorio.**

Las pruebas de laboratorio se realizaron para investigar el efecto de las diferentes calidades de agua en la flotación del circuito de cobre, utilizando como complemento para el análisis de los resultados metalúrgicos, los perfiles de las variables termodinámicas ( $E_h$ , pH, OD, DOD y T). Los resultados obtenidos de las pruebas del laboratorio se presentan en el siguiente orden: Primero se presenta la variabilidad experimental. Posteriormente se presentan los resultados de la química de la pulpa. Por último se presentan los resultados de las pruebas.

#### **5.3.1. Reproducibilidad de las pruebas.**

Las pruebas se realizaron por duplicado con cada tipo de agua que se propuso. Para mostrar la reproducibilidad de las pruebas realizadas, se presentan las gráficas grado-recuperación para los elementos de interés de la prueba efectuada con el agua que se alimenta a los molinos; el resto de las gráficas se presentan en apéndice D.

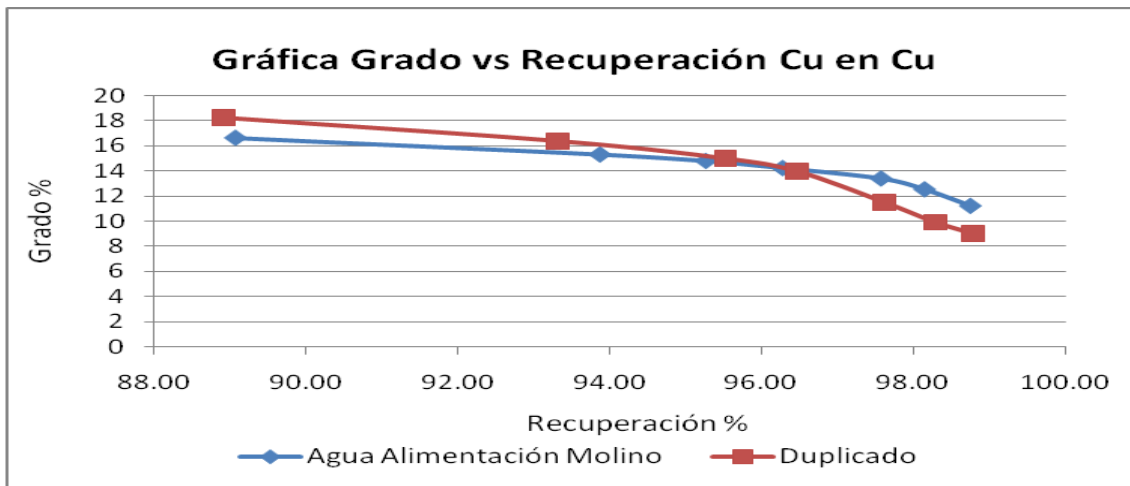


Figura 5.3.1. Gráfica grado-recuperación para el cobre en el concentrado de cobre.

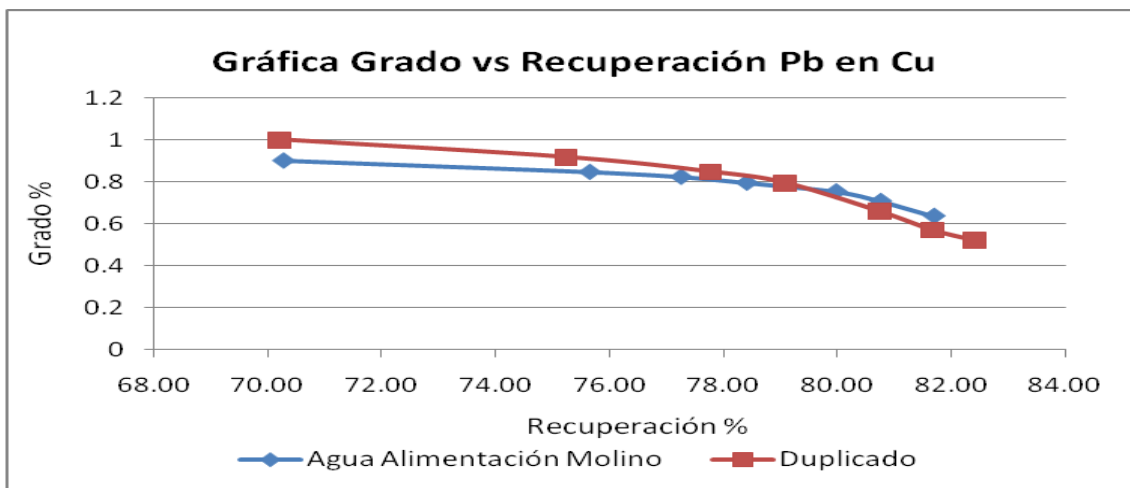


Figura 5.3.2. Gráfica grado-recuperación para el plomo en el concentrado de cobre.

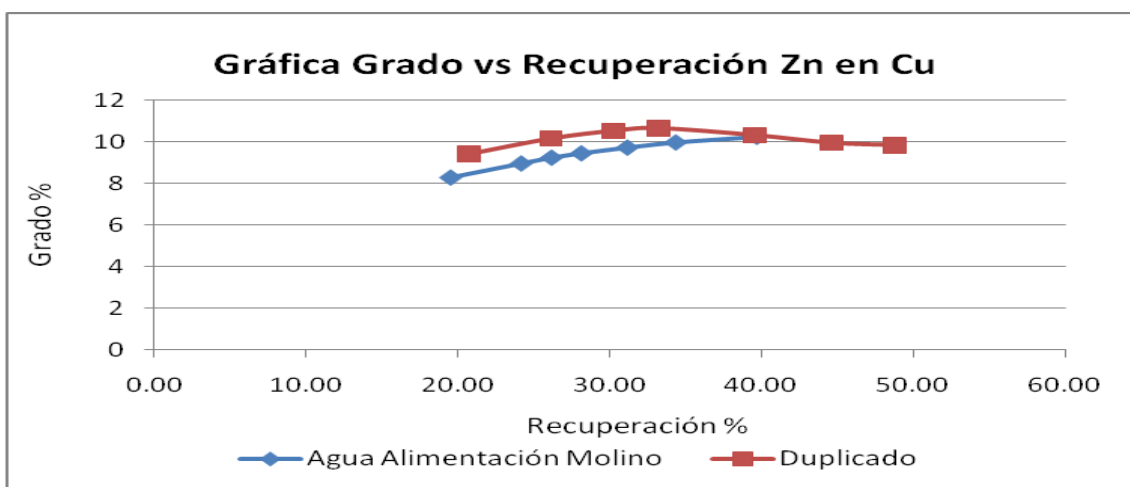


Figura 5.3.3. Gráfica grado-recuperación para el zinc en el concentrado de cobre.

Los resultados mostrados en las gráficas anteriores muestran una buena reproducibilidad de las pruebas de flotación en el laboratorio por lo tanto, hay un alto grado de confiabilidad en los resultados.

### 5.3.2. Química de la pulpa.

Los resultados mostrados en esta sección se obtuvieron de las pruebas realizadas en la cuarta etapa de la investigación. Las gráficas de las etapas segunda y tercera se presentan en los apéndice D. La razón por la cual solo se presentan estos resultados, es porque las diferentes variables termodinámicas del resto de las etapas de investigación, muestran resultados semejantes.

Para la cuarta etapa de pruebas ya se había realizado una selección de los diferentes tipos de aguas que se utilizarían para realizar las pruebas; esto se discute en la sección 5.3.3.2. Para los resultados que se mostraran en esta sección, es necesario identificar la nomenclatura que se utiliza en cada tipo de agua. En la Tabla 5.3.1 se hace una descripción de cada una de ellas.

<b>Nombre del agua empleado en las gráficas</b>	<b>Tipo de agua</b>	<b>Descripción</b>
Potable	Fresca	Agua que se utiliza como referencia.
Vergel	Fresca	Agua que se utiliza en el proceso.
Ali_Mol	Proceso	Agua tomada del flujo que entra en la alimentación a molinos.
Tratada	Proceso	Agua tomada del flujo que entra en la alimentación a molinos y se trata con 2 g/L de $\text{Na}_2\text{CO}_3$ antes de realizar las pruebas.
Tratada in situ	Proceso	Agua tomada del flujo que entra en la alimentación a molinos, antes de iniciar la molienda se agregan 0.66 g/L de $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , al agua se trata mientras se realiza la molienda.

Tabla 5.3.1. Descripción de cada tipo de agua utilizada en las pruebas realizadas en la tercera y cuarta etapa de la investigación.



5.3.2.1. Química de la pulpa en molienda.

Las pruebas de molienda se realizaron en un molino Magotteaux en donde se colocaron 3 kg de mineral con 2 L de agua, además se le adicionó colectores S-8222 (Diisopropil-ditiofosfato de sodio) y A-3418 (Diisobutil-ditiofosfinato de sodio), y sulfato de zinc a una concentración del 10%. El tiempo de molienda fue de 18 min. Durante las pruebas de molienda se realizó la medición en línea de: pH,  $E_h$ , OD y T con un medidor TPS modelo 90-FLMV. Los parámetros de cada una de las variables se obtuvieron del muestro en la planta y se cargaron a un software que controla la operación del molino con el fin de reproducir las condiciones de la planta. Mas detalles al respecto se presentan en la sección 4.5.2.

A continuación se presentan las gráficas que muestran los perfiles de cada una de las variables de la química de la pulpa ( $E_h$ , pH, Oxígeno disuelto (OD), Demanda de Oxígeno Disuelto (DOD) y temperatura (T)), durante la molienda.

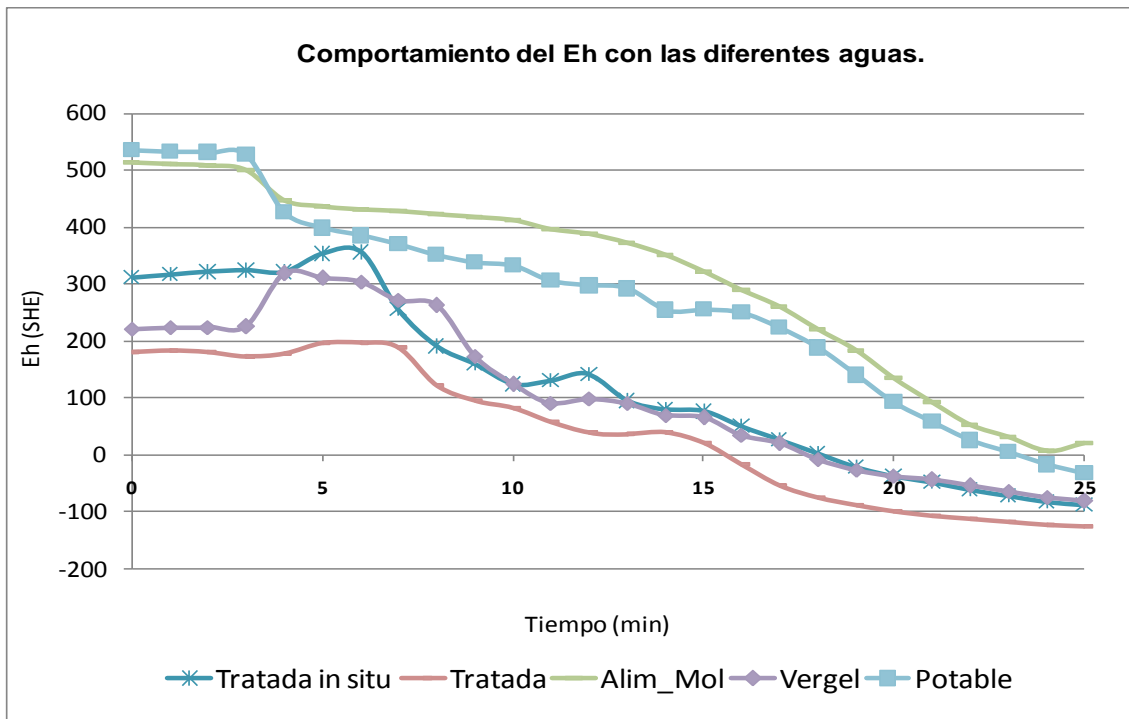


Figura 5.3.4. Comportamiento del  $E_h$  durante la molienda en el laboratorio. El potencial tiende a disminuir al ir transcurriendo el tiempo de la molienda, de la misma forma como se observó en la sección 5.2.1 en el perfil de  $E_h$  para la planta.

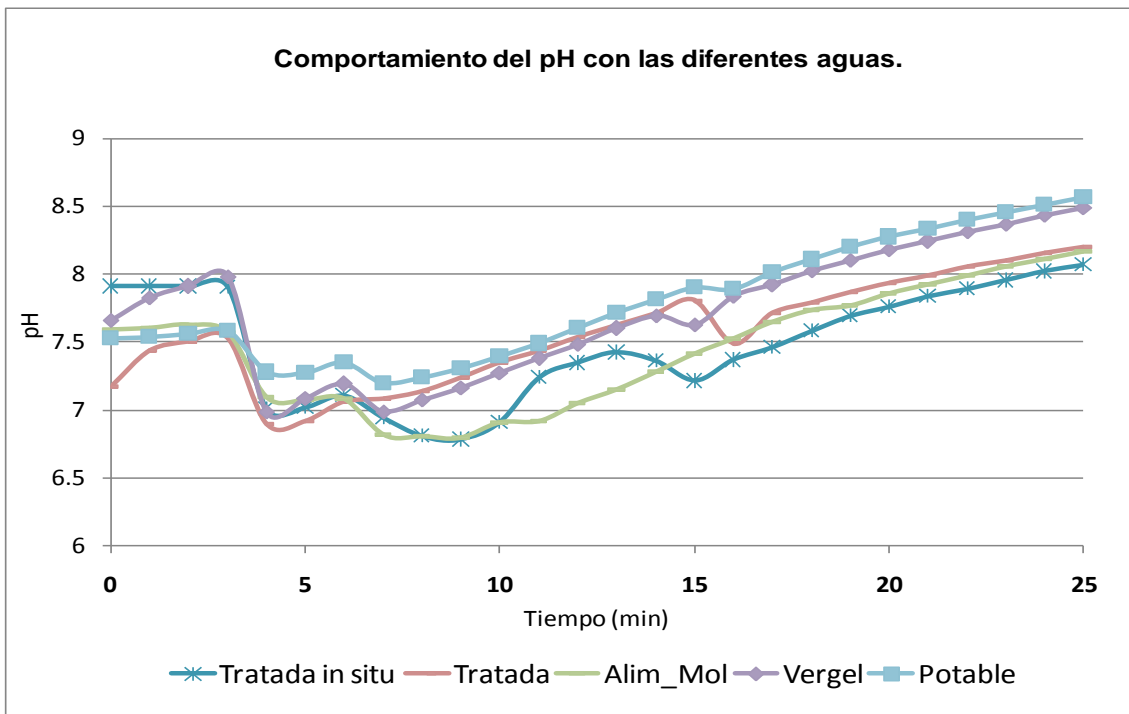


Figura 5.3.5. Comportamiento del pH durante la molienda en el laboratorio. La pulpa en los molinos tiende a ser ligeramente alcalina al ir transcurriendo la molienda, lo que refleja un incremento en la concentración del ion oxhidrilo.

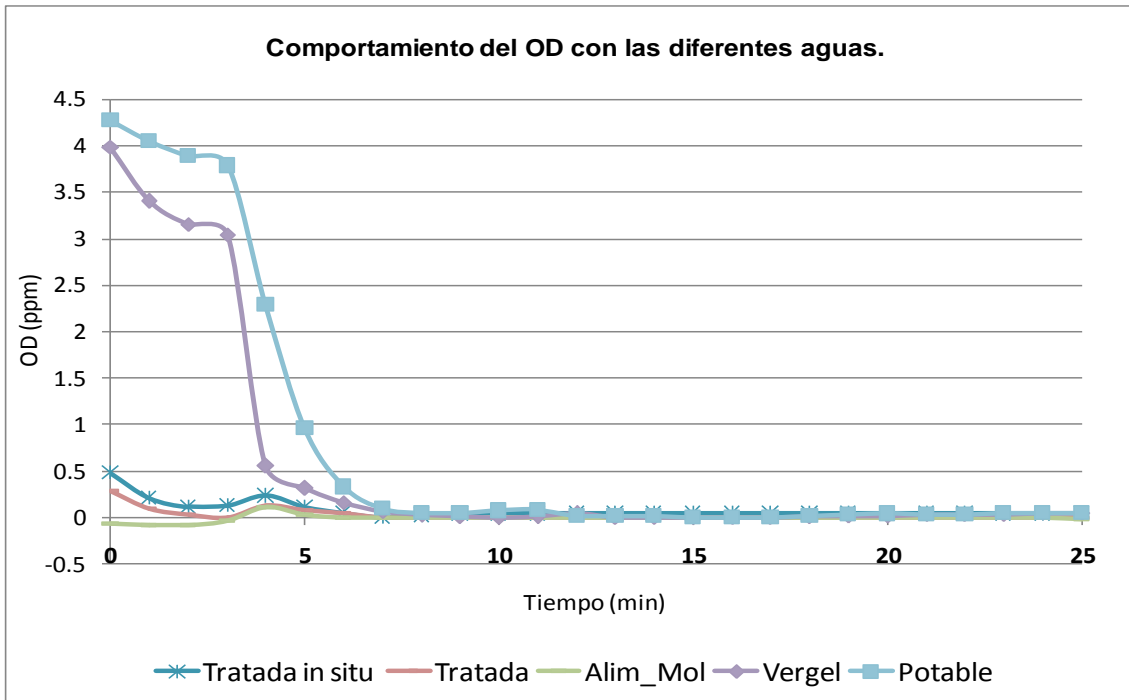


Figura 5.3.6. Comportamiento del oxígeno disuelto durante el tiempo de molienda en el laboratorio.

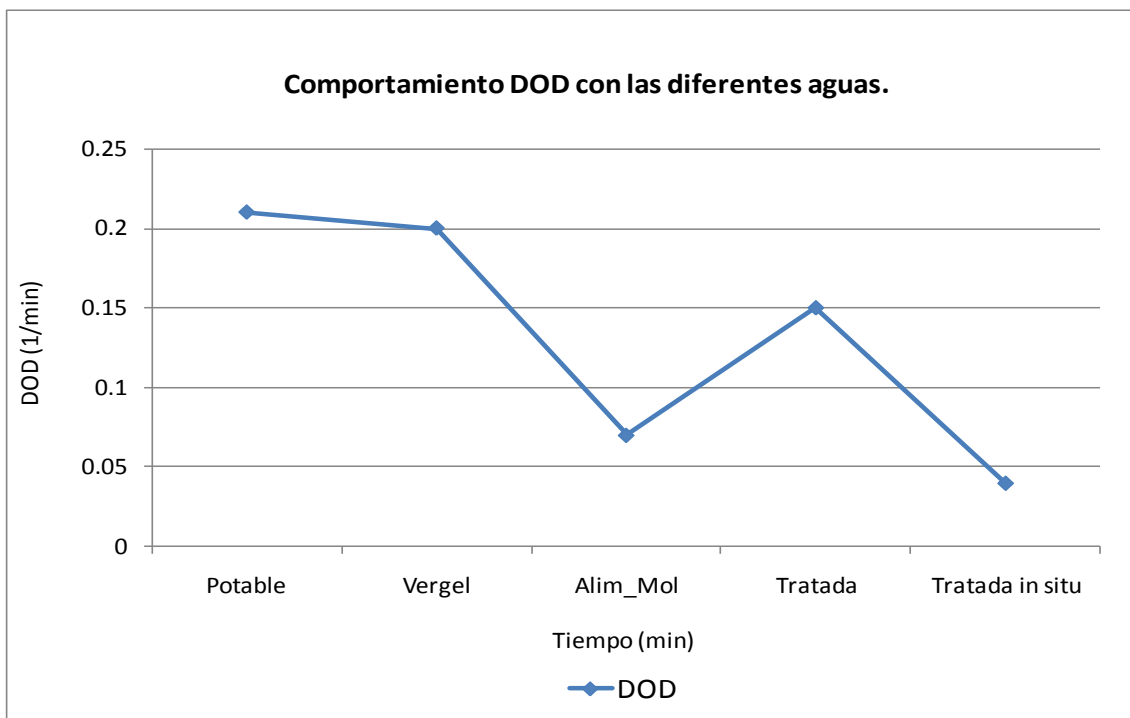


Figura 5.3.7. Comparación de la demanda de oxígeno disuelto con cada tipo de agua utilizada en el estudio durante la molienda en el laboratorio.

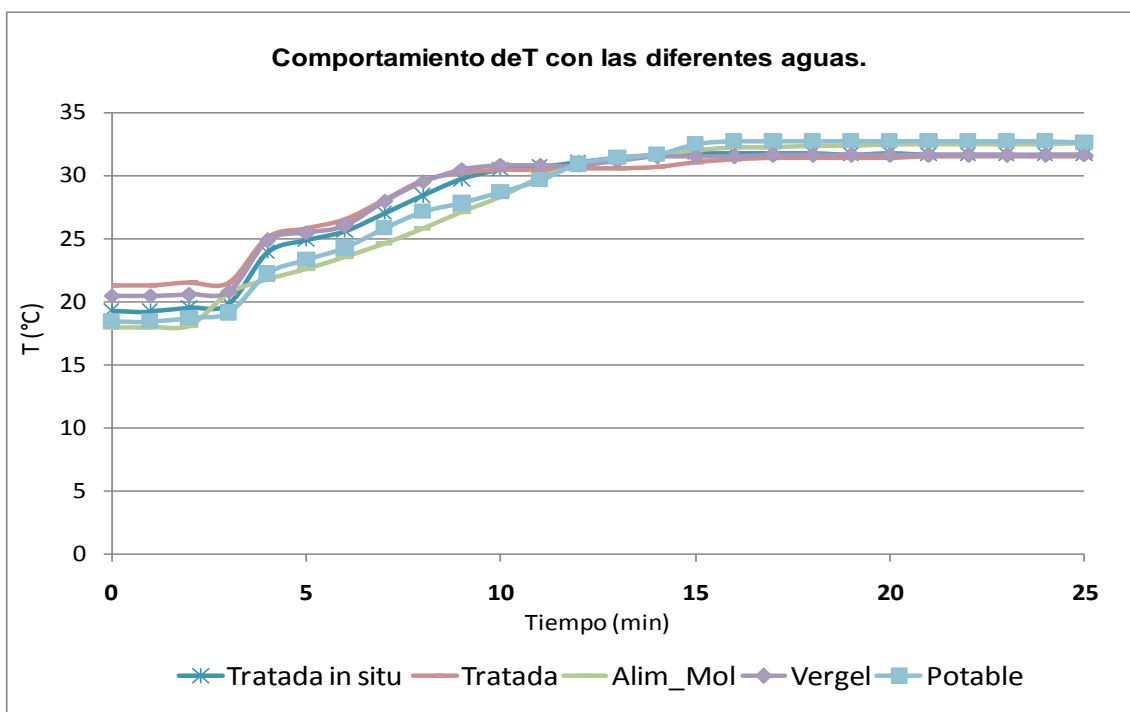


Figura 5.3.8. Comportamiento ligeramente ascendente de la temperatura durante el tiempo de molienda en el laboratorio.

La disminución del potencial ( $E_h$ ) (Figura 5.3.4) se debe al incremento de los valores de pH y a la presencia del oxígeno disuelto en la pulpa, el cual propicia que se lleven a cabo reacciones de media celda que ceden electrones. Lo anterior, coincide con lo comentado en la sección 5.2.1; esto refleja que la pulpa en las pruebas de laboratorio tiende a tener el mismo comportamiento que la pulpa de la planta.

Comparando los perfiles de cada una de las aguas empleadas en la Figura 5.3.4, podemos observar que con el agua que se alimenta a los molinos la pulpa es menos reductora y con el agua que se trata la pulpa es más reductora, esto indica que al tratar el agua que se alimenta a los molinos con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , aumentan en la pulpa las reacciones de media celda que ceden electrones, esto debido al aumento de superficies de mineral libres de la capa de  $\text{CaSO}_4$  que tiende a precipitar sobre las partículas minerales, en consecuencia, se espera que los consumos de reactivos sean más eficientes y que los resultados sean mejores.

En la figura 5.3.5 se presenta el perfil del pH para todas las aguas, en donde es posible observar para todos los tipos de agua un ligero aumento en el pH, una posible causa del aumento en la concentración de estos iones oxhidrilo se debe a la presencia del oxígeno disuelto en la pulpa, y al predominio de la reacción de oxidación anódica de la galena, la cual genera dichos iones (Rumball y Richmond, 1996):



Comparando los diferentes tipos de aguas respecto al pH, observamos que en los primeros minutos de la molienda (del 5 al 15), las aguas frescas y la tratada tienden a alcanzar un mayor valor de pH, indicando que en ese tiempo se favorecen más la reacción de oxidación anódica de la galena, así como las reacciones de media celda que ceden electrones. En los minutos finales de la molienda (15 al 25), observamos que el perfil del agua tratada tiende a comportarse como los perfiles del agua tratada in situ y del agua que se alimenta al proceso, este comportamiento se debe posiblemente a una disminución de reacciones de media celda, debidas la disminución de superficies de mineral libres de  $\text{CaSO}_4$  y a la baja concentración de oxígeno disuelto.

La Figura 5.3.6 muestra la tendencia de OD para los diferentes tipos de aguas. Como en el caso de la planta tiene un comportamiento muy similar. Al inicio de la molienda la concentración de oxígeno disuelto es elevada, al ir transcurriendo la molienda, el oxígeno presente en la pulpa está siendo consumido por el mineral.

Con respecto a los diferentes tipos de aguas, en la gráfica 5.3.6 observamos que las aguas frescas son las que contienen más oxígeno disuelto al inicio de la prueba, posiblemente esta sea la causa por la que en la gráfica 5.3.5 se observa que estas aguas favorecen más las reacciones de oxidación anódica de la galena y las de media celda.

En la gráfica 5.3.7., se observa que la demanda de oxígeno disuelto (DOD) varía dependiendo del tipo de agua que se utilice. Cuando se utilizan aguas frescas la demanda de oxígeno es mayor que cuando se utilizan aguas de proceso. Esta diferencia en la demanda de oxígeno se debe a que en las aguas frescas al inicio de la prueba tienen mayor cantidad de oxígeno disuelto que las aguas de proceso, y por lo tanto pueden disponer de él los minerales.

Cuando el agua de proceso es tratada con 2 g/l de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  tiende a comportarse como agua fresca para la demanda de oxígeno. Esta tendencia a comportarse como agua fresca se puede atribuir al aumento de superficies de mineral libres de  $\text{CaSO}_4$ , por lo que, al haber mayor cantidad de mineral disponible, habrá mayor consumo de oxígeno.

El comportamiento de la temperatura se observa en el gráfico 5.3.8. La tendencia a ascender de las temperaturas se puede atribuir a la energía calorífica generada por la fricción, así como al desprendimiento de calor como una contribución de las reacciones exotérmicas de oxidación que se están llevando a cabo en la pulpa.

Los perfiles de las variables que determinan las propiedades químicas de la pulpa obtenidos en las pruebas realizadas en el laboratorio, muestran en general los mismos comportamientos que los mostrados para la planta en la sección 5.2.1, indicándonos con esto la importancia de la utilización del molino Magotteaux, por la reproducibilidad de las pruebas hechas en el laboratorio acercándose a las condiciones de la planta, dándonos confianza en los resultados obtenidos. Además, al igual que en la planta, nos muestra que la medición de las variables de la química de la pulpa reflejan la evolución de los diferentes cambios termodinámico en las superficies de los minerales y en la pulpa.

### **5.3.2.2. Química de la pulpa en flotación.**

En las pruebas de flotación se registraron el  $E_h$ , pH, oxígeno disuelto (OD) y temperatura (T), al inicio y al fin de la prueba, observándose comportamientos semejantes en la mayoría de las pruebas. A continuación se presentan los resultados.

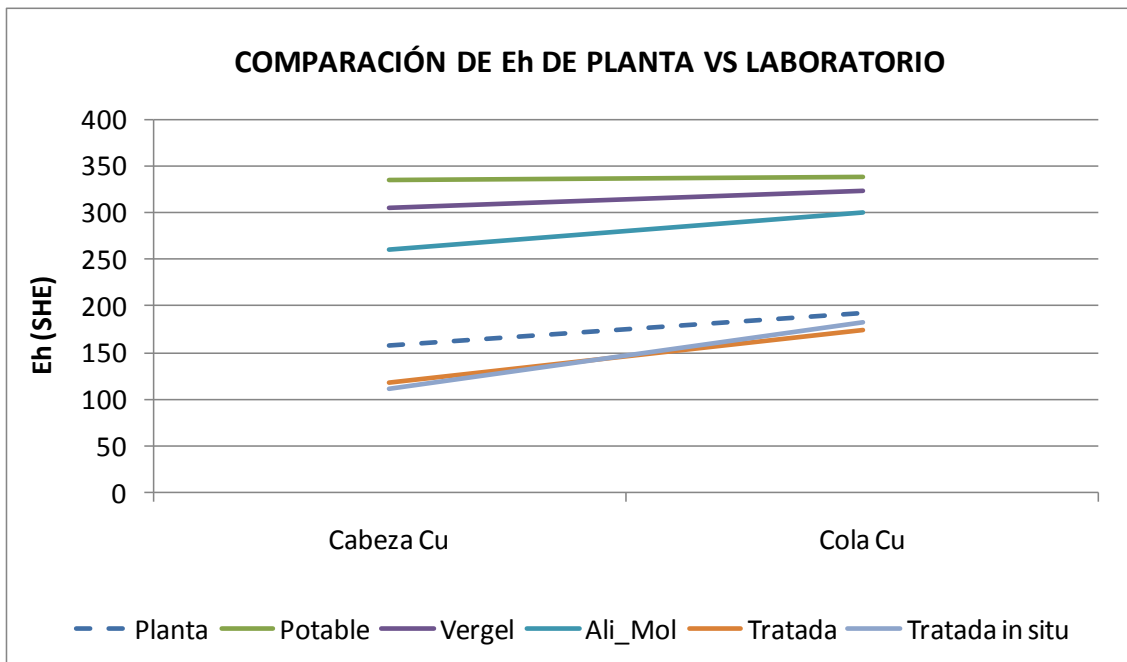


Figura 5.3.9. Comportamiento de  $E_h$  durante la flotación en el laboratorio y en la planta.

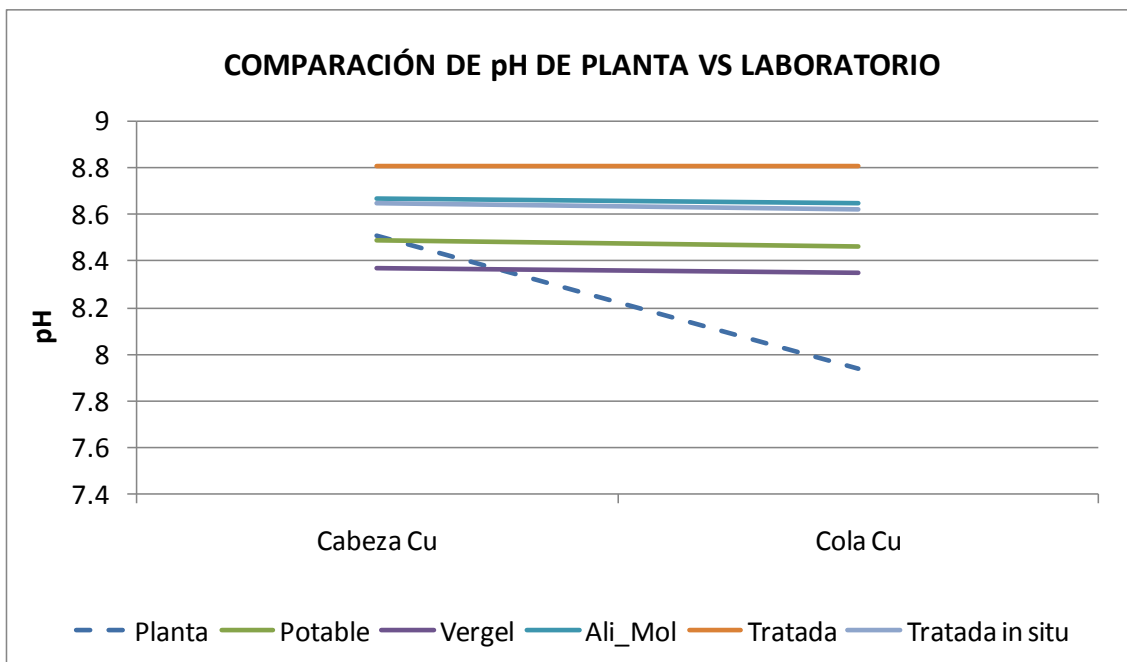


Figura 5.3.10. Comportamiento de pH durante la flotación en el laboratorio y en la planta.

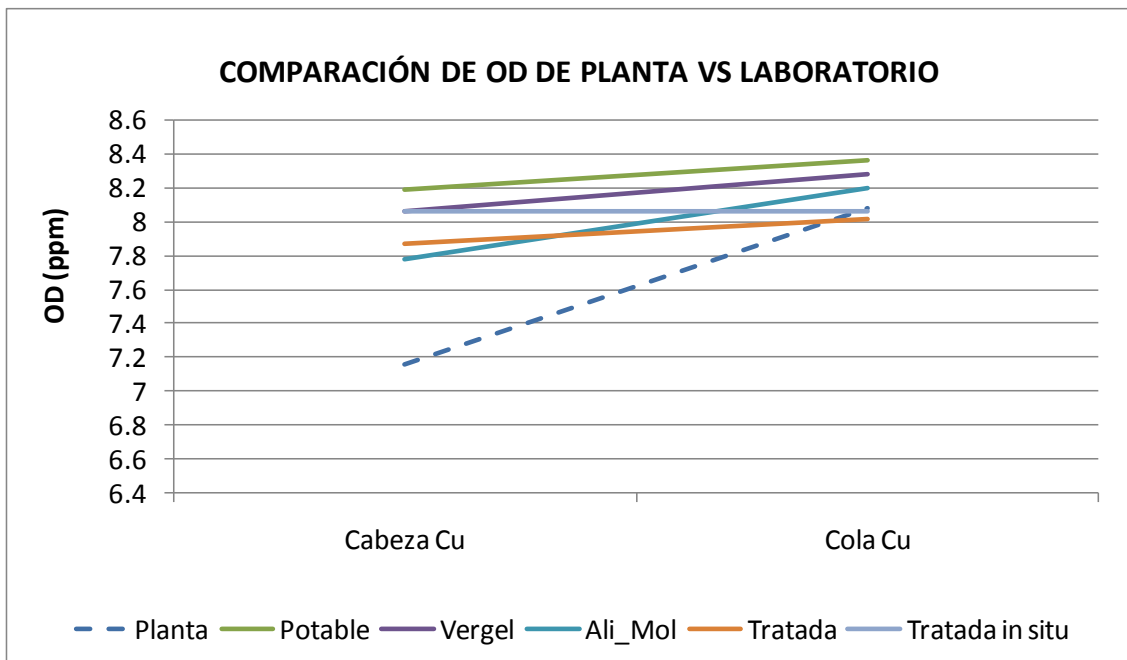


Figura 5.3.11. Comportamiento de oxígeno disuelto durante la flotación en el laboratorio y en la planta.

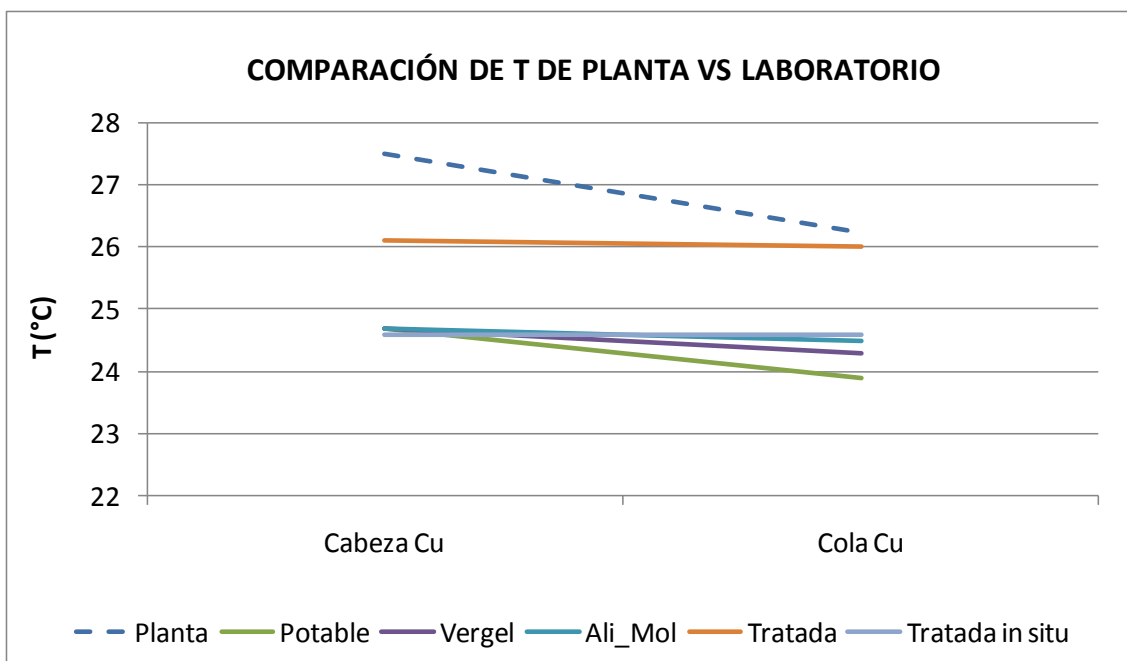
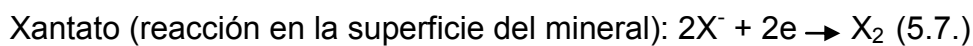
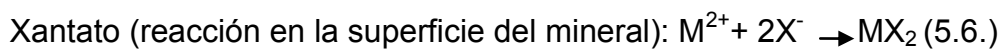
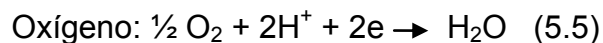
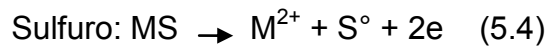


Figura 5.3.12. Comportamiento de temperatura durante la flotación en el laboratorio y en la planta.

En la Figura 5.3.9, se observa que las aguas frescas y la que se alimenta a los molinos muestran valores de potencial ( $E_h$ ) más altos con respecto a los del resto de las aguas, indicándonos que con estas aguas la pulpa contiene agentes oxidantes, como oxígeno disuelto. Potenciales bajos significa ausencia de agentes oxidantes o presencia de agentes reductores como bisulfito ( $\text{HSO}_3^{2-}$ ), sulfuro ( $\text{S}^{2-}$ ), cianuro ( $\text{CN}^-$ ). Es importante que haya agentes oxidantes presentes porque son los que promueven la reacción entre colectores y los sulfuros, por ejemplo para el xantato:



Si no hay quien consuma los electrones que libera el mineral al oxidarse, entonces no se producen los iones  $\text{M}^{2+}$  que reaccionarían con el xantato para formar la especie hidrofóbica  $\text{MX}_2$ ; tampoco se formaría el dixantógeno ( $\text{X}_2$ ).

El comportamiento de pH ilustrado en la gráfica 5.3.10, se debe a que en la etapa de flotación domina la reacción de oxidación de la pirita (esto se menciono antes en la sección 5.2.1), de acuerdo a lo reportado por Rumball y Richmond (1996), representado por la reacción:



Donde observamos aumento en la concentración de iones hidrógeno y por consecuencia disminución en el valor de pH.

La gráfica 5.3.11 nos presenta escaso consumo de oxígeno disuelto debido a que la oxidación superficial de las partículas minerales ha llegado al equilibrio. Esto nos indica que no hay oxidación ó es muy poca durante la flotación.

Por último, la gráfica 5.3.12 presenta un ligero descenso de temperaturas, indicándonos enfriamiento de la pulpa debido al aire que se inyecta.

Los comportamientos presentados de las propiedades químicas de la pulpa en las pruebas realizadas en el laboratorio, muestran en general los mismos perfiles que los mostrados para la planta, indicándonos nuevamente la importancia de la reproducibilidad de las pruebas hechas en el laboratorio, al asemejarse a las condiciones de la planta, lo cual aumenta la confianza en los resultados obtenidos.



### 5.3.3. Pruebas del laboratorio.

Las pruebas del laboratorio se presentan en cuatro etapas: En la primera el objetivo fue mostrar la variabilidad de resultados que se dan haciendo la misma prueba, usando el mismo suministro de agua, en este caso fue agua de proceso. En la segunda, el objetivo fue identificar las corrientes de agua y las especies que podrían causar efectos adversos a la flotación del circuito de cobre. En las últimas 2 etapas el objetivo fue reducir los efectos adversos de las especies identificadas en la segunda etapa, causantes de que el agua de proceso tenga influencia significativa en los resultados de la operación.

#### 5.3.3.1. Primera etapa de la investigación. Pruebas preliminares.

El objetivo de estas pruebas es demostrar que cuando se realizan las pruebas con las mismas condiciones (reactivos, agua, mineral y tiempos) en el laboratorio, hay una variación en los resultados causada por el agua que se utiliza.

Las pruebas se realizaron con agua de proceso (agua tomada del laboratorio de la Planta 2). Las aguas empleadas se identificaron de la siguiente manera:

- Proceso 1. Muestra de agua tomada el día 20 de agosto y las pruebas se realizaron el mismo día.
- Proceso 2. Muestra de agua tomada el día 21 de agosto y las pruebas se realizaron el mismo día.
- Proceso 3. Muestra de agua tomada el día 20 de agosto y las pruebas se realizaron el día 22 de agosto. La importancia de guardar la muestra de agua y realizar pruebas después, se hace con el fin de identificar si hay algún cambio significativo en el agua que se almacena, que en consecuencia cause cambios en los resultados metalúrgicos.

Como se puede apreciar las muestras que se identificaron como agua de proceso 1 y agua de proceso 3, son la misma agua, solo cambia la fecha en que se utilizaron.

El mineral utilizado en las pruebas fue el mismo para todo el estudio, los ensayos se presentaron en la sección 4.5.3 Tabla 4.5.1. El esquema de reactivos que se empleó se presentó en la Tabla 4.5.2 de la sección 4.5.3.

A continuación se presentan los resultados de los análisis de aguas, las gráficas grado-recuperación, las gráficas de selectividad y la gráfica de recuperación de mineral en función del tipo de agua empleada.

Muestra	Ag (mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)	Ca (mg/L)	pH
Proceso 1	0.41	0.14	0.77	81.42	0.27	672	9.7
Proceso 2	0.08	0.14	0.28	55.73	0.21	707	8.9
Proceso 3	0.24	0.02	0.18	78.3	0.13	633	8.5

Tabla 5.3.2. Resultados de los análisis de las aguas de proceso con las que se realizaron las pruebas preliminares. El Cu y Ca presentan altas concentraciones en todas las muestras.

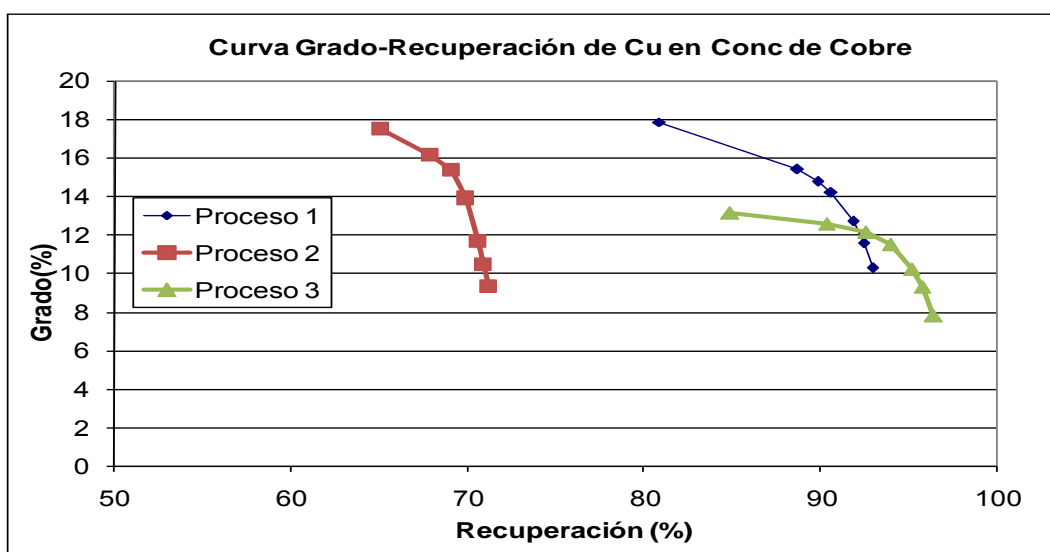


Figura 5.3.13. Curvas grado vs recuperación para el cobre en el concentrado de cobre con las diferentes aguas de proceso.

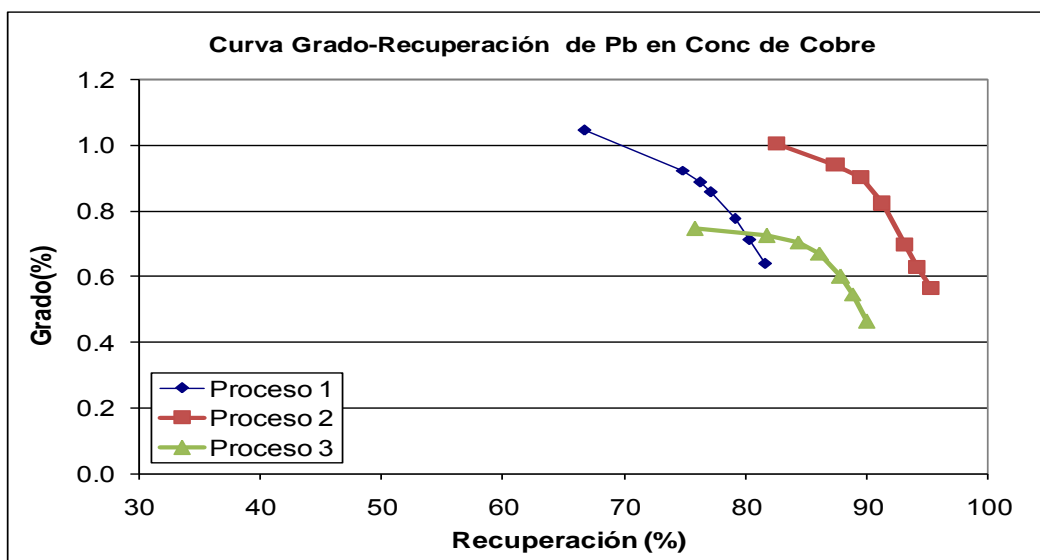


Figura 5.3.14. Curvas grado vs recuperación para el plomo en el concentrado de cobre con las diferentes aguas de proceso.

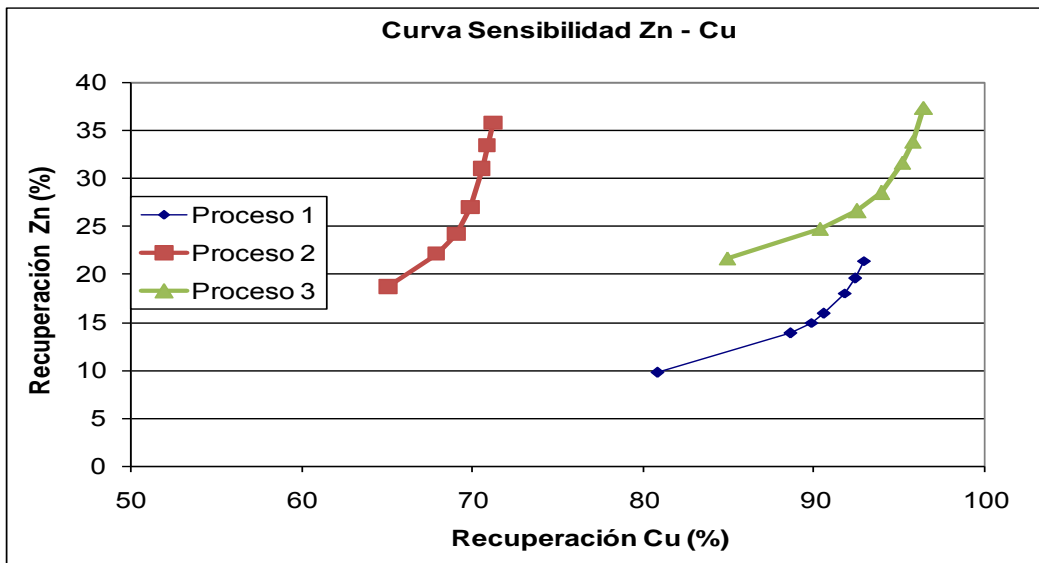


Figura 5.3.15. Curvas de selectividad para el zinc en el concentrado de cobre con las diferentes aguas de proceso.

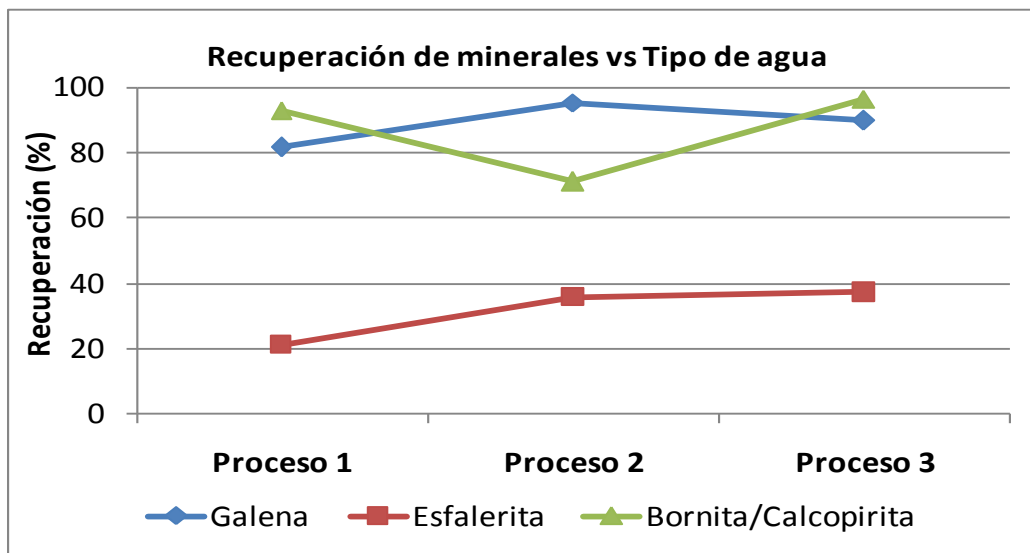


Figura 5.3.16. Recuperación de las diferentes especies minerales con respecto al agua de proceso empleada.

Como podemos observar de la Figuras 5.3.13 a la Figura 5.3.16 los resultados para cada uno de los elementos (Cu, Pb y Zn) son diferentes.

Durante este trabajo, cuando en las figuras o en el análisis de resultados nos referimos al Cu, en realidad nos estamos refiriendo a los minerales de cobre. Para Sabinas el cobre se encuentra como bornita ( $Cu_5FeS_4$ ) y calcopirita ( $CuFeS_2$ ), en una proporción de 25% bornita y 75% calcopirita.

De manera semejante para el Pb, cuando nos referimos al Pb en las figuras o en el análisis de resultados nos estamos refiriendo a la galena ( $PbS$ ) y cuando nos referimos al Zn nos referimos a la esfalerita ( $ZnFeS$ ), con sus diferentes

cantidades de hierro en su estructura cristalina que van desde 3 hasta el 14%, para los cálculos de conversión a minerales se considera el valor de la media, el cual es de 7.2%.

Con respecto al Fe, no se considero en el estudio porque determinar su contenido es muy complejo, debido a que el Fe se encuentra presente en la calcopirita, bornita, esfalerita, pirita, pirrotita y arsenopirita y la variabilidad de su composición es muy grande; por esta razón el Fe no es un buen indicador, además de que su separación no es fácil de llevar a cabo.

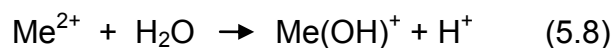
En la Tabla 5.3.2 se observa que el agua de Proceso 2 tiene una concentración de Ca de 707 ppm y relacionando este dato con la Figura 5.3.13 observamos que la recuperación de los minerales de Cu con esta agua, fue la más baja con respecto a las aguas de Proceso 1 y 3, que contienen una concentración de Ca de 672 y 633 ppm respectivamente. Por esa razón, se plantea que posiblemente la concentración de Ca en las diferentes aguas de Proceso empleadas, afectó las recuperaciones de los minerales de Cu.

Para la galena observamos que el pH posiblemente tiene efecto en sus recuperaciones, ya que a pH alto se obtiene una recuperación baja.

Para la esfalerita se observa que la concentración de Cu en las aguas posiblemente tiene influencia en su recuperación. En la Figura 5.3.15 se aprecia que con las aguas que contiene mayor concentración de Cu se obtienen recuperaciones considerables de esfalerita.

Por lo antes mencionado, los factores de las aguas que posiblemente contribuyen a la variación de los resultados metalúrgicos son el pH y la diferencia en la concentración de especies.

Al utilizar el agua del mismo suministro, no se esperarían cambios en el pH de las aguas, lo cual sí sucede. El valor de pH disminuye tendiendo a la neutralidad (Tabla 5.3.2.). Al existir diferencia de pH en las aguas, la concentración de especies también cambia. Es interesante destacar que el pH del agua tiende a disminuir con el tiempo, una posible causa se puede atribuir a la oxidación de las tiosales y otra posible causa se puede deber a la interacción de las especies metálicas iónicas con el agua, la reacción que se produce se llama hidrólisis y forma hidróxidos metálicos, la hidrólisis se ve favorecida a pH con tendencia alcalina. Al efectuarse la hidrólisis de metales se liberan iones hidrógeno los cuales tienden a bajar el valor del pH. El mecanismo de reacción para un metal divalente se muestra a continuación:



Las hidrólisis de las especies iónicas causa el cambio en el pH y en la concentración de especies en el agua. Esto se manifestó en la primer muestra de agua colectada, al momento de tomarla se preparó para enviarla ensayar y se obtuvieron los datos del agua de Proceso 1, Tabla 5.3.2. Parte de la muestra de agua se dejó almacenada, al analizar el agua 2 días después la concentración de las especies baja, así como el pH. Esto se presenta en los resultados de los análisis de las aguas mostrados en la Tabla 5.3.2 para el agua identificada como Proceso 3.

El obtener resultados diferentes en las muestras de agua (pH, concentraciones de especies) y en las pruebas realizadas con estas en el laboratorio, fue el motivo que generó el interés para investigar qué efectos tienen los diferentes suministros de aguas de la Planta 2 en la flotación, con el fin de analizarlos y determinar cuál de estas corrientes y cuales especies químicas tienen influencia determinante en la flotación del circuito de cobre. Los resultados obtenidos de este estudio se presentan en las siguientes secciones.

### **5.3.3.2. Segunda etapa de investigación. Identificación de aguas y especies.**

La segunda etapa de la investigación tiene como objetivo identificar las aguas y las especies que tienen un efecto importante en la flotación de cobre. En esta etapa se realizaron 16 pruebas, con 8 tipos de aguas diferentes. Las pruebas se realizaron por duplicado para cada tipo de agua para garantizar la reproducibilidad de las pruebas; el esquema de reactivos que se utilizó está en la Tabla 4.5.2 de la sección 4.5.3.

A continuación se muestran los resultados en el siguiente orden: análisis químico, gráficas grado-recuperación, gráficas de selectividad y gráfica de extracción de iones disueltos.

MUESTRA	Ag (mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)	Ca (mg/L)
Potable	0.02	0.19	0.24	0.1	0.08	10
Vergel	0.02	0.09	0.16	0.14	0.14	91
Noria	0.03	0.02	0.33	2.69	0.39	584
Mina	0.02	0.1	1.22	0.05	0.05	705
Presa 3	0.03	0.05	0.13	4.26	0.23	616
Piletas	0.08	0.07	0.09	66.55	0.37	954
Alimentación molinos	0.04	0.15	0.04	18.9	0.01	691
Dilución molinos	0.05	0.15	0.14	19.24	0.67	687

Tabla 5.3.3. Concentraciones de las diferentes especies metálicas presentes en las aguas que se emplearon para las pruebas. Los iones Cu tienen una concentración considerable en las aguas de la pileta y en las que entran a los molinos en la alimentación y en la dilución. Los iones de Ca también tiene concentraciones considerables en la mayoría de las aguas a excepción de las aguas del vergel y potable.

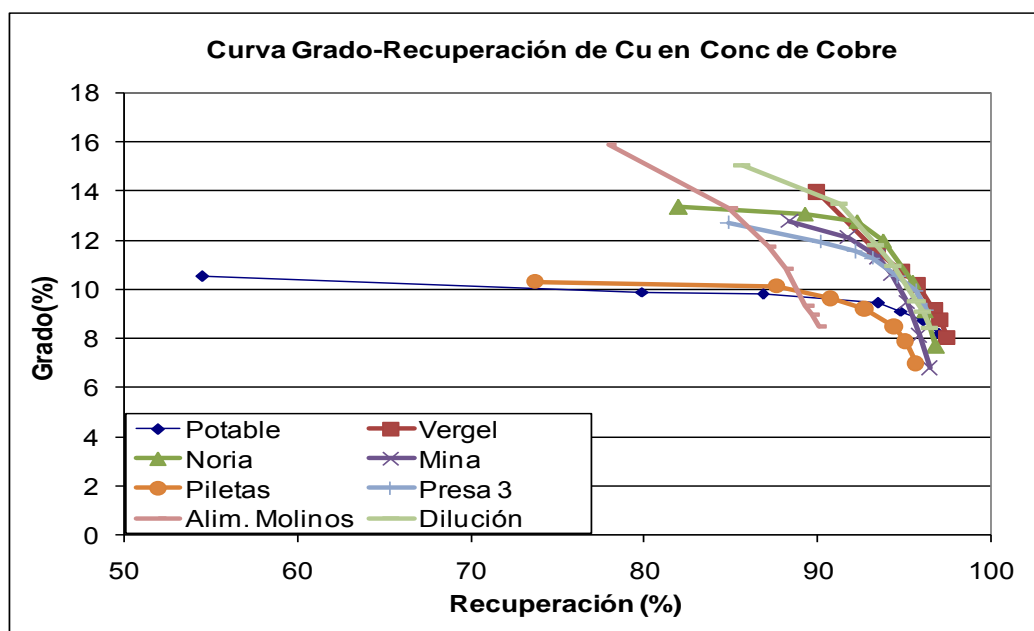


Figura 5.3.17. Curva grado-recuperación del cobre en el concentrado de cobre para los 8 suministros de agua evaluados. Aunque los minerales de cobre presentan recuperaciones similares con la mayoría de las aguas, tienden a tener mejor respuesta y recuperación con las aguas frescas, destacando entre ellas el agua del vergel. Con las aguas que los minerales de cobre tienen menor respuesta y recuperaciones bajas, son con el agua que se recupera de la pileta y el agua que se alimenta a los molinos.

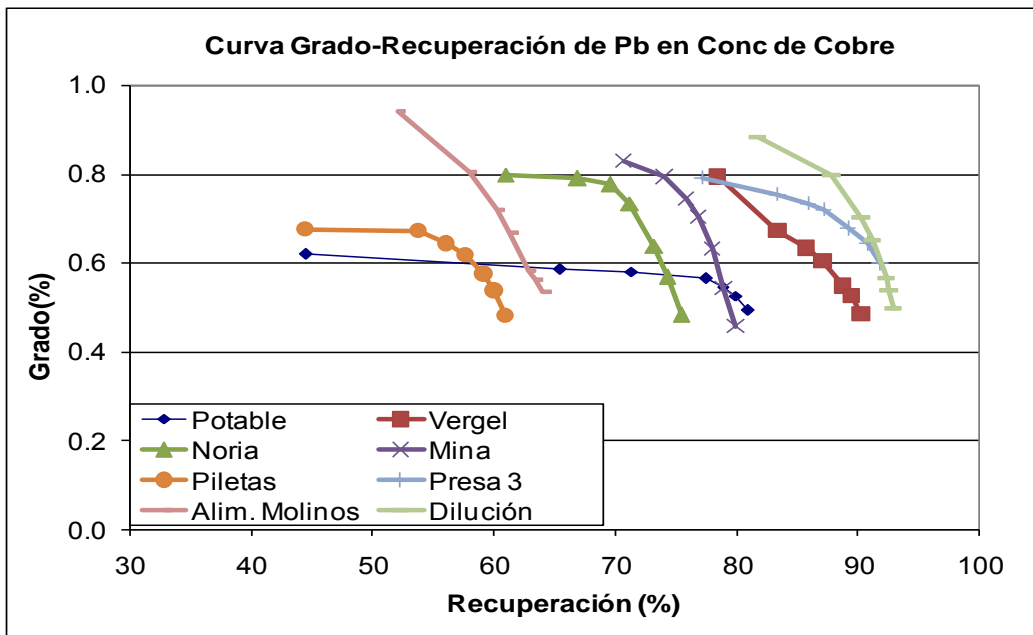


Figura 5.3.18. Curva grado-recuperación del plomo en el concentrado de cobre para los 8 suministros de agua en estudio. La recuperación de Pb es muy variada en los 8 suministros de agua. En general se observa que con las aguas que contiene menos concentraciones de Ca se obtiene la mejor respuesta y las recuperaciones más aceptables de Pb, y las aguas con elevada concentración de Ca muestran baja respuesta y recuperaciones bajas de Pb.

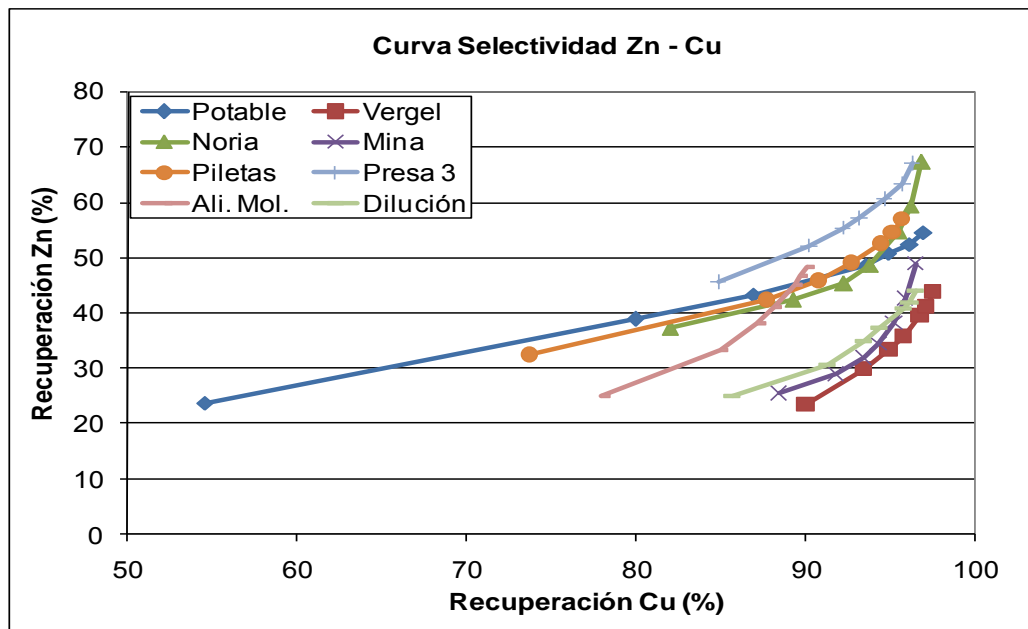


Figura 5.3.19. Curva selectividad del zinc con respecto al cobre en el concentrado de cobre para los 8 suministros de agua en estudio. Las recuperaciones de Zn en el circuito de Cu con todas las aguas son altas, esto muestra que la depresión no se está llevando a cabo adecuadamente. Con el agua que se observa mayor selectividad es con el agua del vergel y con la que hay menos selectividad es con el agua que se recupera de la presa 3.

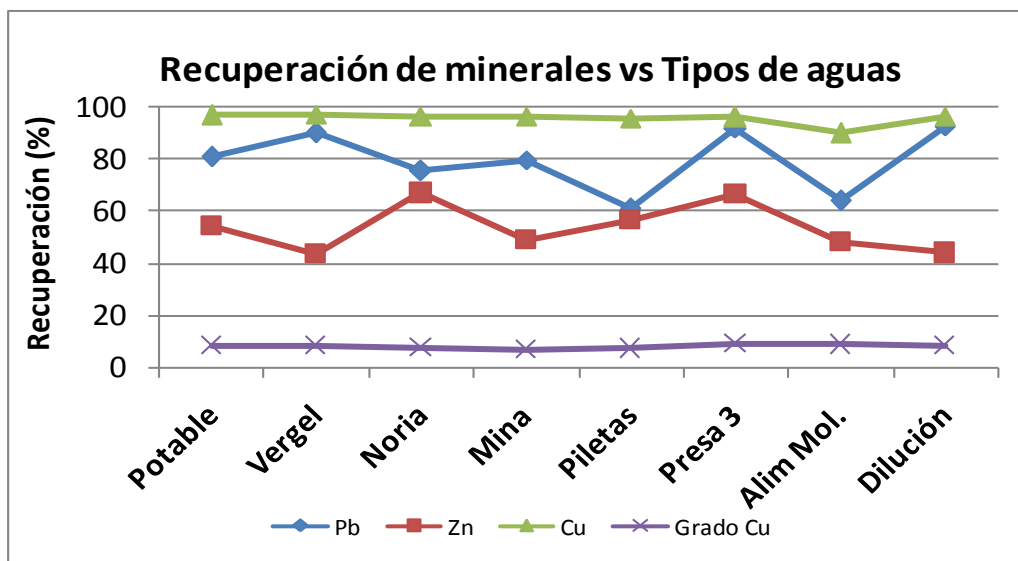


Figura 5.3.20. Recuperación total de los minerales en el circuito de cobre contra tipo de agua. En resumen, el agua del vergel muestra los mejores resultados, buenas recuperaciones de Cu y Pb y bajas recuperaciones de Zn. El agua que se alimenta en la dilución de los molinos se asemeja mucho a los resultados del agua del vergel. El agua que se alimenta a los molinos es la que más nos afecta en los resultados, bajas recuperaciones de Cu y Pb y altas recuperaciones de Zn. El agua de las piletas se asemeja a los resultados del agua que se alimenta a los molinos. El grado de Cu en el concentrado de Cu se afecta poco al cambiar el tipo de agua.

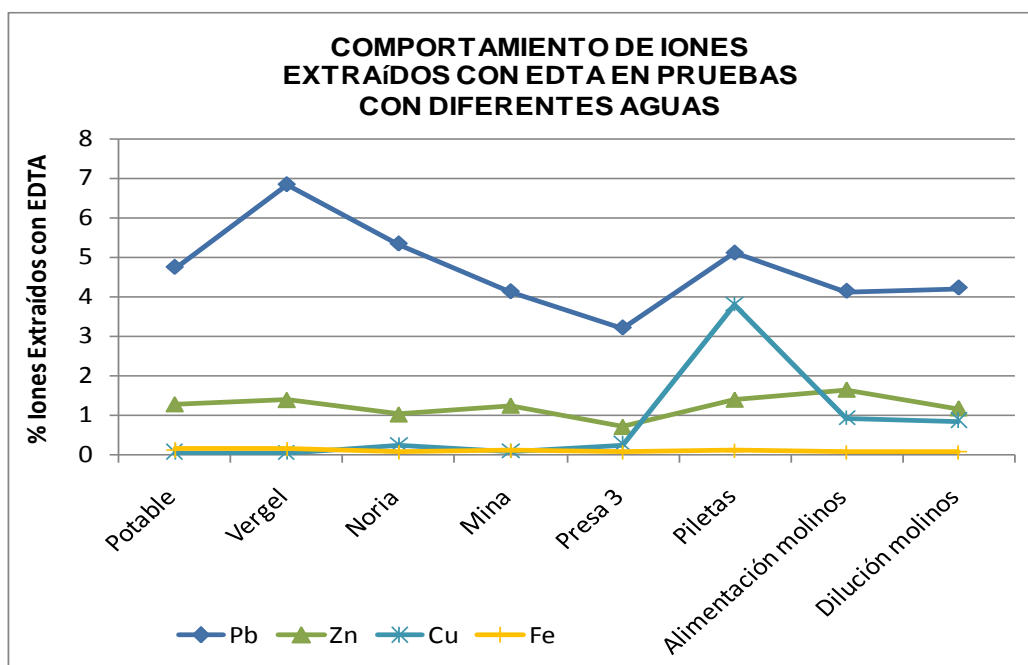


Figura 5.3.21. Porcentaje de metales presentes como especies oxidadas extraídas con EDTA. El Pb manifestó mayor porcentaje de oxidación, seguido por la esfalerita y en menor porcentaje el Cu. El Cu presenta oxidación elevada con las aguas que contienen concentraciones considerables de Cu.



Las recuperaciones, grados y respuesta de los minerales de Cu son muy similares para la mayoría de los diferentes tipos de aguas empleadas. Esto significa que algunos tipos de agua afectan a estos minerales.

La galena mostró más sensibilidad al cambio de agua. La baja recuperación de la galena, se puede explicar en base al análisis de las aguas y en base a los resultados de la investigación realizada por Grano y colaboradores en 1995, donde el  $\text{Ca}^{2+}$  junto con el  $\text{SO}_4^{4-}$  precipitan sobre la superficie del mineral en forma de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), formando una capa sobre la superficie del mineral impidiendo la adsorción del colector.

El análisis de extracción de especies oxidadas con EDTA sustenta lo investigado por Grano. Del análisis obtenemos, que la galena es el mineral que se oxida en mayor porcentaje (Figura 5.3.21). La rápida oxidación de la galena se debe a su bajo potencial de reposo, esto significa que es un buen consumidor de oxígeno.

La oxidación de la galena se favorece en aquellas aguas que no contienen especies “consumidoras” de oxígeno disuelto (e.g,  $\text{CN}^-$ ,  $\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-}$ ,  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ , etc.) que compitan con ella. Ejemplo: Agua del Vergel.

La esfalerita se recupera considerable en el circuito de cobre con todas las aguas, lo cual se puede deber a varios factores: exceso de colector, presencia de iones cobre en el agua, pobre liberación entre esfalerita y minerales de cobre y el pH adecuado para su activación (Figura 5.3.20).

En resumen, del análisis antes descrito los factores que tienen influencia en la flotación son: el exceso de colector, la presencia de iones cobre, calcio y sulfato así como el pH. Estos factores se relacionaron con cada tipo de agua y con la recuperación, grado y respuesta de los minerales de interés.

De acuerdo a lo anterior, se proponen las siguientes aguas para continuar con la investigación:

- Agua potable. Es el agua que tenemos de referencia en la investigación.
- Agua del vergel. Fue el suministro de agua con el que se consiguieron los mejores resultados (Figura 5.3.20) en las pruebas realizadas en esta etapa de investigación.
- Agua que alimenta a los molinos. Fue el suministro de agua con los resultados (Figura 5.3.20) más afectados en las pruebas realizadas en esta etapa de la investigación. Además esta corriente es importante para el proceso ya que es una de las que se utiliza en el acondicionamiento de la pulpa para la flotación.

### 5.3.3.3. Tercera etapa de la investigación. Ajuste de reactivos y tratamiento al agua de proceso.

El objetivo de la tercera etapa de investigación es reducir los efectos negativos que tienen las especies (colector, iones cobre, iones calcio, iones sulfato) identificadas en la etapa 2 de investigación, en la flotación del circuito de cobre.

Estos efectos se evaluarán con las aguas potable, vergel y la que se alimenta a los molinos, seleccionadas en la etapa anterior por tener influencia significativa en los resultados de la flotación en el circuito de Cu.

En esta etapa se trabaja para minimizar los efectos del colector en exceso y de los iones calcio. Las acciones que se toman son las siguientes:

- Para eliminar el colector en exceso se disminuyó la dosificación de colectores (S-8222 y A-3418) cuidando que la recuperación de cobre no se viera afectada. Para el S-8222 se hicieron varias pruebas variando la dosificación desde 17.08 g/t hasta 2.85 g/t. Para el colector A-3418 la dosificación se ajustó desde 5.41 g/t hasta 3.61 g/t.

Las últimas dosificaciones de ambos colectores fueron las que se emplearon en las pruebas que se hicieron en esta etapa.

Además se ajustó la dosificación de espumante conforme se observó el comportamiento de la flotación, quedando en 16.28 g/t.

Esto se realizó con el fin de eliminar una de las posibles causas (colector en exceso) de que el zinc pudiera estar siendo recuperado en el circuito de cobre.

- Para eliminar el efecto del ion calcio y sulfato (siguiendo la práctica realizada por Grano y colaboradores), la acción que se realizó en las pruebas fue tratar el agua que alimenta a los molinos con carbonado de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) en dos formas diferentes:
  - i. Tratar el agua con 2 g/L de carbonado de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) antes de realizar las pruebas. Esta dosificación se determinó en base a resultados de pruebas realizadas antes al agua que se alimenta en molienda, las cuales se describen en la sección 5.4.
  - ii. Tratar el agua con 0.66 g/L (equivalente en la planta a 2 L/min ó 188 g/t) de carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ); preparando una solución al 7% y agregarla antes de comenzar la molienda (tratamiento in situ), para simular las condiciones actuales de la Planta.

En base a lo anterior, las pruebas que se realizaron en esta etapa del estudio fueron 5, con sus respectivos duplicados; el esquema de reactivos utilizado es el mostrado en la Tabla 4.5.2. Las muestras se identificaron como:

- Agua Potable.
- Agua Vergel.
- Agua de alimentación a molinos. Esta corriente se utilizó de 3 formas:
  - Sin tratamiento. Identificada en las gráficas como Ali\_Mol
  - Pre-tratando el agua con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (2 g/L). Identificada en las gráficas como Tratada.
  - Tratamiento in situ. Antes de agregar el agua a los molinos se agrega  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  en solución al 7% (0.66 g/L). Identificada en las gráficas como Tratada in situ.

A continuación se presentan los resultados en el siguiente orden: análisis químico, gráficas grado-recuperación, gráficas de selectividad y gráfica de extracción de iones disueltos.

MUESTRA DE AGUA	Ag (mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)	Ca (mg/L)	pH
Potable	0.01	0.35	0.54	0.28	0.23	7	7.97
Vergel	0.01	0.43	0.59	0.11	0.23	31	7.88
Alimentación molinos	0.03	0.38	0.57	21.67	0.04	697	8.41
Tratada	0.02	0.33	0.46	21.28	0.02	55	9.85

Tabla 5.3.4. Resultados del análisis químico a las aguas utilizadas en la etapa tres de la investigación. Las pruebas se realizaron con 5 tipos de aguas, aunque en la tabla solo se muestran 4 porque una de ellas es tratada in situ, por esa razón, el resultado para el agua que alimenta a los molinos es el mismo que para el agua tratada in situ. En la tabla observamos que las concentraciones de calcio son elevadas para el agua que se alimenta a los molinos También se observa una significativa disminución del calcio cuando esta agua es tratada con carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Las concentraciones de cobre son considerables para el agua que se alimenta a los molinos y la tratada. El pH se observa ligeramente alcalino para el agua que entra a los molinos, pero para el agua tratada el pH es alcalino, como era de esperar al agregar el carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ).

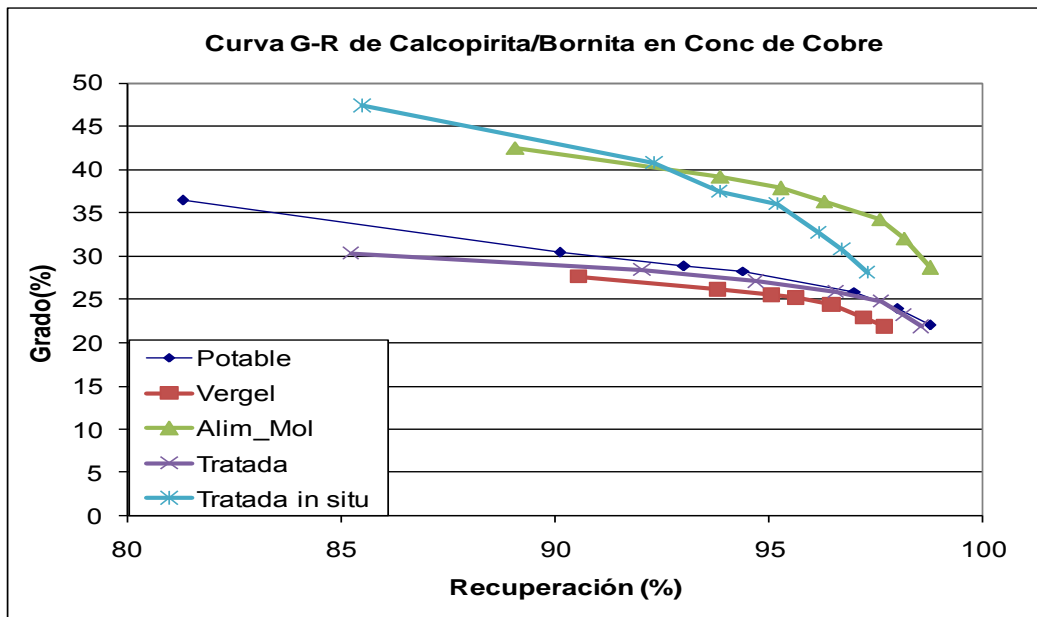


Figura 5.3.22. Curvas grado-recuperación de minerales de cobre en el concentrado de cobre para los 5 suministros de agua en estudio. Los minerales de cobre tienen una respuesta favorable con el agua del vergel, además se obtienen aceptables recuperación de cobre con todas las aguas. Las pruebas que se realizaron con el agua alimentada a molinos y la tratada in situ, alcanzan un mayor grado con respecto a las otras aguas. Otro aspecto que se puede observar en esta gráfica, es que cuando el agua se trata con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  tiende a comportarse como agua fresca.

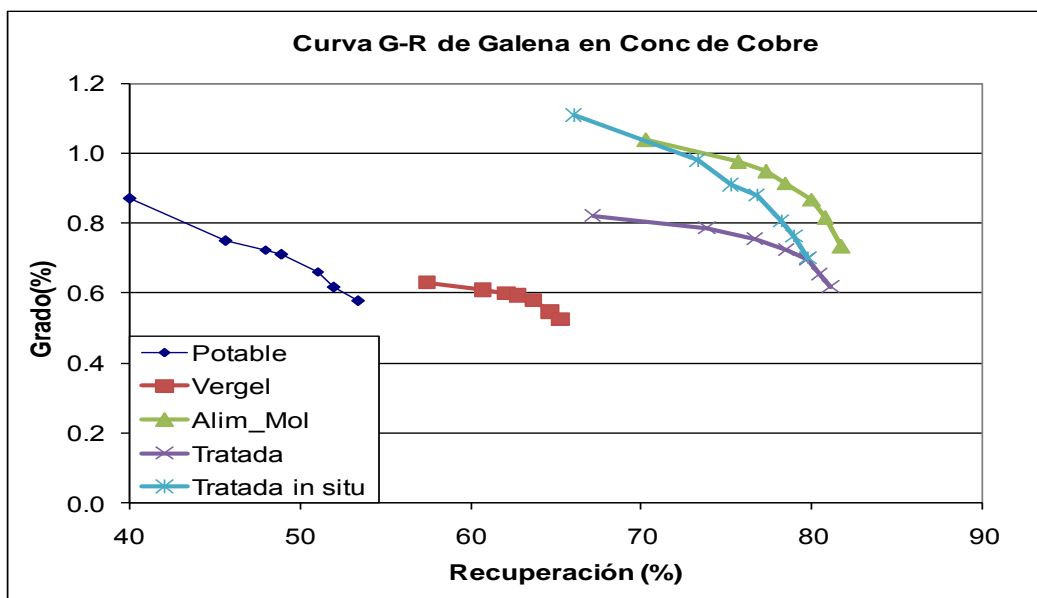


Figura 5.3.23. Curvas grado-recuperación de la galena en el concentrado de cobre para los 5 suministros de agua en estudio. Las pruebas efectuadas con aguas frescas (potable y vergel) producen bajas recuperaciones y con el agua que se alimenta a los molinos, la tratada y la tratada in situ, se obtiene aproximadamente un 15% más de recuperación. Al igual que en la gráfica anterior, al tratarse el agua tiende a comportarse como agua fresca.

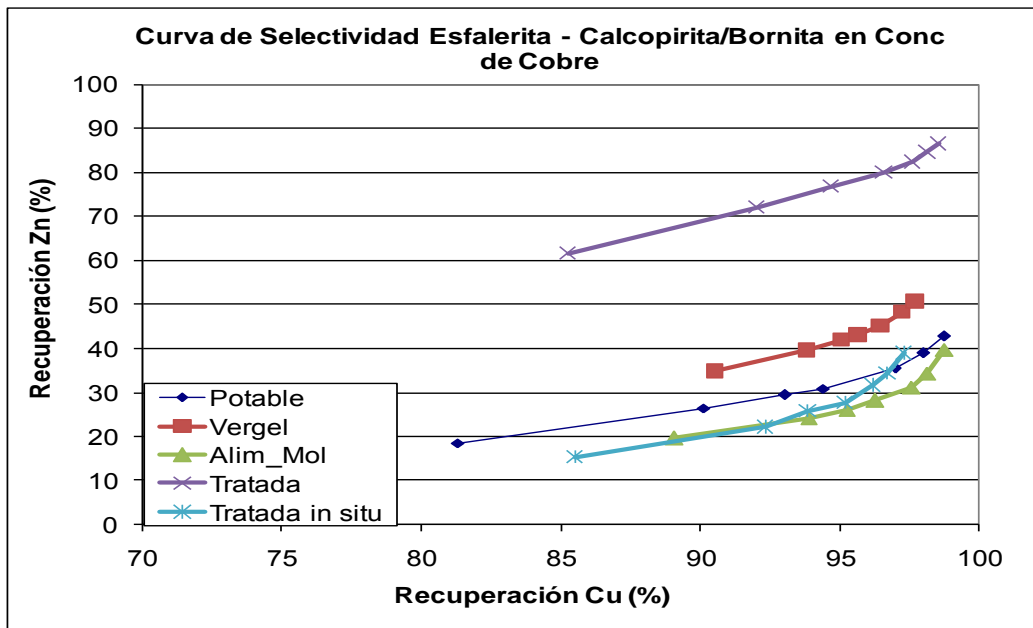


Figura 5.3.24. Curvas de selectividad de la esfalerita en el concentrado de cobre para los 5 suministros de agua en estudio. La esfalerita con todas las aguas se recupera considerablemente en el circuito de cobre y en mayor porcentaje con el agua tratada, debido a la ausencia de precipitación de yeso, con esta agua no hay selectividad. Para el caso de la esfalerita el agua sin tratar es la que muestra la mejor selectividad.

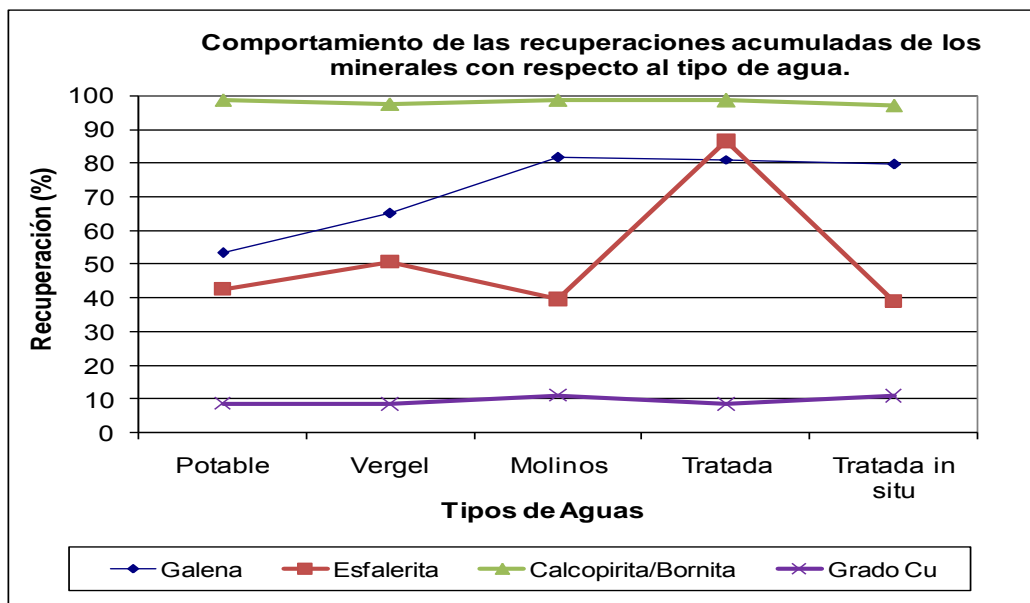


Figura 5.3.25. Recuperación de las diferentes especies minerales con los diferentes tipos de aguas que se utilizaron. Los minerales de cobre se favorecen en su recuperación con todas las aguas, después la galena, y por último la esfalerita. Con respecto a la esfalerita se observa un cambio significativo con el agua tratada, esto se puede deber a un pH adecuado para la flotación del zinc, a la ausencia de ion calcio ( $Ca^{2+}$ ) que pudiera precipitar en forma de yeso en la superficie de la esfalerita ó que no ha sido agregada la suficiente cantidad de  $ZnSO_4$  para deprimirla. Los grados de Cu obtenidos son similares con todas las aguas.

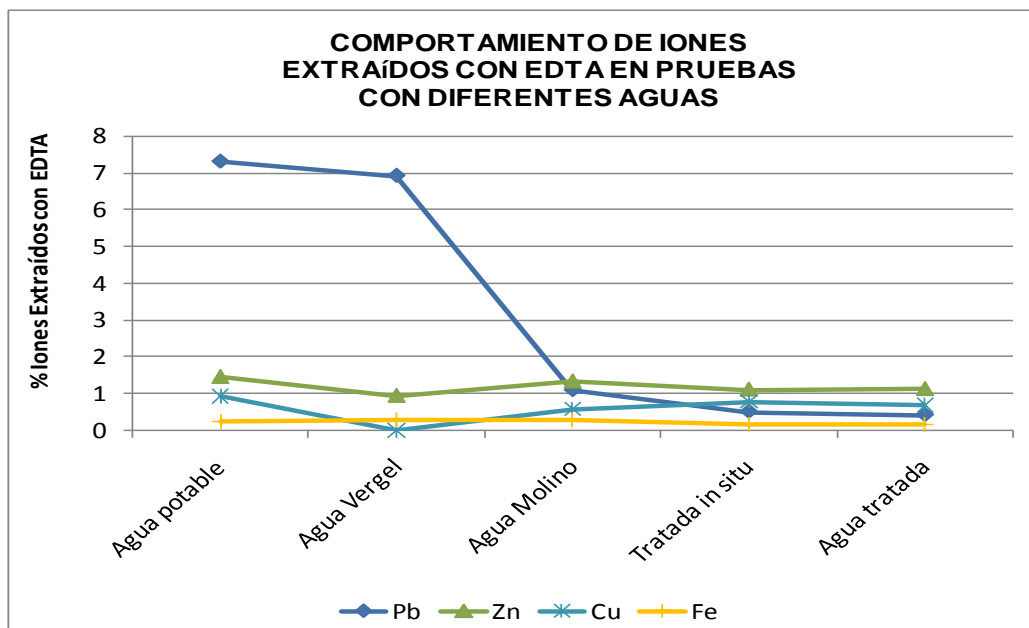


Figura 5.3.26. Porcentaje de metal oxidado de las diferentes especies minerales para las diferentes aguas empleadas en las pruebas. La galena es el mineral que más se oxida. La mayor oxidación de la galena en las aguas potable y vergel se debe a la ausencia de especies consumidoras de oxígeno que compitan con ella por el oxígeno disuelto.

De los resultados presentados podemos comentar que con el agua potable y con la del vergel (solo se les ajustó dosificación de colector) se observa que los minerales de cobre tienen resultados aceptables, mientras que para la galena y la esfalerita se tienen resultados malos. Una causa posible de obtener resultados malos con la galena, se pueden atribuir a la oxidación excesiva de este mineral (Figura 5.3.26), esto causa que se deprima. Otra causa se puede atribuir a la pureza del agua, ya que al carecer de impurezas facilita la flotación de otros minerales (esfalerita), bajando la recuperación de los minerales de valor y aumentando la recuperación de los minerales de bajo valor.

Con el agua que se alimentan los molinos se obtuvieron los mejores resultados para todos los minerales. Esto se puede deber al pH del agua, adecuado para la flotación del circuito de cobre, así como al ajuste de los colectores y espumante.

Por último, con las aguas tratadas se observa lo siguiente:

- Reducción en la concentración de Ca en el agua de proceso. Tabla 5.3.4.
- Al tratar el agua de proceso tiende a comportarse como agua fresca (Figuras 5.3.22. y 5.3.23). Una posible causa de este comportamiento, puede ser la reducción de los iones Ca en las aguas tratadas, al reducirse la concentración del Ca se reduce a la vez la formación de yeso ( $\text{CaSO}_4$ ) y por

lo tanto la precipitación de esta especie sobre la superficie de los minerales de valor es escasa y la flotabilidad de los minerales se asemeja a cuando se usan aguas con pocas impurezas.

- Aumento en las superficies de mineral libres de yeso (Figura 5.3.25), ocasionando una flotación poco selectiva (Figuras 5.3.24) y en consecuencia los minerales de interés flotan indistintamente.
- El pH tiende a incrementarse.

En el caso particular de la esfalerita se observan altas recuperaciones con el agua tratada, esto se puede deber a las siguientes posibles causas: pH adecuado para la flotación del zinc, presencia de iones cobre en las aguas de proceso que favorecen la activación del zinc (Coetzer y colaboradores, 2003), baja dosificación de sulfato de zinc ( $ZnSO_4$ ) al molino y a la dosificación de carbonato de sodio ( $Na_2CO_3$ ), el cual también mejora la flotabilidad de la esfalerita al evitar la precipitación de yeso sobre ella.

Como observaciones finales de esta etapa de pruebas se comenta lo siguiente:

- El ajuste a la dosificación de colectores y espumante mostró que las recuperaciones de los minerales no se afectaron; por lo tanto, el ajuste que se hizo a la dosificación es el adecuado.
- Al tratar el agua de proceso con  $Na_2CO_3$  se observaron bajas concentraciones de Ca, aumento en las superficies de los minerales libres de yeso, aumento en el pH y una flotación poco selectiva, en especial con la esfalerita.

Los beneficios que se producen al tratar el agua de proceso, no se ven reflejados en los resultados metalúrgicos por la falta de selectividad; razón por la cual se propone otra etapa de pruebas, la cual consistirá en efectuar las pruebas con las mismas corrientes de agua, ajustando la dosificación de sulfato de zinc ( $ZnSO_4$ ), con el fin de aumentar la selectividad del agua tratada respecto a la esfalerita.

#### **5.3.3.4. Cuarta etapa de la investigación. Depresión de esfalerita.**

El objetivo de esta etapa de investigación es aumentar la selectividad en el circuito de cobre, aumentando la dosificación de sulfato de zinc ( $ZnSO_4$ ) para deprimir la esfalerita; con el fin de identificar los beneficios que se pueden obtener al tratar el agua de proceso.

Para la cuarta parte del estudio se ajustó la dosificación de sulfato de zinc ( $ZnSO_4$ ) subiendo la adición de 560 g/t a 747 g/t, dado que esta es la dosificación que se tiene en la Planta 2.

En esta etapa se realizaron pruebas con las mismas corrientes de agua que en la etapa tres, con la misma metodología y con la diferencia en el esquema de reactivos (Tabla 4.5.2.), en el ajuste a la dosificación de sulfato de zinc ( $ZnSO_4$ ).

A continuación se presenta los resultados de esta etapa en el mismo orden en que se han venido presentando en las secciones pasadas.

<b>MUESTRA DE AGUA</b>	<b>Ag (mg/L)</b>	<b>Pb (mg/L)</b>	<b>Zn (mg/L)</b>	<b>Cu (mg/L)</b>	<b>Fe (mg/L)</b>	<b>Ca (mg/L)</b>	<b>pH</b>
Potable	0.01	0.30	0.35	0.49	0.32	7	7.11
Vergel	0.01	0.31	0.34	0.59	0.42	23	7.10
Alimentación molinos	0.07	0.29	0.69	38.69	0.01	408	8.71
Tratada	0.08	0.24	0.62	37.46	0.08	42	9.28

Tabla 5.3.5. Resultados del análisis químico de las aguas. Los resultados obtenidos de esta etapa de la investigación son muy parecidos a los obtenidos en el análisis químico de agua de la tercera etapa. Se observa una concentración considerable de iones de cobre en el agua que se alimenta a los molinos, así como una concentración alta de iones calcio. Al tratar esta agua con carbonato de sodio ( $Na_2CO_3$ ), la concentración de iones calcio baja considerablemente. Al igual que en la etapa anterior el agua tratada tiene una considerable concentración de iones Cu.



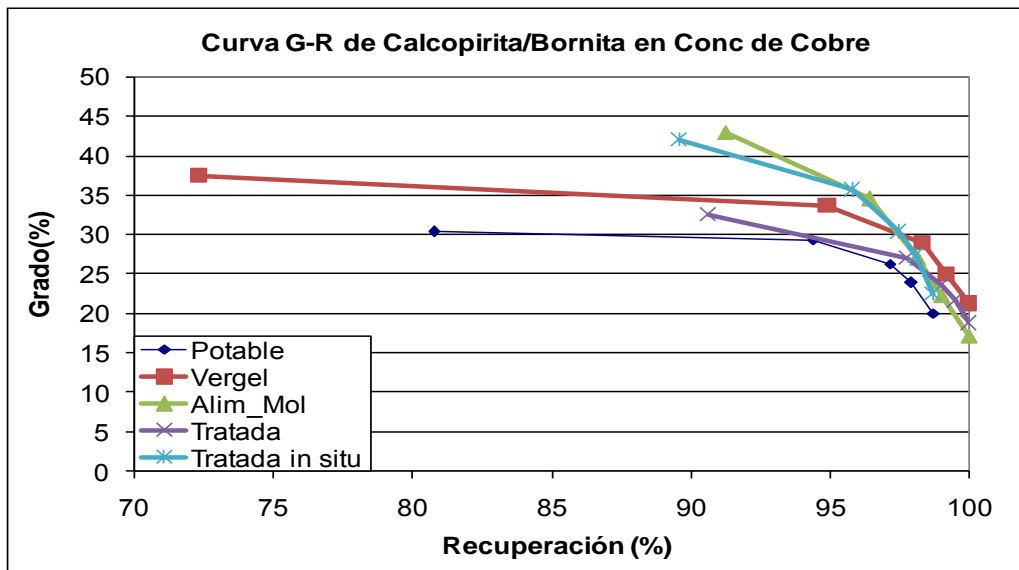


Figura 5.3.27. Curvas grado-recuperación de los minerales de cobre en el concentrado de cobre para los 5 suministros de agua en estudio. La respuesta es buena de los minerales de cobre con el agua que se alimenta a los molinos, La recuperación de cobre es buena con todas las aguas. El grado es ligeramente mayor con las aguas alimentación al molino y con la tratada in situ.

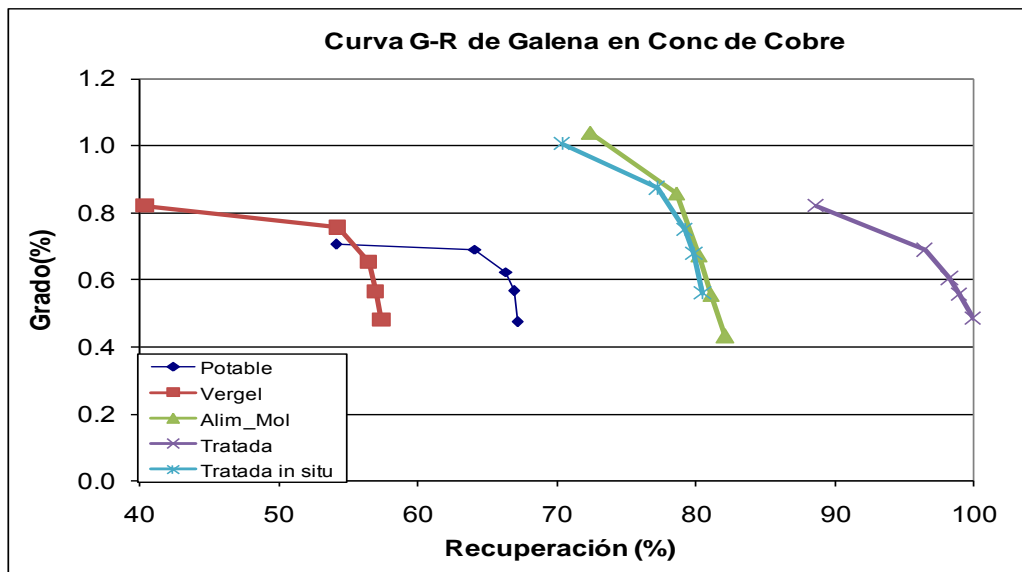


Figura 5.3.28. Curvas grado-recuperación de la galena en el concentrado de cobre para los 5 suministros de agua en estudio. Las pruebas que se realizaron empleando aguas frescas dan como resultado bajos grados y recuperación; y baja respuesta a la flotación. Con el agua que se alimenta al molino y con la tratada in situ se obtienen resultados más altos en grado, recuperaciones y respuesta a la flotación que con los de aguas frescas. Con el agua tratada con carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) la recuperación y la respuesta a la flotación son mejores que con las otras aguas, lo que nos indica que con el agua tratada en la pulpa hay una concentración mínima de yeso ( $\text{CaSO}_4$ ). Esto demuestra que el carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) está actuando aceptablemente sobre el ion calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ).

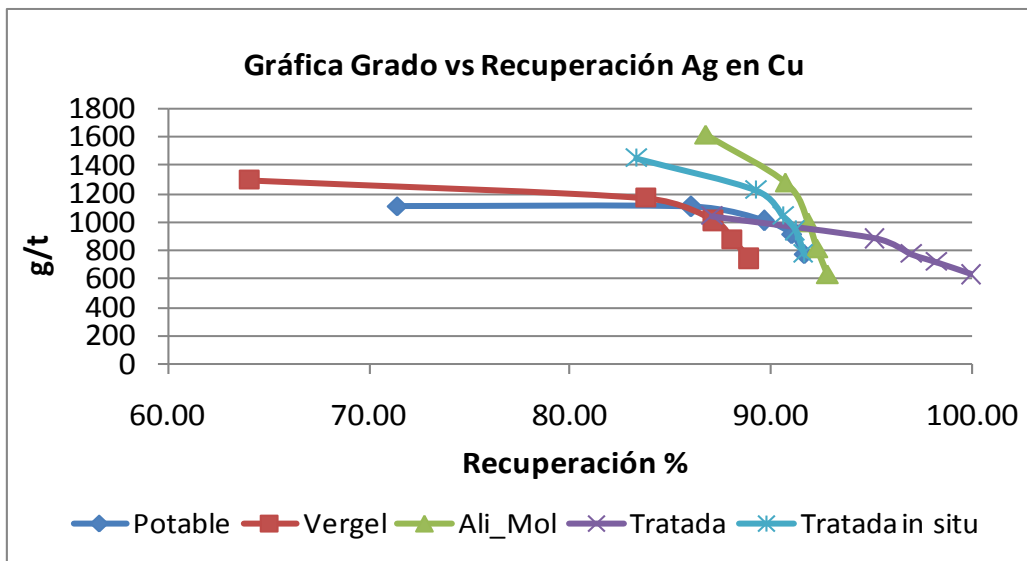


Figura 5.3.29. Curvas grado-recuperación de las especies de plata en el concentrado de cobre para los 5 suministros de agua en estudio. Las aguas frescas tienen las recuperaciones más bajas de plata seguidas por el agua tratada in situ y el agua alimentada a los molinos. El agua tratada con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  alcanza la recuperación de plata más elevada. Comparando lo anterior con la gráfica de la galena (Fig. 5.3.28), observamos que las recuperaciones finales para cada tipo de agua tienen el mismo orden aunque los comportamientos son diferentes. Esta comparación nos indica que parte del mineral de plata que está asociado con la galena, se beneficia con la misma tendencia con que se beneficia la galena.

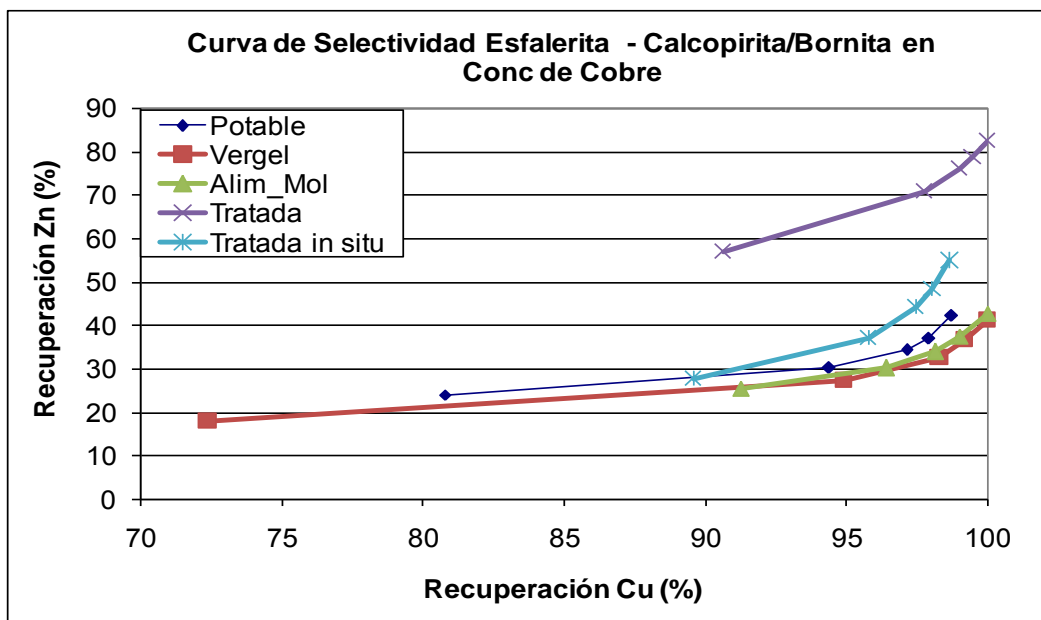


Figura 5.3.30. Curvas de selectividad de la esfalerita en el concentrado de cobre para los 5 suministros de agua en estudio. Con todas las aguas el zinc se recupera de manera importante en el circuito de cobre, a pesar del ajuste en la dosificación de sulfato de zinc ( $\text{ZnSO}_4$ ) al molino. Además se observa que el agua tratada sigue siendo la menos selectiva.

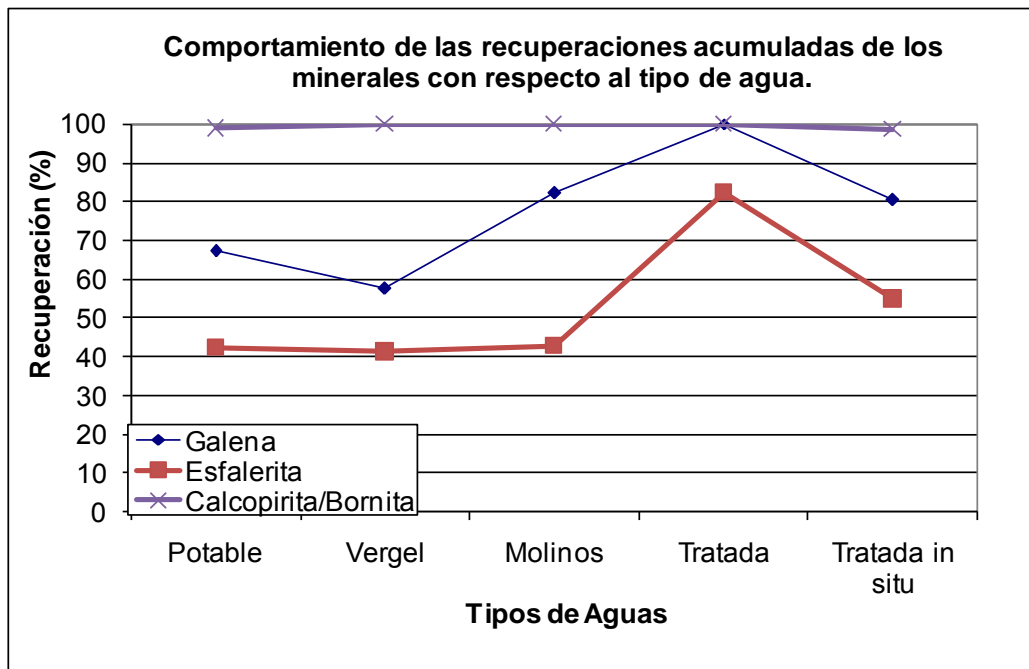


Figura 5.3.31. Representación gráfica de la recuperación de las distintas especies minerales con los diferentes tipos de aguas que se utilizaron. En esta gráfica se observa un mayor beneficio para la galena con el agua tratada; sin embargo, el inconveniente con esta agua es que se sigue favoreciendo la recuperación de zinc.

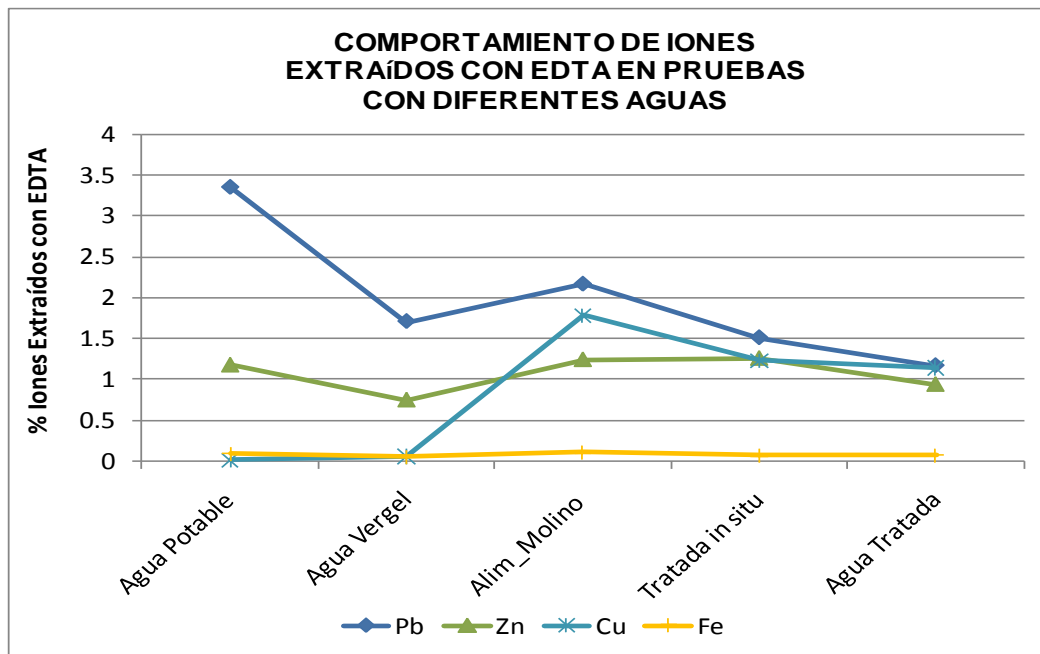


Figura 5.3.32. Porcentaje de metal oxidado en las diferentes especies minerales y para las diferentes aguas empleadas en las pruebas. La galena es el mineral que más se oxida con todas las aguas, principalmente con las aguas frescas, como se ha venido comentando en las secciones anteriores.

Las observaciones finales de esta etapa de la investigación son las siguientes:

- Los minerales de Cu responden prácticamente de la misma manera a los diferentes tipos de aguas. La falta de sensibilidad del cobre a las especies presentes en el agua se debe a los minerales de cobre. La calcopirita y la bornita tienen valores de potencial de reposo mayores que el de la galena (Leja, 2004); esto significa que estos minerales son más nobles y se oxidan menos que la galena. Por esa razón es de esperar que los efectos de carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) sean menores con estos minerales.
- La galena es el mineral que más se beneficia en su recuperación con el agua tratada con carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), lo que nos indica que el calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) está precipitando con el carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), evitándose de esta manera la precipitación de sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) en la superficie de este mineral, favoreciendo la adsorción del colector sobre el mineral.
- Al observarse mejoras para la recuperación de la galena se observan también beneficios para los minerales de plata asociados a este mineral.
- La esfalerita se recupera de manera considerable en la flotación del circuito de cobre, esto se debe a que su superficie se encuentra libre de yeso ( $\text{CaSO}_4$ ) debido a la adición de carbonato de sodio, a que las especies de cobre presentes en el agua que alimenta al molino la activan, y al aumento del pH debido a la dosificación de carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ).
- Al ajustar la dosificación de sulfato de zinc ( $\text{ZnSO}_4$ ) se observa que la selectividad mejora muy poco. La causa por la que la selectividad no mejora significativa (con respecto a la esfalerita) se puede atribuir a que existe una considerable concentración de iones Cu en el agua de proceso.

### 5.4. Pruebas complementarias.

Se realizaron un par de pruebas para completar lo más posible la información del estudio realizado. La primera prueba que se presenta es relacionada al grado de oxidación del mineral que se empleó y la segunda se relaciona con la dosificación de carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) al agua que se alimenta a los molinos.

#### 5.4.1. Grado de oxidación del mineral.

Esta prueba se realiza con el objetivo de determinar qué grado de oxidación alcanza el mineral con el que se llevaron a cabo las pruebas. Esta prueba es efectiva para determinar la oxidación en los sulfuros de plomo, zinc y fierro,

principalmente. La prueba se realizó conforme lo indica el procedimiento de determinación del grado de oxidación de un mineral presentado en el apéndice A.

Los resultados de dicha prueba se presentan en la siguiente Tabla:

<b>Grado de oxidación del mineral</b>						
Elementos	Ag (g/ton)	Pb(%)	Zn (%)	Cu (%)	Fe (%)	As (%)
Cabeza	64.38	0.04	1.47	0.67	6.8	0.75
Ensaye	0.02	2.84	3.67	0.33	10.75	1.98
Extracción		8.88	0.31	0.06	0.20	

Tabla 5.4.1. Presenta el grado de oxidación de cada mineral en la muestra que se empleó para las pruebas.

Los resultados nos indican que el mineral que está más oxidado en nuestra muestra es la galena, después es la esfalerita, seguido por los minerales de hierro, mientras que los minerales con menor oxidación son los de cobre. El orden de oxidación sigue la secuencia de acuerdo a sus potenciales de reposo. El orden va del mineral menos noble al más noble.

La cabeza de la galena para esta muestra es baja y es alto el grado de oxidación que puede alcanzar, si este mineral viene acompañado con minerales de plata su efecto es de consideración. El evitar la oxidación excesiva de este mineral se reflejará en beneficios para el proceso.

#### **5.4.2. Pruebas con carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ).**

Para determinar la dosificación más adecuada de carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), se realizaron varias pruebas variando la dosificación del carbonato al agua de alimentación al molino. La variación fue de 0 a 3 g de  $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{L}$ , dejando agitar por un tiempo de 15 minutos.

Los resultados se muestran en la siguiente Tabla:

Dosificación Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (g/L)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	Ca (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	pH (final)
0	29	643.6	1760.3	8.4
0.5	29	489.1	1754.8	8.32
0.85	29	398.7	1749.3	8.52
1	29	336.2	1743.8	8.33
1.5	29	174.7	1782.2	8.42
2	36	14.01	1746.6	9.46
2.5	156	3.03	1738.3	10.03
3	168	2.38	1738.3	10.39

Tabla 5.4.2. Concentración de iones calcio, carbonato y sulfato a diferentes dosificaciones de carbonato de sodio al agua que se alimenta a los molinos.

En la Tabla se observa la presencia de carbonato (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) en la solución hasta la dosificación de 2 g Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/L. La concentración de los iones calcio (Ca<sup>2+</sup>) baja durante todas las dosificaciones de carbonato de sodio. La presencia del carbonato en la solución nos indica que la reacción con el ion calcio se completa, es decir, la concentración del ion calcio en la solución es poca para reaccionar con el carbonato y el carbonato se empieza a presentar en la solución.

Lo anterior significa que al tratar el agua que se alimenta a los molinos con carbonato de sodio, se limpia de los iones calcio, además de incrementar el valor del pH. El aumento de pH en el circuito de cobre no es conveniente porque causaría condiciones favorables para la activación de esfalerita en esta etapa del proceso, la cual se quiere evitar.

Para obtener el agua libre de iones calcio, la dosificación adecuada es la de 2 g Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/L, por esa razón se elige esta dosificación para nuestras pruebas.

Para cuestiones operativas la dosificación de 1.5 g Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/L parece la más conveniente ya que el pH es adecuado para la flotación de cobre aunque la concentración de ion calcio es todavía de consideración.

## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **6.1. Conclusiones.**

El agua de proceso de Minera Sabinas (agua alimentada al molino y a diferentes puntos del proceso) está constituida por agua fresca proveniente de la Noria y el Vergel y por las aguas recuperadas provenientes de los espesadores de concentrados y colas y de las presas de jales.

Las especies que se encuentran disueltas en el agua de proceso de la Planta 2 de Unidad Sabinas y que afectan a la flotación son los iones Cu, Ca,  $\text{SO}_4^{-2}$  y  $\text{CN}^-$ .

La mayor presencia de estas especies en el agua de proceso (agua alimentada a los molinos) proviene del agua recuperada de los espesadores; del flujo total de agua que entra a la Planta 2, en los espesadores se recupera el 77.75%, con la siguiente distribución: Espesador de colas 80.97%, Espesador de zinc, 8.36%, Espesador de cobre, 8.17% y Espesador de plomo, 2.5%.

Los iones Cu se encuentran en mayor concentración en las aguas recuperadas de los espesadores de Cu y Pb, estos iones son generados por la adición de cianuro de sodio (NaCN) que disuelve parcialmente al mineral de cobre, bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ).

Los iones  $\text{CN}^-$  se encuentran principalmente en el agua recuperada del espesador de Cu y provienen solamente de la adición de NaCN en la etapa de separación Pb-Cu.

Los iones Ca y  $\text{SO}_4^{-2}$  se encuentran en mayor concentración en las aguas recuperadas de los espesadores de colas y de zinc. La presencia de Ca en estas aguas se puede atribuir a la cal (CaO) que se agrega en el circuito de Zn y a la disolución de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), que es el principal mineral de ganga en el mineral de valor. Los iones  $\text{SO}_4^{-2}$  provienen de la oxidación de los sulfuros minerales, así como de la adición de reactivos con  $\text{SO}_4^{-2}$  como el  $\text{ZnSO}_4$  y  $\text{CuSO}_4$ .

La metodología empleada en el proyecto nos permite observar los efectos de los iones Cu, Ca  $\text{SO}_4^{-2}$  y  $\text{CN}^-$  en la flotación del circuito de cobre.

La presencia de los iones Cu en el agua de proceso no es deseable porque causan la activación inadvertida de la esfalerita ( $\text{Zn}(\text{Fe})\text{S}$ ) en el circuito de cobre, esta activación se ve favorecida si existen condiciones alcalinas en la pulpa. Las recuperaciones altas de esfalerita, obtenidas en las pruebas realizadas en el laboratorio con el agua de proceso, reproducen los resultados de la

Planta y confirman la activación de la esfalerita por los iones Cu disueltos en el agua.

Los iones  $\text{CN}^-$  en el agua de proceso mantienen en solución a los iones Cu por medio de la formación de complejos  $\text{Cu}(\text{CN})_2^-$  y  $\text{Cu}(\text{CN})_3^{-2}$ , los cuales son estables en condiciones alcalinas.

Para evitar los efectos nocivos de los iones Cu, se puede considerar la posibilidad de enviar el agua que se recupera del espesador de Cu a la Presa de Jales. Con esta acción se podría bajar la concentración de iones Cu en el agua de proceso (agua alimentada a los molinos) a un 33% aproximadamente, se disminuiría la activación inadvertida de la esfalerita y se obtendría un concentrado de cobre menos contaminado.

Los iones Ca y  $\text{SO}_4^{2-}$  forman sulfato de calcio ó yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), ya que se encuentran a concentraciones altas y que termodinámicamente favorecen la formación de precipitados que preferencialmente se depositan en la superficie de los minerales que son más oxidables (galena), bajando su recuperación.

Con la técnica de extracción de iones con EDTA se confirmó que el mineral más susceptible a la oxidación es la galena (esto se debe a su potencial de reposo más negativo). La galena, al ser el mineral con mayor facilidad para oxidarse, es a la vez el más expuesto a ser cubierto por los precipitados de yeso.

En las pruebas de laboratorio al tratar el agua de proceso con carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), se observan beneficios vía incrementos en las recuperaciones de los minerales de valor. Dichos beneficios son más notorios para la galena, ya que al ser el mineral más susceptible a la oxidación es a la vez el mineral que más se beneficia con el agua tratada con carbonato de sodio. Lo anterior se debe a que el calcio (Ca) forma un precipitado con el carbonato ( $\text{CO}_3^{-2}$ ), evitándose de esta manera la formación de yeso y su precipitación en la superficie de la galena; favoreciendo de esta manera la adsorción del colector sobre la superficies de la galena. Al beneficiarse la galena también se benefician las recuperaciones de los minerales de plata asociados a este mineral.

Para evitar los efectos nocivos de los iones Ca, se puede continuar con la dosificación de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Con esta acción se podría lograr bajar la concentración a 175 ppm de Ca en el agua de proceso (agua alimentada a los molinos), se optimizaría el consumo de colectores y se mantendrían recuperaciones aceptables para los minerales de valor.



### 6.2. Recomendaciones.

Para el control de los iones calcio, sulfato y cobre se propone dos acciones:

- a) Para evitar los efectos negativos a la flotación del ion calcio (la formación de yeso sobre la superficie del mineral, incluye ion sulfato), se recomienda continuar con la dosificación de carbonato de sodio en la Planta 2, con el fin de disminuir la concentración de iones calcio (actualmente en promedio la concentración esta alrededor de 700 ppm) en el agua de proceso (alimentada a molinos).
- b) Para el control de iones cobre se recomienda enviar el agua recuperada del espesador de cobre a la presa de jales. Como se discutió en la sección 5.1.2., la presencia de los iones cobre en el agua que se alimenta a los molinos, proviene en mayor proporción (54.29%) del agua que se recupera de este espesador.

Si el flujo de este espesador es enviado a la Presa de jales se espera que la concentración de iones cobre en el agua que se alimenta a los molinos disminuya a concentraciones de 12 ppm con una variación de 2 a 21 ppm (actualmente las concentraciones son de 18 ppm con una variación de 4 a 32 ppm). Con esto se busca que la esfalerita se active lo menos posible en el circuito de cobre.

Para futuras investigaciones sobre la calidad del agua, se recomienda continuar con estudios enfocados en los iones cobre, calcio y sulfato, por ser estos iones los que causan efectos negativos significativos en la flotación.

**BIBLIOGRAFÍA.**

Allison, S. A., (1982). "Interactions between sulfide minerals and metal ions in the activation, deactivation and depression of mixed sulfide ores". Mintek report. 1-33.

Ayres, D. M., Davis, A. P. and Gietka, P. M. (2002). "Removing heavy metals from wastewater. University of Maryland Engineering research center report. 21.

Barry, W. A. (1997). Mineral Processing Technology. Limusa. Oxford.

Carlson, C. and Muir, W. (1975). "The role of oxygen demand in the flotation of a complex sulphine ore". Noranda research centre 263-288.

Chen, Z. and Yoon R. H. (2000). "Electrochemistry of cupper activation of sphalerite at pH 9.2". Int J Miner Process Vol 58. 58-66.

Chung, A. (2009). "Peñoles Madero: Investigating the effects of high chrome grinding media on lead and zinc flotation". Peñoles Madero. México.

Coetzer, G., du Prezz H. S. and Bredenhann, R. (2003). "Influence of water resources of metal ion on galena flotation of Rosh Pinah ore". The journal of the South African Institute of mining and metallurgy. 193-208.

Cooper, C., Bresca, R., McCallum, A. and Scealy, J. (2006). "Improving raw water use efficiency at Endeavor mine, Cobar- a case study" . Water in mining conference 41-46.

Fuerstenau, M. C. (1975). "Role of metal ion hydrolysis in oxide and silicate flotation system". AICLChE Symp. Series 150 Vol. 71. 16.

Gaudin, A.M.(1976). Flotation. Volumen 2. Institute of mining metallurgical and petroleum engineers, Inc. New York.

Gerson, A. R., Lange, A.G., Prince, K. E. and Smart R. ST. (1999). "The mechanisms of copper activation of sphalerite". Appl Surf Sci. Vol 137. 207-223.

Grano, S. R., Lauder, D. W., Johnson, N.W., and Ralston, J. (1997). "An investigation of galena recovery problems in the Hilton concentrator of Mount Isa Mines Limited, Australia". Minerals Engineering Vol. 10. 1139-1163.

Grano, S. R., Wong, P., Skinner, W., Johnson, N.W., and Ralston, J. (1995). "Detection and control of calcium sulfate precipitation in the lead circuit of the Hilton concentrator of Mount Isa Mines Limited, Australia". Proc. XIX Int. Min. Process, San Francisco Chapter 29, 171-179.

Greet, C. (2007). "The impact of high chome grinding media on pulp chemistry and flotation of lead/zinc ores". Magotteaux Australia Pty Ltd.

Greet, C. J., Kinal, J. and Mitchell, I. (2005a). "Is measuring pH Enough?" Magotteaux Australia 1-19.

Greet, C. J., Kinal, J. and Steinier , P. (2005b). "Grinding media – its effect on pulp chemistry and flotation behavior – Fact or fiction?". Centenary of flotation symposium 967-972.

Greet, C. J., Steinier, G. S. P. and Grano, S. (2003). "The Magotteaux Mill: Investigating the effect of grinding media on pulp chemistry and flotation performance". Magotteaux Australia 1-8.

Huang, G. and Grano, S. (2005). "Galvanic interaction of grinding media with pyrite and its effect on flotation". Minerals Engineering IWRI Australia. 1152-1163.

Jiménez, I. (2005). "Unidad Sabinas: Análisis Modal de concentrado de cobre". Peñoles Sabinas. México.

Johnson, N. W. (2003). "Issues in maximization of recycling of water in a mineral processing plant". Water in mining conference. 239- 245.

Kelly, E. G., and Spottiswood, D. J. (1990). *Introducción al Procesamiento de Minerales*, Limusa.

Kemmer, F. N. y McCallion, J. (2001). "Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones". Mc Graw Hill. México.

Kraeber, L. and Boppel, L. (1934). "About the effect of metal salts in the floating treatment oxidized minerals". *Metals and ore* Vol.31. 417-428.

Kuyucak, N. (2006). "Selecting suitable methods for treating mining effluents". Water in mining conference. 267-276.

Kuyucak, N. (2002). "Microorganisms in mining: Generation of acid rock drainage, its mitigation and treatment". *EJMP & EP*. 2(3).

Kuyucak, N. and Sheremata, T. (1995). "Lime neutralization process for treating acid waters". US Patent 5. 427-691.

Kuyucak, N., Payant, N. and Sheremata, T. (1995). "An improved lime neutralization process, in Proceeding Sudbury '95 mine environment conference". Canadá.

Latimer, W. M. (1952). "Oxidation potentials". Prentice-Hall. Englewood Cliffs, New Jersey.

Leja, J. (2004). "Fundamentals Surface Chemistry of Froth Flotation". Vol. 1. Klumwer Academic/Plenum Publishers, New York.

Leja, J. (1982). "Surface Chemistry of Froth Flotation". Plenum Publishers. New York.

Levay, G and Schumann, R. (2006). "A systematic approach to water quality management in the minerals processing industry". Water in mining conference. 277-287.

Levay, G., Smart, R. St. C. and Skinner, W.M. (2001). "The impact of water quality on flotation performance". The journal of the South African institute of mining and metallurgy. 69-75.

Lu, J., Dreisinger, D. B. and Cooper, W. C. (2002). "Thermodynamics of the aqueous copper-cyanide System". Hydrometallurgy 66 23-36.

Martínez, T. E. (2007). "Reporte final: Tizapa tratamiento del agua". Peñoles Tizapa. México.

Norgate, T. E. and Lovel, R. R. (2006). "Sustainable water use in Minerals and Metal production". Water in mining conference. 331-339.

Quast, K. and Hobart, G. (2006). "Marmatite depression in galena flotation". Mineral engineering 860-869.

Ralame P. (1975). Concentración de minerales por flotación. Comisión de fomento minero. México.

Rao, S. R. and Finch, J. A. (1989). "A review of water re-use in flotation". Minerals Engineering Vol. 2. 65-85.

Rumball, J. A. and Richmond, G. D. (1996). "Measurement of oxidation in a base metal flotation circuit by selective leaching with EDTA". International journal of mineral processing 1-20.

Rykl, D. (1964). "Activation and depression of galena flotation. I. The effect of heavy metals". Chem. Abstr. Vol. 61. 15703g.

Seke, M. D. and Sandenbergh, R. F. (2003). "The role of copper-cyanide species in the activation of the sphalerite: A thermodynamic approach". To be published in minerals engineering. 23.

Scheer, C. and Skerstupp, B. (2001). "Preliminary Report: Petrographic and Geochemical studies of Borehole BRN 117" Peñoles Sabinas. México.

Schumann, R., Levay, G., Dunne, R. and Hart, S. (2003). "Managing process water quality in base metal sulfide flotation". Water in mining conference. 250-259.

Snoeyink, V. L. and Jenkins D. (1998). Química del agua. Limusa.

Spira, P. and Rosenblum, F. (1974a). "Application of oxygen demand measurements to aeration design". Noranda research centre 484-505.

Spira, P. and Rosenblum, F. (1974b). "The oxygen demand of flotation pulps" Noranda research centre 73-106.

Sun, S. C. (1943). "The mechanism of slime coating". Trans. Am. Inst. Min. Eng. 153. 479-492.

Taggart, A. F. (1966). Elementos de preparación de minerales. Ediciones Interciencias. New York.

Van Niekerk, A. M., Wurster, A. and Cohen, D. (2006). "Technology advances in mine water treatment in southern Africa over 20 years". Water in mining conference 373-378.

Wang, X., Forssberg E. and Bolin, N. J. (1989). "The aqueous and surface chemistry of activation in the flotation of sulfide minerals. A review. Part II: A surface precipitation model". Miner process. Extra metal review. Vol. 4. 167-199.

Weast, R. C. and Astle, M. J. (1983). CCR Handbook of chemistry and physics. CRC Press. B-73.

## APÉNDICE A

### PROCEDIMIENTOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN

**A.1. PROCEDIMIENTO PARA MUESTREO DEL CIRCUITO DE MOLIENDA DE PLANTA 2.**

**A.2. PROCEDIMIENTO PARA EL MUESTREO DEL CIRCUITO DE FLOTACIÓN DE PLANTAS.**

**A.3. PREPARACIÓN DE MUESTRAS A GRANEL.**

**A.4. COMPOSICION QUIMICA DE AGUAS DE PROCESO.**

**A.5. MONITOREO DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE LA PULPA: pH, POTENCIAL REDOX (Eh), OXÍGENO DISUELTO (OD), DEMANDA DE OXÍGENO (DO) Y TEMPERATURA.**

**A.6. MEDICIÓN DE LA DEMANDA DE OXÍGENO DE UNA PULPA MINERAL.**

**A.7. EXTRACCION CON EDTA DE LOS IONES METALICOS CONTENIDOS EN ESPECIES OXIDADAS SUPERFICIALMENTE EN UNA PULPA MINERAL.**

**A.8. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE OXIDACIÓN DE UN MINERAL**



## **A.1. PROCEDIMIENTO PARA MUESTREO DEL CIRCUITO DE MOLIENDA DE LA PLANTA 2.**

### **Objetivo:**

Determinar las condiciones a las cuales se puede realizar el muestreo así como la preparación de las muestras y su análisis para así reportar resultados que sean confiables para su uso.

### **Material:**

Cubetas suficientes para muestras  
Cortador de muestras (cortador de pico y pie de banda).  
Bascula  
Cronometro  
Formato para muestreo  
Balanza Marcy  
Cortador Pie de banda  
Cinta masking-tape  
Marcadores

### **Seguridad:**

Tanto al realizar el muestreo como al preparar las muestras es necesario contar con su equipo de seguridad necesario para cada actividad en el caso de realizar el muestreo el equipo con el que se debe contar es el siguiente:  
Casco, botas, overol, orejeras, guantes y lentes.  
Para el caso de la preparación de estas también se necesita el respirador.

### **Metodología:**

1.- Pesar y rotular las cubetas con los flujos que se van a cortar, estos flujos son los siguientes:

Alimentación molino 1  
Descarga molino 1  
Gruesos ciclón 1  
Finos ciclón 1  
Alimentación molino 2  
Descarga molino 2  
Gruesos ciclón 2  
Finos ciclón 2  
Cabeza de flotación

2.- Antes de realizar algún movimiento para el muestreo es necesario asegurarse que el circuito de molienda se encuentre estable por lo menos una hora antes de iniciar el muestreo, las variables del circuito que deben de estar estables son las siguientes:

- Alimentación de mineral.
- Alimentación de agua. Que no haya tiradero de agua en los pisos antes y durante el muestreo.
- Niveles de las tolvas de finos.
- Tipo de mineral.
- Distribución de tamaños del mineral alimentado al molino.

3.- Ya que haya visto las condiciones anteriores y todo este en condiciones para realizar el muestreo, de aviso al supervisor y al operador de molienda de la realización del muestreo en esta área y proceda a colocar las cubetas en el área donde va a realizar los cortes.

4.- Hacer 5 cortes de muestra, de un litro de pulpa cada uno, acumulando la muestra en la misma cubeta, siguiendo el flujo del circuito durante 120 minutos, hacer los cortes al minuto 0, 30, 60, 90 y 120.

5.- Si la muestra de la alimentación al molino no se puede tomar en la descarga de la banda cortando todo el ancho de la banda, se tomará una sola vez al final del último corte, parando la banda y tomando un tramo que contenga de 30 a 40 kg. de muestra, teniendo cuidado de delimitar perfectamente los extremos. No se puede parar la banda durante la toma de las muestras pues se causa un disturbio considerable en el molino.

6.- Anotar las variables de proceso durante la toma de muestras de acuerdo al siguiente formato:

MUESTREO DEL CIRCUITO DE MOLIENDA PLANTA 2											
Fecha				Turno							
<b>Molino 1</b>											
	Hora		Hora		Hora		Hora		Hora		
Alimentación	Tonelaje	% Solidos	Tonelaje	% Solidos	Tonelaje	% Solidos	Tonelaje	% Solidos	Tonelaje	% Solidos	
Descarga											
Gruesos Ciclon 1											
Finos ciclon 1											
Presion alim a ciclon											
Potencia Molino 1 (Kw/hr)											
Pesometro											
Nivel silo 1											
Bomba que esta operando											
<b>Molino 2</b>											
	Hora		Hora		Hora		Hora		Hora		
Alimentación	Tonelaje	% Solidos	Tonelaje	% Solidos	Tonelaje	% Solidos	Tonelaje	% Solidos	Tonelaje	% Solidos	
Descarga											
Gruesos Ciclon 2											
Finos ciclon 2											
Presion alim a ciclon											
Potencia Molino 2 (Kw/hr)											
Pesometro											
Nivel silo 2											
Bomba que esta operando											
Cabeza de Flotación											
OBSERVACIONES:											

7.- Inmediatamente después de tomar las muestras tome los pesos húmedos, así como la determinación de la humedad de alimentación al molino.

8.- Filtrar las muestras y meterlas al secador para quitar el exceso de humedad, después de tener secas estas muestras pesarlas y anotar su peso, para obtener el porcentaje de sólidos.

9.- A las muestras ya secas se procede a desgrumar y homogenizar (procedimiento para desgrumar y homogenizar). Cuando ya se encuentra homogenizada la muestra se pesan 500 g de cada muestra a excepción de la muestra de alimentación de molino que se pesa 1 Kg de muestra y se procede a deslamar por la malla 325.

10.-Se deslaman las muestras agregando agua a la muestra y vaciándola en la malla 325, se recoge el material que pasa la malla en una cubeta, se identifica como “-325” y el nombre de la muestra, de igual manera el material que no pasa la malla se vacía en una charola y se identifica como “+325” y se lleva a secar.

11.- Una vez ya secas las muestras se pasa a través del juego de mallas indicadas y se pesa cada fracción anotándose en la bitácora de trabajo, después de esto se pasara a formato establecido electrónicamente para posteriormente reportarlo.

Es importante realizar su trabajo con orden y limpieza para tener resultados de calidad y sin accidentes.

MONITOREO DEL CIRCUITO DE MOLIENDA											
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO											
FECHA: _____											
FINOS CICLON MOLINO 1						FINOS CICLON MOLINO 2					
mall	micras	gr	%	% Acum +	% Acum -	mall	micras	gr	%	% Acum +	% Acum -
+ 3/8"	9500					+ 3/8"	9500				
+ 1/4	6300					+ 1/4	6300				
+10	2000					+10	2000				
+40	425					+40	425				
+60	250					+60	250				
+100	150					+100	150				
+ 140	106					+ 140	106				
+ 200	75					+ 200	75				
+ 270	53					+ 270	53				
+ 325	45					+ 325	45				
- 325						- 325					
				P <sub>80</sub> =	micras					P <sub>80</sub> =	micras
% SÓLIDOS PROMEDIO =						% SÓLIDOS PROMEDIO =					
GRUESOS CICLON MOLINO BOLAS						GRUESOS CICLON MOLINO 2					
mall	micras	gr	%	% Acum +	% Acum -	mall	micras	gr	%	% Acum +	% Acum -
+ 1/2"	12500					+ 1/2"	12500				
+ 3/8"	9500					+ 3/8"	9500				
+ 1/4	6300					+ 1/4	6300				
+10	2000					+10	2000				
+40	425					+40	425				
+60	250					+60	250				
+100	150					+100	150				
+ 140	106					+ 140	106				
+ 200	75					+ 200	75				
+ 270	53					+ 270	53				
+ 325	45					+ 325	45				
- 325						- 325					
				P <sub>80</sub> =	micras					P <sub>80</sub> =	micras
% SÓLIDOS PROMEDIO =						% SÓLIDOS PROMEDIO =					
DESCARGA MOLINO BOLAS						DESCARGA MOLINO 2					
mall	micras	gr	%	% Acum +	% Acum -	mall	micras	gr	%	% Acum +	% Acum -
+ 1/2"	12500					+ 1/2"	12500				
+ 3/8"	9500					+ 3/8"	9500				
+ 1/4	6300					+ 1/4	6300				
+10	2000					+10	2000				
+40	425					+40	425				
+60	250					+60	250				
+100	150					+100	150				
+ 140	106					+ 140	106				
+ 200	75					+ 200	75				
+ 270	53					+ 270	53				
+ 325	45					+ 325	45				
- 325						- 325					
				P <sub>80</sub> =	micras					P <sub>80</sub> =	micras
% SÓLIDOS PROMEDIO =						% SÓLIDOS PROMEDIO =					
BANDA MOLINO 1						BANDA MOLINO 2					
mall	micras	gr	%	% Acum +	% Acum -	mall	micras	gr	%	% Acum +	% Acum -
+ 1/2"	12500					+ 1/2"	12500				
+ 3/8"	9500					+ 3/8"	9500				
+ 1/4	6300					+ 1/4	6300				
+10	2000					+10	2000				
+40	425					+40	425				
+60	250					+60	250				
+100	150					+100	150				
+ 140	106					+ 140	106				
+ 200	75					+ 200	75				
+ 270	53					+ 270	53				
+ 325	45					+ 325	45				
- 325						- 325					
				P <sub>80</sub> =	micras					P <sub>80</sub> =	micras
% SÓLIDOS PROMEDIO =						% SÓLIDOS PROMEDIO =					
CABEZA DE FLOTACIÓN											
mall	micras	gr	%	% Acum +	% Acum -						
+ 3/8"	9500										
+ 1/4	6300										
+10	2000										
+40	425										
+60	250										
+100	150										
+ 140	106										
+ 200	75										
+ 270	53										
+ 325	45										
- 325											
				P <sub>80</sub> =	micras						
% SÓLIDOS PROMEDIO =											

## A.2. PROCEDIMIENTO PARA EL MUESTREO DEL CIRCUITO DE FLOTACIÓN DE LAS PLANTAS.

### Objetivo:

Determinar las condiciones a las cuales se puede realizar el muestreo así como la preparación de las muestras y su análisis para así reportar resultados que sean confiables para su uso.

### Material:

Cubetas suficientes para muestras  
Cortador de muestras (cortador de pico y noranda de 1m y 2m).  
Bascula  
Cronometro  
Cinta masking-tape  
Marcadores  
Diagrama de flujo

### Seguridad:

Tanto al realizar el muestreo como al preparar las muestras es necesario contar con su equipo de seguridad necesario para cada actividad, en el caso de realizar el muestreo el equipo con el que se debe contar es el siguiente:

Casco, botas, overol, orejeras, guantes y lentes.

Para el caso de la preparación de estas también se necesita el respirador.

### Metodología:

1.- Pesar y rotular las cubetas con los flujos que se van a cortar, estos flujos son diferentes según el muestreo a realizar, **muestreo de planta 1** que consiste en circuito de plomo, circuito de zinc y circuito de separación plomo cobre, **muestreo de planta 2** que consiste en muestrear circuito de cobre, circuito de zinc y circuito de separación plomo cobre, por tanto los flujos son diferentes. Se anexan los diagramas con puntos a muestrear.

2.- Antes de realizar algún movimiento para el muestreo es necesario asegurarse que el circuito de flotación se encuentre estable por lo menos una hora antes de iniciar el muestreo, las variables del circuito que deben de estar estables son las siguientes:

-Dosificación de reactivos.

-Alimentación de agua. Que no haya tiradero de agua en los pisos antes y durante el muestreo.

-Que no haya cambios de bombas.

- Que haya carga suficiente en los silos.

3.- Ya que haya visto las condiciones anteriores y todo este de manera favorable para realizar el muestreo, de aviso al supervisor y al operador de

flotación de la realización del muestreo en esta área y proceda a colocar las cubetas en el área donde va a realizar los cortes.

4.- Hacer 5 cortes de muestra, de un litro de pulpa cada uno, acumulando la muestra en la misma cubeta, siguiendo el flujo del circuito durante 120 minutos, hacer los cortes al minuto 0, 30, 60, 90 y 120.

5.- Es muy importante cuando se tome la muestra con el cortador de pico, que se vacíe completamente a la cubeta agitando este para que no haya sedimentación, al momento de tomar una muestra con el cortador Noranda debe verificarse que se encuentre limpio así como cuando se tenga una muestra en el, se debe lavar por fuera antes de vaciar la muestra para no contaminar esta con la espuma que se pega al cortador.

6.- Si se necesitan obtener sólidos de los flujos las muestras de concentrado se obtendrán en las tuberías de llegada a los cajones de bombeo y si no, se pueden tomar en los derrames de las canaletas, las muestras de concentrado se tomaran con cortadores de pico o con el plato y las muestras de cola se tomaran con el cortador Noranda de 1m para la planta 2 y de 2m para la planta 1.

7.- Inmediatamente después de tomar las muestras tome los pesos húmedos, y regístrelo en la bitácora (tanto el peso húmedo como el peso de la cubeta).

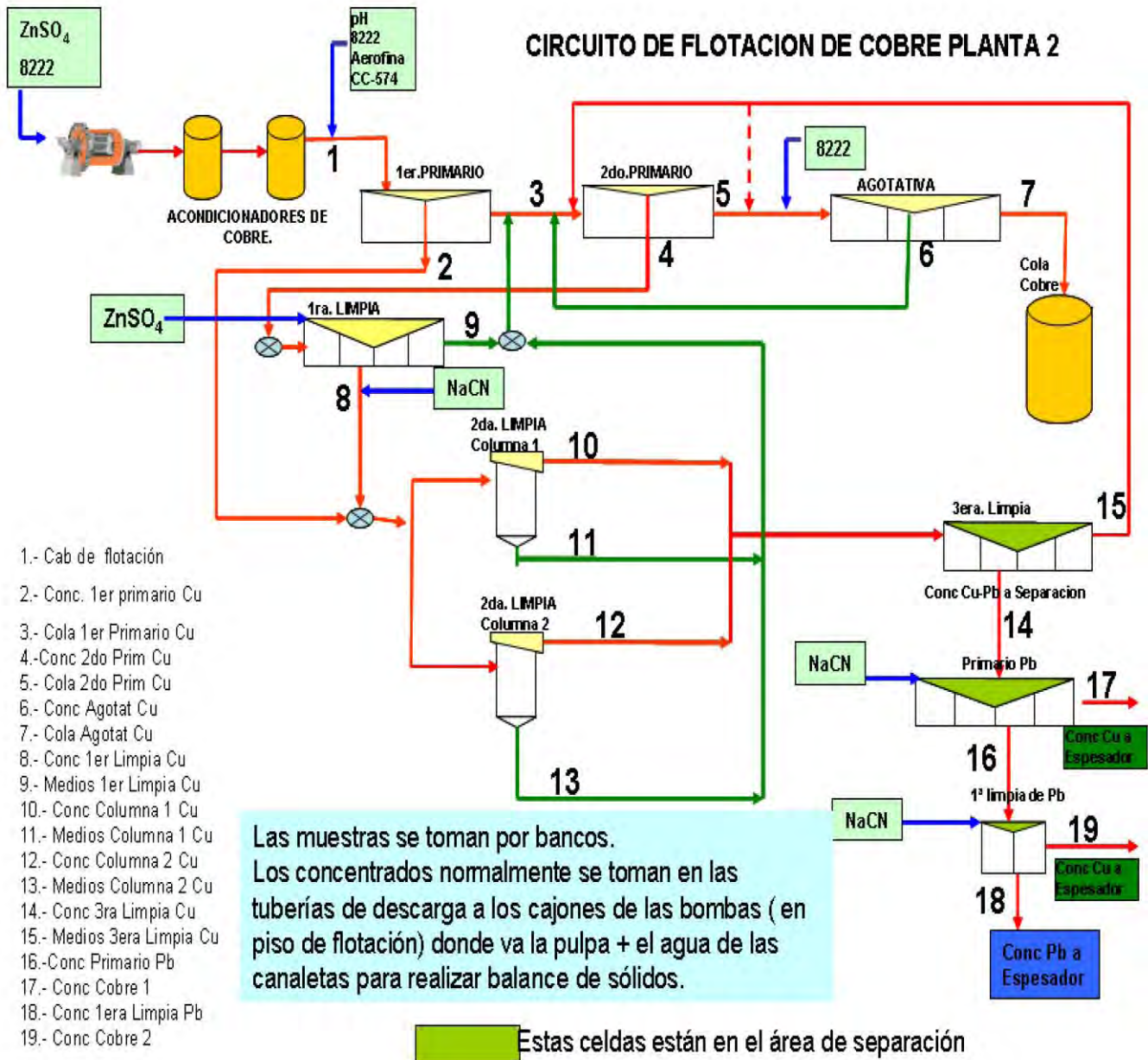
8.- Filtrar las muestras y meterlas al secador para quitar el exceso de humedad, después de tener secas estas muestras pesarlas y anotar su peso, para obtener el porcentaje de sólidos (peso seco de la muestra y peso de la charola).

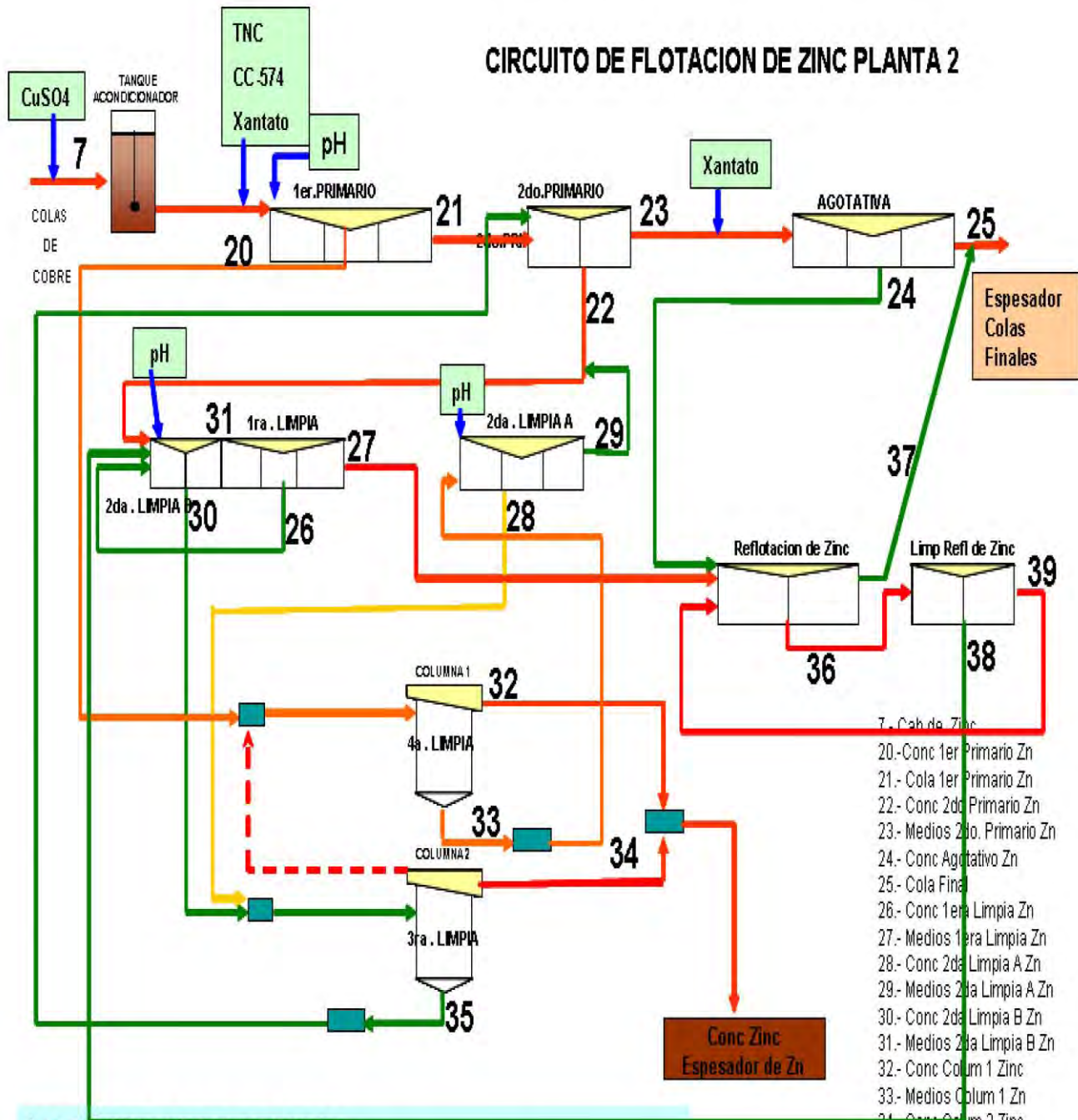
9.- A las muestras ya secas se procede a desgrumar y homogenizar (procedimiento para desgrumar y homogenizar). Cuando ya se encuentra homogenizada la muestra se procede a cuartear y obtener alrededor de 100 g. Esta muestra se mete a un sobre previamente rotulado con el nombre de la muestra.

10.- Ya que se cuente con todas las muestras en sobres se procede a pulverizar.

11.- Una vez que se tengan pulverizadas las muestras se entregan al laboratorio junto con un formato indicando el número de muestras, el nombre de cada una de ellas y los elementos a analizar.

Es importante realizar su trabajo con orden y limpieza para tener resultados de calidad y sin accidentes.





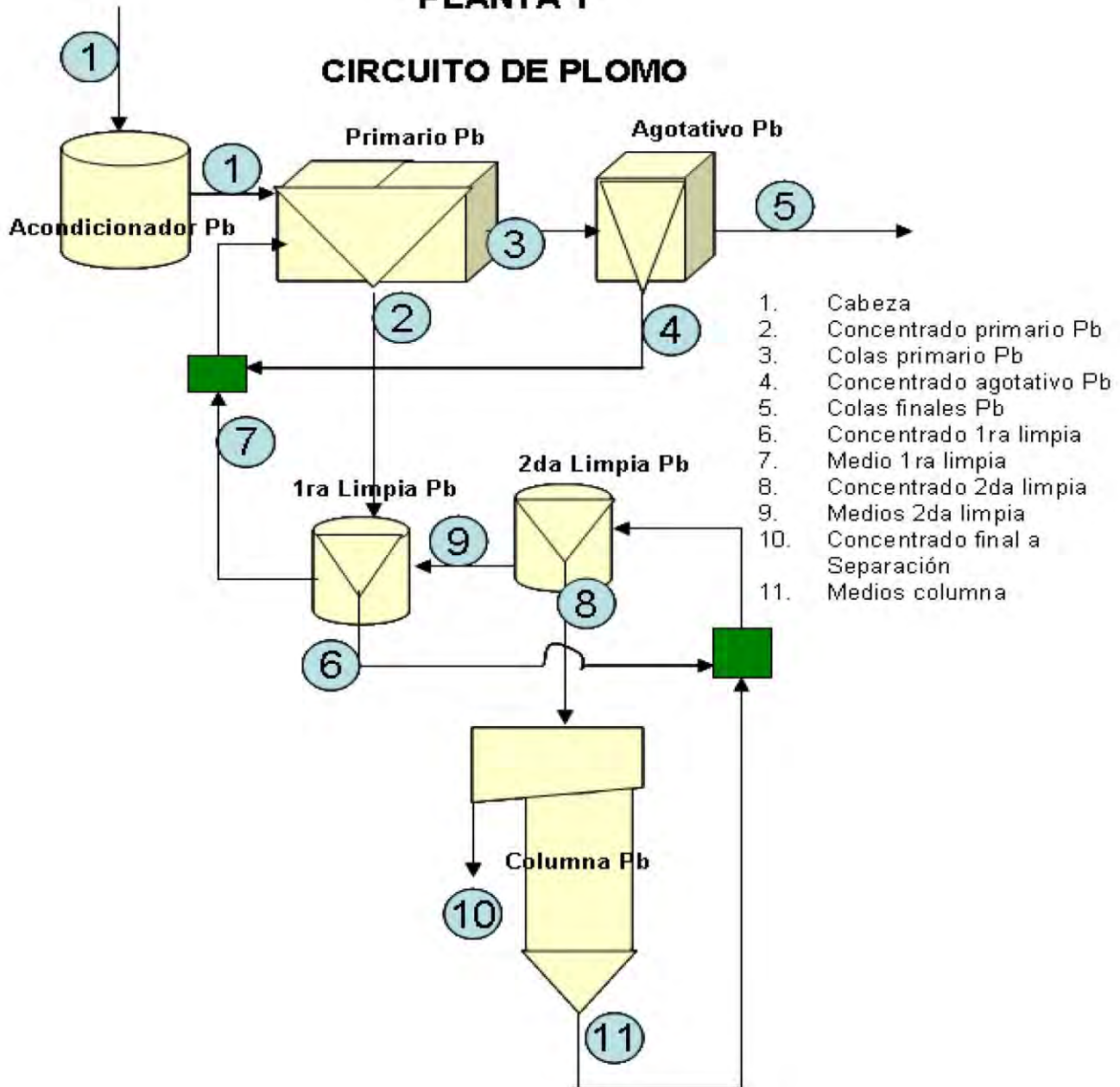
Las muestras se toman por bancos.  
 Los concentrados normalmente se toman en las tuberías de descarga a los cajones de las bombas ( en piso de flotación) donde va la pulpa + el agua de las canaletas para realizar balance de sólidos.

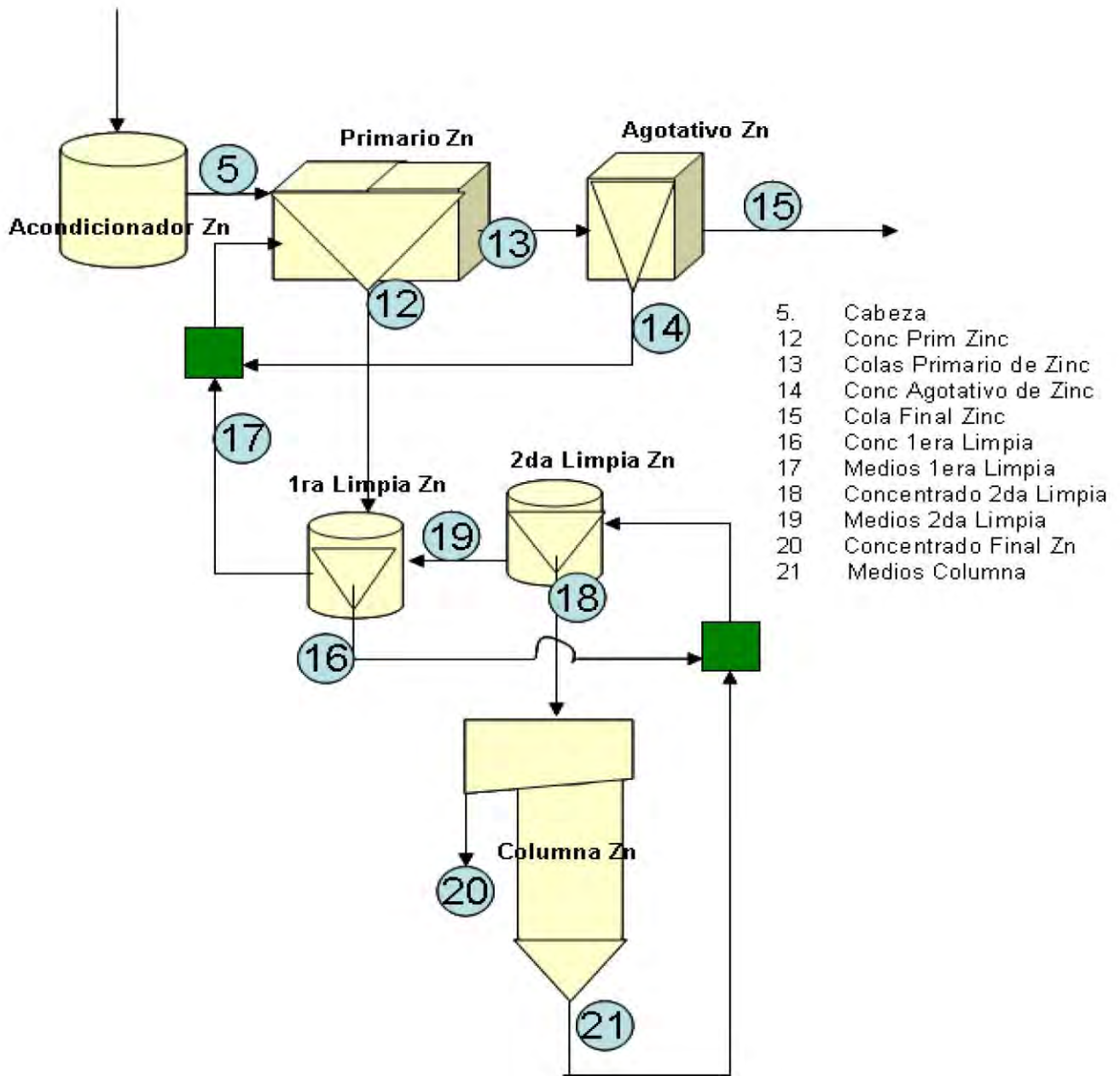
- 7.- Cab de Zn
- 20.- Conc 1er Primario Zn
- 21.- Cola 1er Primario Zn
- 22.- Conc 2do Primario Zn
- 23.- Medios 2do. Primario Zn
- 24.- Conc Agotativo Zn
- 25.- Cola Final
- 26.- Conc 1era Limpia Zn
- 27.- Medios 1era Limpia Zn
- 28.- Conc 2da Limpia A Zn
- 29.- Medios 2da Limpia A Zn
- 30.- Conc 2da Limpia B Zn
- 31.- Medios 2da Limpia B Zn
- 32.- Conc Colum 1 Zinc
- 33.- Medios Colum 1 Zn
- 34.- Conc Colum 2 Zinc
- 35.- Medios Colum 2 Zn
- 36.- Conc Reflot
- 37.- Medios de Reflot
- 38.- Conc Limpia Reflot
- 39.- Medios Limpia Reflot

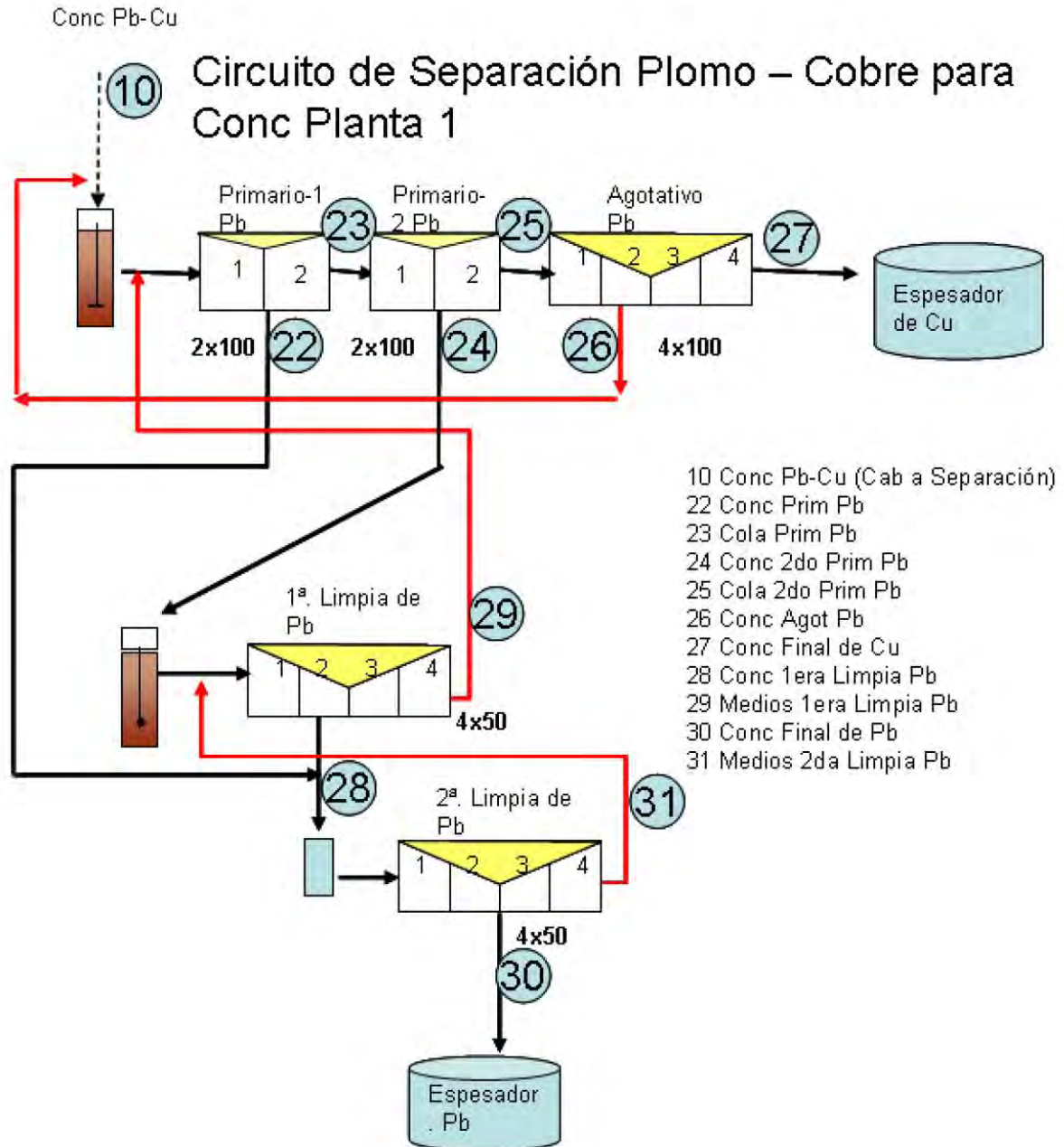


**PLANTA 1**

**CIRCUITO DE PLOMO**







### A.3. PREPARACIÓN DE MUESTRAS A GRANEL

#### 1.- OBJETIVO

Describir el método seguido para el muestreo de minerales, paso a paso, de manera que cualquier persona ajena a la sala de muestras pueda realizar exactamente el trabajo que se efectúa en esa área, asegurando que al seguir el método planeado, se obtendrá una muestra que sea verdaderamente representativa, para análisis químico o pruebas metalúrgicas.

#### 2.- ALCANCE

Plantas Concentradoras de la División Minas.

#### 3.- PROCEDIMIENTO

- 1.- Es obligatorio usar todo el equipo de SEGURIDAD (respirador, gafas, guantes, casco, zapatos con casquillo y orejeras).
- 2.- Mantener perfectamente limpia el área y equipo de trabajo entre muestra y muestra preparada, usando el material asignado para cada tarea (pistola de aire, franelas, brochas, espátulas, etc.)
- 3.- Revisar el reporte del turno, para ver si hay muestras pendientes por preparar con prioridad 1, 2 ó 3.
- 4.- Programar la relación de muestras que pretende preparar respetando la prioridad y la fecha de solicitud.
- 5.- Registrar las muestras en el libro llamado "Registro de Muestras" de acuerdo al procedimiento establecido.
- 6.- Las muestras que estén húmedas (lodos y rezagas), meterlas a secar al horno eléctrico a una temperatura de 110°C por un tiempo mínimo de 8 horas, hasta que la muestra esté completamente seca.
- 7.- Según el tamaño de partícula de la muestra, se presentan dos alternativas de tratamiento:
  - a) Si la muestra viene en tamaño de dos pulgadas o más, se continúa con la actividad 8.

- b) Si la muestra viene de menos de 2 pulgadas, se pasa a la actividad 9.
- 8.- Se reduce su tamaño, pasándola primero por la quebradora de quijadas de 10 X 14 pulg., o con su equivalente, con una abertura de descarga de 1 ½ pulg.
- 9.- La muestra original con partículas menores a 2 pulg. se pasa por la quebradora de quijadas 4 X 6 pulg. o su equivalente, con una abertura de descarga de ¼ pulg.
- 10.- Limpiar perfectamente el equipo de trituración empleando aire comprimido cada vez que se procese una muestra.
- 11.- Una vez reducido el tamaño de las partículas a menos de ¼ pulg. se presentan dos alternativas de tratamiento:
- a. Si la muestra es mayor de 12.5 kg. se continúa con la actividad No.12.
  - b. Si la muestra es menor de 12.5 kg. se pasa hasta la actividad No. 20.
- 12.- La muestra se coloca en la plancha de fierro que está en el piso de la sala de muestras, la cual debe estar perfectamente limpia para evitar cualquier posibilidad de contaminación.
- 13.- Con una pala cuadrada estándar se maneja el mineral, para formar un cono teniendo cuidado de tomar las paladas alrededor de la base del cono y arrojarlas hacia la parte más alta del mismo.
- 14.- Ya formado el cono, se vuelve a palear el mineral para volver a formar otro cono igual en otro lugar. Este procedimiento se repite tres veces como mínimo. fig. No.1.
- 15.- Una vez terminada la operación anterior, se procede al cuarteo de la muestra de la siguiente manera:

**A una altura de aproximadamente 8 a 10 centímetros de la base del cono, se clava una pala verticalmente y se le da a ésta un movimiento circular caminando la persona alrededor del cono hasta que al extenderse la muestra con éste movimiento, el cono quede transformado en un cono truncado de poca altura. fig. No. 2.**

- 16.- El cono truncado se divide en cuatro partes iguales, mediante el trazado de dos diámetros perpendiculares. fig. No. 3.
- 17.- Con la pala se separan, cuidadosamente dos partes opuestas, los marcados con las líneas opuestas, se regresan a su saco o bolsa original. Con esto queda reducida la muestra a la mitad.
- 18.- Se repiten los pasos 12, 13, 14, 15, 16, y 17 hasta reducir la muestra a 12.5 kg. regresando a la bolsa o saco original los sobrantes de la muestra.
- 19.- Limpiar perfectamente el equipo de trituración empleado, sopleteando cada vez que se procese una muestra.
- 20.- El total de la muestra obtenida en el paso No. 18 se reduce a menos 20 mallas pasándola por una quebradora de roles, para asegurar lo anterior, el total de la muestra se pasa por una criba de 20 mallas de 1.0 X 0.5 mt. enmarcada en madera de 10 cm.

La porción gruesa de la muestra, o sea lo que no pasó la malla 20, se regresa a los roles hasta que todo el material pase la malla deseada. Hay que tener cuidado de no sobremoler en cada pasada por los roles, es necesario por lo tanto cribar, el producto y regresar a la quebradora sólo la fracción gruesa.

- 21.- Una vez triturada a menos 20 mallas, la muestra se pone en una tela ahulada para muestreo de 1.5 X 1.5 mt. procediéndose a darle al menos 10 vueltas para que quede bien homogeneizada. fig. No. 4.
- 22.- Después de homogeneizarse en el hule, la muestra se reduce por medio de un muestreador de hendeduras (rifles) de 10 X 8 pulg. con abertura en las hendeduras de  $\frac{3}{4}$  pulg. hasta lograr aproximadamente  $\frac{1}{2}$  kg.
- 23.- La muestra de  $\frac{1}{2}$  kg. se pulveriza, hasta que toda pasa a través de la malla 100. Para esto es necesario cribar la muestra después de cada pulverizada, utilizando la malla No. 100, el material que no pasa se

regresa al pulverizador y se criba nuevamente, esto se realiza varias veces hasta que toda la muestra pasa por la malla.

24.- La muestra pulverizada a menos 100 mallas se pasa a una tela ahulada de 0.5 X 0.5 mt. y se le dan 10 vueltas. Una vez bien mezclado, se corta la muestra utilizando dos veces el método del cono para reducir su peso hasta aproximadamente 100 gr., que se colocan en un sobre para muestras en el que se escriben los siguientes datos.

- a) Número clave de la muestra.
- b) Remitente.
- c) Clase de producto que se trata.
- d) Elementos que se requiere analizar.
- e) Fecha.

25.- La muestra se envía al laboratorio para su análisis.

26.- Los sobrantes de muestra obtenidos en los diferentes pasos de reducción se juntan en bolsa de plástico, se identifican perfectamente y envían al almacén de muestras.

27.- En caso de que la muestra sea especial para efectuar pruebas metalúrgicas a nivel laboratorio, se reduce por medio del muestreador de hendeduras hasta tener el número de kg. que se requiera, colocándose en bolsas de papel o hule bien identificadas, con el número clave de la muestra, el nombre del remitente, el peso y la fecha en la que fueron preparadas.

Este sistema de poner en bolsas de papel o hule las muestras para la investigación a nivel laboratorio, podrá ser diferente, dependiendo de las necesidades de cada unidad, respetando únicamente el control de clave, remitente y peso de la muestra.

28.- Los sobrantes de muestra obtenidos en los diferentes pasos de reducción se juntan en una bolsa de plástico, se identifica perfectamente y envía al almacén de muestras donde permanecerá por dos meses, después de los cuales se procederá a deshacerse de ella a menos que se tenga una instrucción diferente.

#### A.4. COMPOSICION QUIMICA DE AGUAS DE PROCESO.

##### EQUIPOS, MATERIALES Y REACTIVOS

Recipientes de plástico con tapa roscada  
Vaso de precipitado plástico 500 ml  
HNO<sub>3</sub> grado reactivo  
NaOH en perlas  
Termómetro  
pHmetro  
Equipo de filtración de vacío  
Membranas de filtración de 0.22 micras.

##### MUESTREO

– Muestreo en tomas.

Se deja fluir un volumen aproximadamente igual a 10 veces el volumen de la muestra y a continuación se llena el recipiente de muestreo.

– Muestreo en descargas libres.

Cuando las aguas residuales fluyan libremente en forma de chorro, el recipiente muestreador se debe enjuagar repetidas veces antes de efectuar el muestreo. Se introduce el recipiente muestreador en la descarga o de ser posible, se toma directamente la muestra en su recipiente.

– Muestreo en canales y colectores.

Se recomienda tomar las muestras en el centro del canal o colector de preferencia en lugares donde el flujo sea turbulento a fin de asegurar un buen mezclado.

El recipiente muestreador se debe enjuagar repetidas veces con el agua por muestrear antes de efectuar el muestreo.

El recipiente muestreador, se introduce en el agua residual completamente y se extrae la muestra.

Las muestras deberán incluir una descripción detallada del punto de muestreo de manera que cualquier persona pueda tomar otras muestras en el mismo lugar.



## **CANTIDAD Y PRESERVACION DE LAS MUESTRAS**

### – Análisis de metales.

Debe colectarse por lo menos 1 litro de muestra, esta debe filtrarse a través de una membrana de 0.45 micras o menor, previamente lavada con una disolución de ácido nítrico (1%) y enjuagando con agua antes de utilizarse. Preservar acidificando con HNO<sub>3</sub> concentrado grado reactivo hasta un pH < 2 y refrigerar a 4°C hasta el análisis. El tiempo máximo previo al análisis es de 6 meses. Analizar para los siguientes cationes: Ag, Pb, Cu, Fe, Zn, Ag, Ca, Mg, Na, K y aniones Cl, F.

### – Determinación de cianuros.

Debe colectarse un mínimo de 1 litro de muestra, filtrar a través de una membrana de 0.22 micras. Las muestras deben preservarse por adición de perlas de hidróxido de sodio hasta que el pH de la muestra sea mayor o igual a 12 en el momento de la colecta. Las muestras deben refrigerarse a 4°C hasta el análisis. El tiempo máximo de almacenamiento previo al análisis es de 14 días.

### – Determinación de sólidos suspendidos y disueltos totales.

Colectar un volumen de muestra homogéneo y representativo superior a 1 litro en un frasco de polietileno o vidrio con tapa de boca ancha. No se recomienda la adición de agentes preservadores. Transportar la muestra y mantenerla a 4°C hasta realizar el análisis. Las muestras deben estar a temperatura ambiente al momento del análisis. El tiempo máximo de almacenamiento previo al análisis es de 7 días.

### – Determinación de carbonatos y sulfatos.

Colectar un volumen de muestra homogéneo y representativo superior a 500 ml en un frasco de polietileno o vidrio con tapa de boca ancha. No se recomienda la adición de agentes preservadores. Transportar la muestra y mantenerla a 4°C hasta realizar el análisis. Las muestras deben estar a temperatura ambiente al momento del análisis. El tiempo máximo de almacenamiento previo al análisis es de 7 días.

### – Determinación de pH y temperatura de la muestra.

Cuando sea posible, se efectúa la determinación de pH y temperatura directamente en el punto de muestreo sin extraer muestra, sumergiendo los electrodos en el cuerpo de agua. Cuando sea preciso extraer una muestra, se toma un volumen mínimo de 100 mL en un envase de polietileno o de vidrio limpio y se determina pH y temperatura de inmediato.

## **A.5. MONITOREO DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE LA PULPA: pH, POTENCIAL REDOX (Eh), OXÍGENO DISUELTO (OD), DEMANDA DE OXÍGENO (DO) Y TEMPERATURA.**

### **OBJETIVO.**

Determinar la evolución de los parámetros que definen la química de la pulpa a su paso por los circuitos de molienda y flotación.

### **EQUIPOS, MATERIALES Y REACTIVOS.**

Muestreadores para pulpas  
Vaso de precipitados plástico de 2 L  
Cronómetro  
Potenciómetros para pH, OPR y temperatura  
Medidor de Oxígeno Disuelto  
Buffers para pH  
Buffer de ORP : soluciones Zobell o estándar  
Solución estándar 0 ppm de oxígeno disuelto (OD)  
Sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ )  
Preparación de solución estándar 0 ppm OD  
Pesar 5,0 g de sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) y aforar a 100 mL con agua destilada.  
Esta solución deberá prepararse diariamente.

### **PROCEDIMIENTO.**

1. Calibrar los sensores de los equipos.

– Electrodo de pH: Emplear una solución estándar de un pH cercano al neutro, de modo que mediciones de pH ligeramente ácidos y/o alcalinos, queden dentro del rango de medición confiable del instrumento.

– Electrodo de Eh: Emplear una solución estándar o bien la solución Zobell; esta última debe de leer  $231 \pm 15$  mV cuando se emplea el electrodo de Pt-Ag/AgCl saturado con KCl. Si se desea obtener el valor con referencia al electrodo estándar de hidrógeno (SHE), adicionar 199 mV a la lectura obtenida.

– Electrodo de OD: Emplear una solución libre de oxígeno (0 ppm  $\text{O}_2$ ). Si la lectura es negativa restablezca el valor de 0 ppm del instrumento.

– Temperatura: Compare la lectura del sensor del instrumento con la lectura proporcionada por un termómetro en buen estado. Haga la comparación empleando una solución a una temperatura cercana a las esperadas.

- La demanda de oxígeno de la pulpa se determina siguiendo el procedimiento establecido en el documento correspondiente.
- 2. Instalar los equipos en un lugar lo más cercano posible al punto del circuito que se desea muestrear.
- 3. Tomar una muestra de por lo menos 1 litro de la corriente de pulpa con ayuda de un muestreador adecuado.
- 4. Lo más rápidamente posible verter la muestra en un vaso de precipitados de polipropileno de 2 L de capacidad.
- 5. Con ayuda de los electrodos agitar la muestra al mismo tiempo que se registran las mediciones cada 5 segundos.
- 6. Recuperar los valores registrados y definir los valores de pH, Eh y T como el promedio del periodo de tiempo en donde alcanzaron valores relativamente estables.
- 7. Definir el oxígeno disuelto (OD) como el valor máximo de la curva OD vs. tiempo.
- 8. Estimar la demanda de oxígeno (DO) con la curva de decaimiento de OD y con el procedimiento ya establecido.

## A.6. MEDICIÓN DE LA DEMANDA DE OXÍGENO DE UNA PULPA MINERAL.

### OBJETIVO.

Determinar la velocidad de consumo de oxígeno que demandan las reacciones de oxidación de las especies minerales presentes en la pulpa. Obtener un indicador numérico de la Demanda de Oxígeno (DO) de la pulpa.

### EQUIPO, MATERIALES Y REACTIVOS.

Vaso de precipitados plástico de 500 ml o 1 L

Medidor de oxígeno disuelto

Cronómetro

Solución estándar 0 ppm de oxígeno disuelto (OD)

Sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ )

Preparación de solución estándar 0 ppm OD

Pesar 5,0 g de sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) y aforar a 100 mL con agua destilada.

Esta solución deberá prepararse diariamente.

### PROCEDIMIENTO.

1. Obtenga una muestra de pulpa de la corriente del circuito de interés y viértala en un vaso de precipitados de 500 mL o 1 L.
2. Mezcle la pulpa con el electrodo de OD para mantener las partículas sólidas en suspensión.
3. Inicie el registro y adquisición de las mediciones en el momento en que comience la agitación (es recomendable registrar un valor cada 5 segundos durante un periodo de 2 minutos).
4. Recupere los valores de OD (oxígeno disuelto) vs Tiempo en una hoja de excel y ajústelos a un curva exponencial del tipo  $\text{OD} = a \exp(-k \times \text{tiempo})$ . La demanda de oxígeno (DO) está representada por el valor de la constante "k".

## **A.7. EXTRACCION CON EDTA DE LOS IONES METALICOS CONTENIDOS EN ESPECIES OXIDADAS SUPERFICIALMENTE EN UNA PULPA MINERAL.**

### **OBJETIVO.**

Determinar la cantidad de Pb, Cu, Zn y Fe presentes en especies oxidadas en la superficie de las partículas minerales en una pulpa, expresada como un porcentaje del total del metal.

### **EQUIPOS, MATERIALES Y REACTIVOS.**

- Jeringa plástica de 30 ml
- Vaso de precipitado de vidrio de 400 ml
- Probeta de 250 ml
- Filtro, embudo y bomba para vacío
- Parrilla y agitador magnético
- Balanza
- pH metro
- Cronometro
- Papel filtro Whatman #1 o equivalente
- Membranas de filtración de 0.22 micras
- Botes de plástico de 50 a 100 ml con tapa de rosca
- Recipientes plásticos de 1 a 5 lts.
- Agua destilada
- EDTA (ácido etilendiamino-tetracético) sólido
- Solución de NaOH 1 M

Preparación de solución de EDTA al 3%.

Disolver 30 gramos de EDTA en un litro de agua destilada, posteriormente ajustar el pH de la solución a un valor de 7.5 con adiciones de NaOH 1 M.

### **PROCEDIMIENTO.**

1. Colectar una muestra de pulpa representativa de la corriente de interés (aproximadamente 1 litro) y verterla en un recipiente plástico.
2. Agitar la muestra vigorosamente para asegurar una pulpa homogénea.
3. Pesar la jeringa de 30 ml y registrar el peso de la jeringa vacía.
4. Con la jeringa tomar una muestra de 25 ml de la pulpa, pesar y registrar el peso de la jeringa más la pulpa.

5. Agregar el contenido de la jeringa a un vaso de precipitado con 250 ml de solución de EDTA.
6. Colocar en la parrilla con un agitador magnético y agitar por 5 minutos.
7. Filtrar la pulpa usando una membrana de 0.22 micras y el equipo de vacío. En caso de dificultad al filtrar, es recomendable pasar previamente la pulpa por papel filtro Whatman # 1 y posteriormente filtrar la solución a través de la membrana.
8. Recolectar la solución en botes de plástico y enviar a análisis químico.
9. El sobrante de la pulpa muestreada se filtra, se seca y se analiza químicamente el sólido resultante.

### CALCULOS.

Ejemplo: Determinar el % de Fe extractable con EDTA.

Datos:

$V_{EDTA}$  = Volumen de extractante EDTA: 250 ml

$V_p$  = Volumen de pulpa: 25 ml

$\rho_m$  = Densidad del mineral\*: 3 gr/ml

$P_{jer}$  = peso de la jeringa vacía: 10 grs

$P_{jer+pul}$  = peso de la jeringa + pulpa: 51 grs

Análisis Químico Fe:

$A_{liq}$  = Solución: 13.0 mg/l Fe

$A_{sol}$  = Sólido: 29.7 % Fe

Cálculo.

$M_p$  = Masa de la pulpa

Obtenga el peso de la muestra de pulpa restando el peso de la jeringa vacía al peso de la jeringa conteniendo la muestra.

$$M_p = P_{jer+pul} - P_{jer} = 51\text{gr} - 10\text{gr} = 41\text{ gr}$$

$\rho_p$  = Densidad de la pulpa

Obtenga la densidad de la pulpa dividiendo la masa de la pulpa por el volumen de la pulpa.

$$\rho_p = M_p / V_p = 41\text{ gr} / 25\text{ ml} = 1.64\text{ gr/ml}$$

## A.8. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE OXIDACIÓN DE UN MINERAL

### OBJETIVO.

Determinar el grado de oxidación de las especies minerales presentes en un cuerpo mineral.

### EQUIPOS, MATERIALES Y REACTIVOS.

- Vaso de precipitado o matraz de vidrio de 400 ml
- Probeta de 250 ml
- Filtro, embudo y bomba para vacío
- Parrilla y agitador magnético
- Balanza
- pH metro
- Cronómetro
- Papel filtro Whatman #1 o equivalente
- Membranas de filtración de 0.22 micras
- Botes de plástico de 50 a 100 ml con tapa de rosca
- Agua destilada
- EDTA (ácido etilendiamino-tetracético) sólido
- Solución de NaOH 1 M
- Nitrógeno gas alta pureza.

Preparación de solución de EDTA al 3%.

Disolver 30 gramos de EDTA en un litro de agua destilada, posteriormente ajustar el pH de la solución a un valor de 7.5 con adiciones de NaOH 1 M.

### PROCEDIMIENTO.

1. Obtener una muestra representativa del mineral deseado.
2. Quebrar la muestra a un tamaño de  $\sim 1/4$ ".
3. Cuartear y pulverizar aproximadamente 100 g a  $\sim 100$  mallas.
4. Someter a agitación 250 ml de la solución de EDTA y burbujear gas nitrógeno de alta pureza con la ayuda de un burbujeador de vidrio poroso, durante 20 minutos previos a la adición de los sólidos.

**APÉNDICE B.**

**CONVERSIÓN DE ELEMENTOS A MINERALES.**



### CONVERSIÓN DE ELEMENTOS A MINERALES.

Es una práctica común en la minería presentar los resultados obtenidos en especies minerales. Por esa razón, los resultados de los ensayos presentados por el laboratorio en elemento son convertidos a minerales. Para la conversión de elemento a mineral es necesario el factor de conversión, este se obtiene a partir de los pesos atómicos de cada elemento que compone el mineral y de un estudio mineralógico realizado al mineral de la Unidad Minera.

Los factores de conversión de cada elemento a especie mineral para Unidad Sabinas se presentan en la Tabla C1:

Multiplicar :	Por :	Para obtener :
% Pb	1.1547	Galena (PbS)
% Zn	1.6556	Esfalerita (ZnFeS)
% Cu	2.554	Calcopirita (CuFeS <sub>2</sub> ) + Bornita (Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub> ) (75 % + 25 %)

Tabla C1. Factores de conversión de elemento a especie mineral para Unidad Sabinas.

Por ejemplo, si el laboratorio reporta 60% de Pb en un concentrado, la conversión a galena es la siguiente:

$$\% \text{ Pb} \times \text{Factor de conversión para el Pb} = \% \text{ de Galena en la muestra}$$

Sustituyendo valores:

$$60\% \times 1.1547 = 69.28 \%$$

El porcentaje en peso de galena en el concentrado ensayado es de 69.28%.

Para obtener el contenido de galena en el concentrado, se multiplica la fracción de galena en el concentrado por el peso del concentrado enviado a ensayar; por ejemplo, si el peso del concentrado fue de 690 g. entonces:

$$(\% \text{ de Galena en la muestra} / 100) \times \text{Peso de la muestra [g]} = \text{Peso de Galena en la muestra [g]}$$

Sustituyendo valores:

$$(69.28\% / 100) \times 690 \text{ g} = 478.05 \text{ g}$$

El concentrado con peso de 690 g contiene 478.05 g de galena.

Si se quiere obtener la recuperación de galena en el concentrado obtenido, se divide el contenido de galena en el concentrado entre el peso total de galena en la muestra utilizada para la prueba y el resultado se multiplica por 100. Por ejemplo, si el peso total de galena en la muestra que se utilizó para la prueba fue de 1 kg, utilizando los resultados anteriores tenemos:

$$\frac{\text{Contenido de Galena en el concentrado [g]} \times 100}{\text{Peso total de la muestra para la prueba [g]}} = \text{Recuperación de Galena en la muestra [\%]}$$

Sustituyendo valores:

$$(478.05 \text{ g}) / (1000 \text{ g}) \times 100 = 47.805\%$$

La recuperación que se obtiene de galena de una muestra de 1 kg es de 47.805%.

La conversión de elemento a especie mineral para los demás elementos se realiza de manera semejante como se hizo para el Pb.

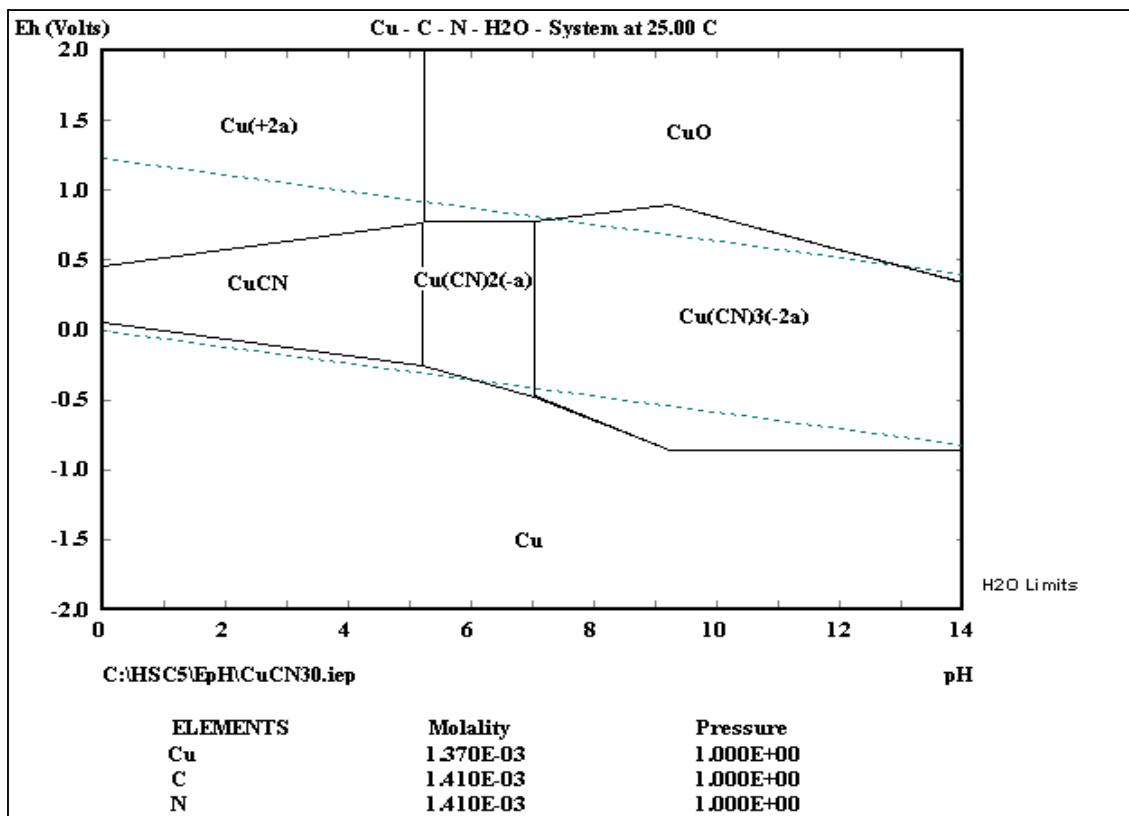
**APÉNDICE C**

**SISTEMAS COBRE-CIANURO**

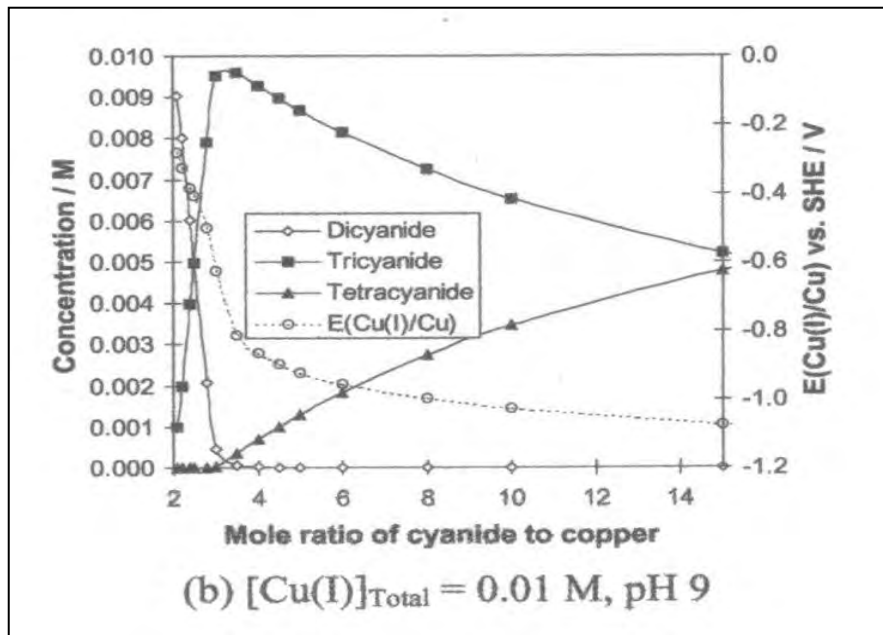
**SISTEMAS COBRE-CIANURO**

Con respecto al procedimiento que se lleva a cabo para la determinación de las especies metálicas en las aguas (en el caso de Sabinas), se detectó que para los iones cobre no era el más adecuado. Las diferentes estimaciones de iones cobre obtenidas en la muestra para analizar metales (ácida), no metales (pH natural) y cianuro libre (pH básico), nos indicaron que posiblemente en la estimación de cobre por el método ácido, hay una reacción de los iones Cu en la muestra que se prepara para analizar los metales con el ácido nítrico que se agrega para su conservación (ver procedimiento composición química de aguas de proceso en el apéndice A); probablemente se forma un precipitado de CuCN. Por el contrario, se presume que la concentración de cobre debe ser más alta en el agua que se recupera del espesador de cobre porque los iones Cu durante todo el proyecto tuvieron una concentración considerable en este flujo.

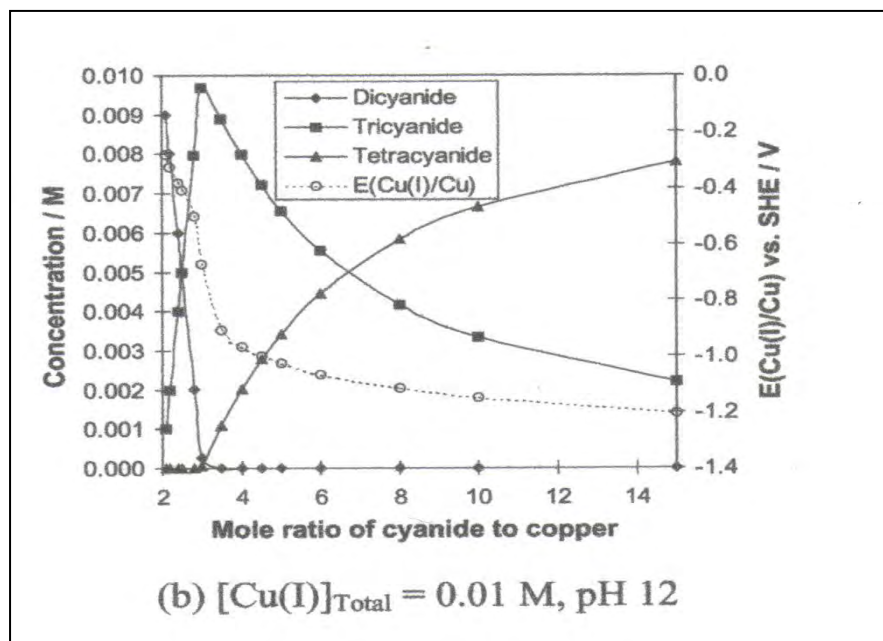
Reforzando el comentario anterior presentamos la siguiente figura:



a) Diagrama Eh vs pH para el sistema cobre-cianuro-agua a 25 °C. Las concentraciones que se emplearon para la realización de este diagrama son las concentraciones promedio del agua recupera del espesador de Cu. Cu = 86.85 ppm y CN = 36.67 ppm.



b) Diagramas de distribución de especies para el sistema cobre-cianuro-agua a diferentes relación mol CN:Cu a 25 °C y pH 9.



c) Diagramas de distribución de especies para el sistema cobre-cianuro-agua a diferentes relación mol CN:Cu a 25 °C y pH 12.

En la figura a) el diagrama  $E_h$  vs pH observamos que a las concentraciones de Cu y CN en el agua recuperada del espesador de cobre a pH alcalinos la especie predominante es la  $\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-}$  y a pH ácido la especie predominante es CuCN, razón por la cual, en el método ácido los iones Cu no se encuentran presentes en las aguas analizadas y probablemente estén precipitados.

En las figura b) y c) Los diagramas de especies nos muestran que la formación de complejos Cu-CN dependen de la relación CN:Cu y nos indican que a relaciones menores de 3 (nuestro caso), las especies dominantes son  $\text{Cu}(\text{CN})_2^-$  y  $\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-}$ . Además nos muestra que cuando el pH baja (12 a 9), la distribución de especies cambia tendiendo a dominar la presencia de las especies con números de coordinación bajos, esto se debe a que a pH bajos la concentración de  $\text{H}^+$  aumenta y estos iones compiten por los iones  $\text{CN}^-$ . El efecto del pH disminuye con el aumento en la concentración de Cu (Lu y colaboradores, 2002).

## APÉNDICE D

### GRAFICAS DE RESULTADOS.

**D.1. GRÁFICAS DE ANÁLISIS QUÍMICO DE CADA UNA DE LAS CORRIENTES.**

**D.2. GRÁFICAS DE LA QUÍMICA DE LA PULPA DE LA SEGUNDA ETAPA DE INVESTIGACIÓN.**

**D.3. GRÁFICAS DE LA QUÍMICA DE LA PULPA DE LA TERCERA ETAPA DE INVESTIGACIÓN.**

**D.4. REPRODUCIBILIDAD DE LAS PRUEBAS REALIZADAS CON LOS DIFERENTES TIPOS DE AGUA EN LA SEGUNDA ETAPA DE INVESTIGACIÓN.**

**D.5. REPRODUCIBILIDAD DE LAS PRUEBAS REALIZADAS CON LOS DIFERENTES TIPOS DE AGUA EN LAS ETAPAS TRES Y CUATRO DE INVESTIGACIÓN.**

**D.1. GRÁFICAS DE ANÁLISIS QUÍMICO DE CADA UNA DE LAS CORRIENTES.**

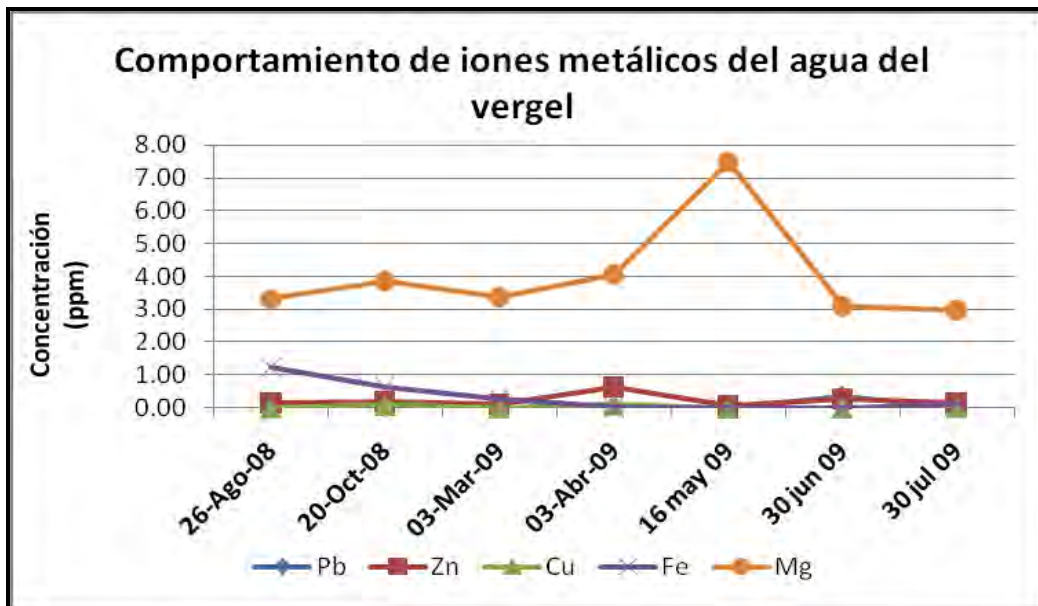


Figura D.1. Concentración de los iones metálicos de interés en el agua fresca proveniente del vergel. Agua prácticamente pura con bajas concentraciones de iones metálicos.

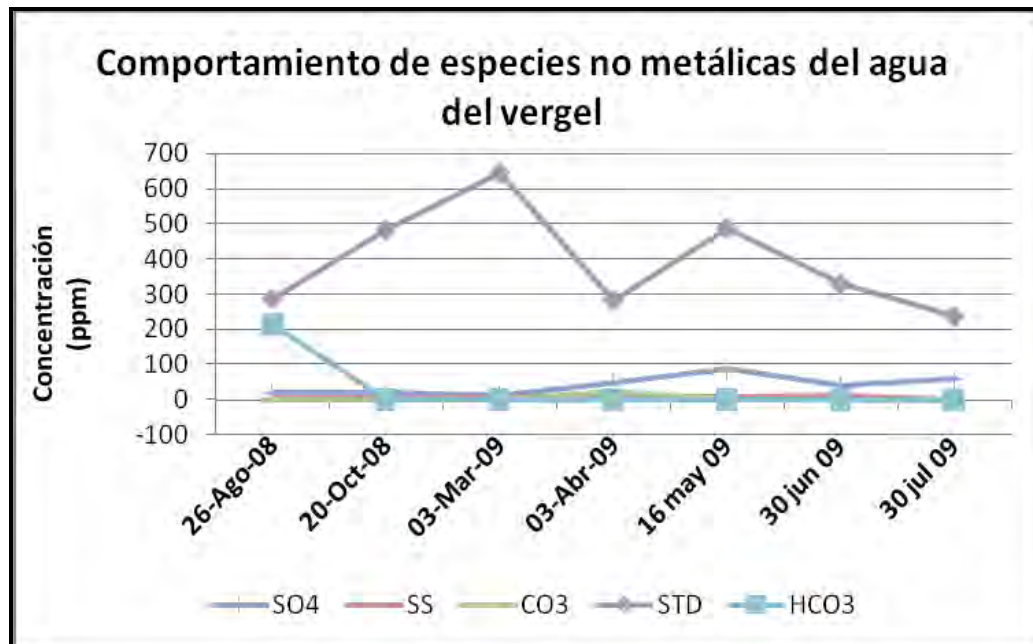


Figura D.2. Concentración de las especies no metálicas de interés en el agua fresca proveniente del vergel. Las especies no metálicas presentan relativamente concentraciones bajas a excepción de los sólidos disueltos totales (STD), que tiene concentraciones altas.



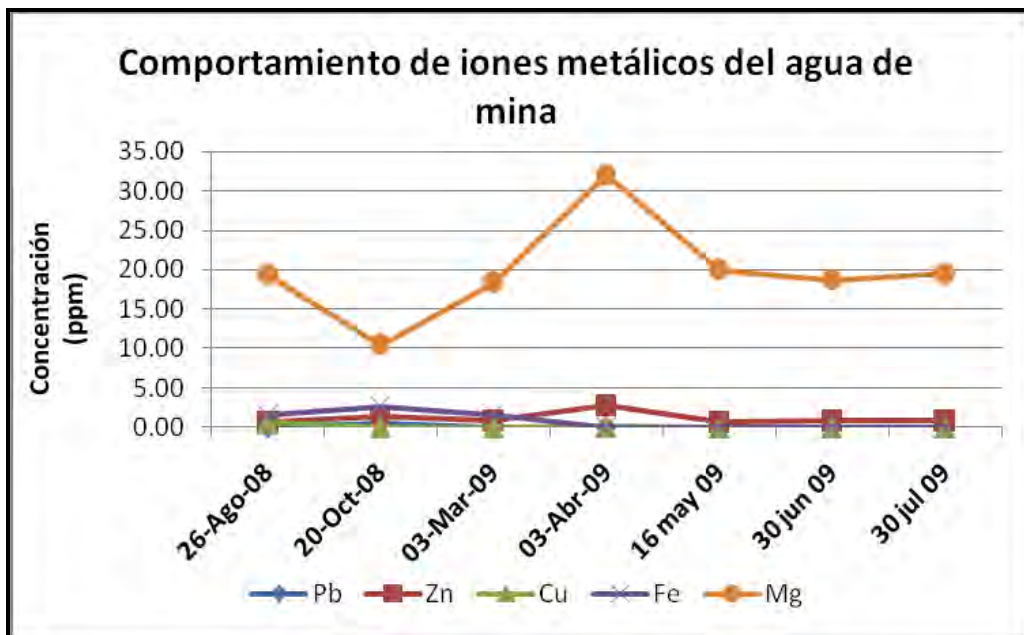


Figura D.3. Concentración de los iones metálicos de interés en el agua fresca proveniente de la mina. Agua prácticamente pura con bajas concentraciones de iones metálicos. La concentración de magnesio es un poco más elevada que la del agua del Vergel.

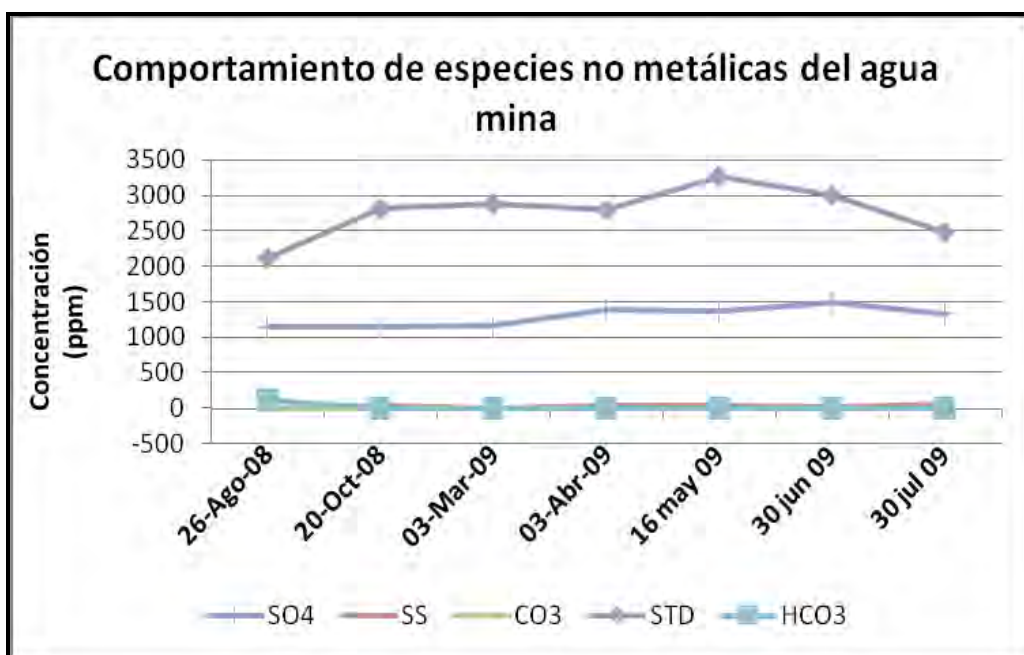


Figura D.4. Concentración de las especies no metálicas de interés en el agua fresca proveniente de la mina. Agua con elevadas concentraciones de sulfatos. Los sulfatos provocan pH bajos y facilitan que las especies metálicas se disuelvan. Posiblemente es la razón por la que la concentración de sólidos disueltos totales (STD) también sea elevada.

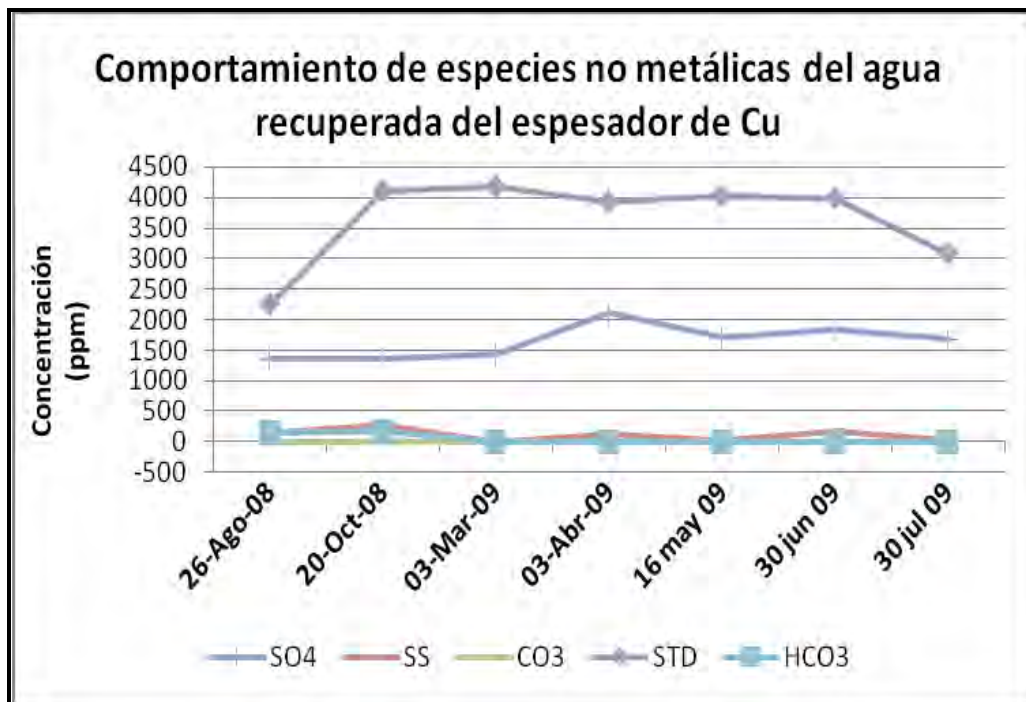


Figura D.5. Concentración de las especies no metálicas de interés en el agua recuperada del espesador de cobre. La concentración de sulfatos es alta así como la de sólidos disueltos totales (STD). Esta agua tiene tendencia a la acidez y a facilitar que las especies metálicas estén disueltas.

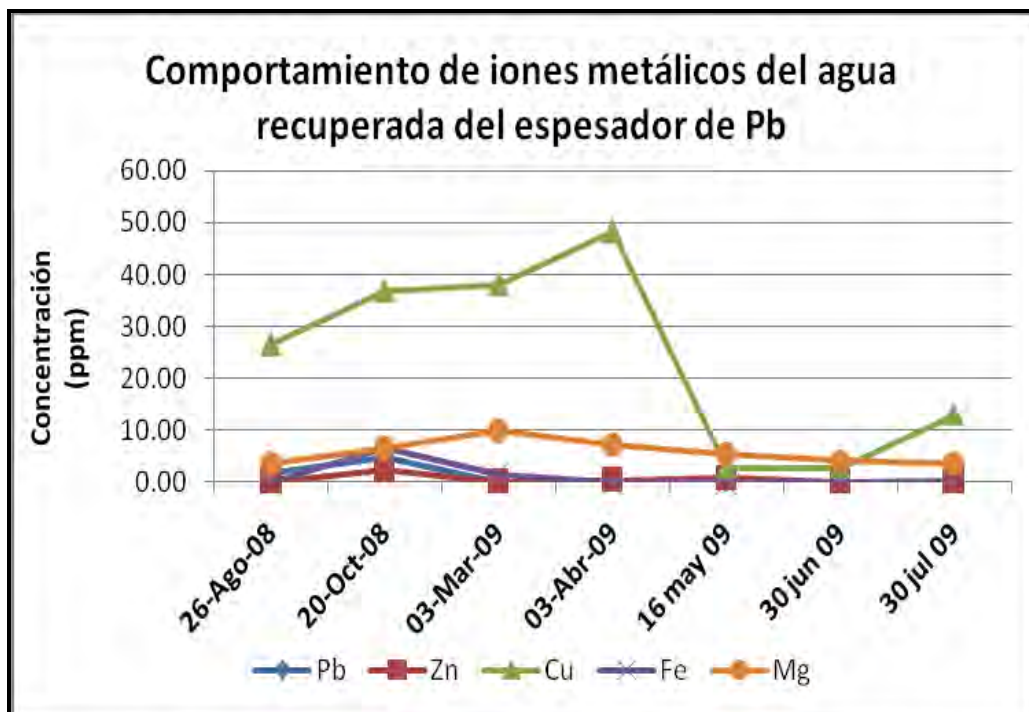


Figura D.6. Concentración de los iones metálicos de interés en el agua recuperada del espesador de plomo. Agua con concentraciones considerables de iones Cu, se observa un perfil muy semejante de iones Cu al del agua recuperada del espesador de Cu.

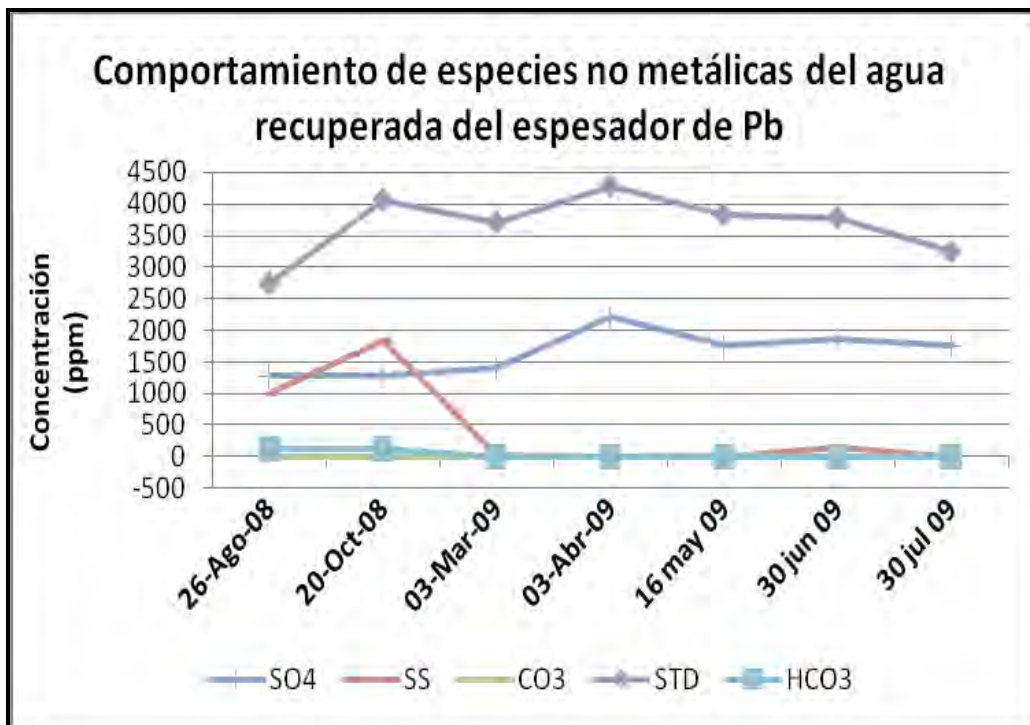


Figura D.7. Concentración de las especies no metálicas de interés en el agua recuperada del espesador de plomo. Se observan altas concentraciones de sulfatos y sólidos disueltos totales (STD). Agua con tendencia a la acidez y a tener disueltas especies metálicas.

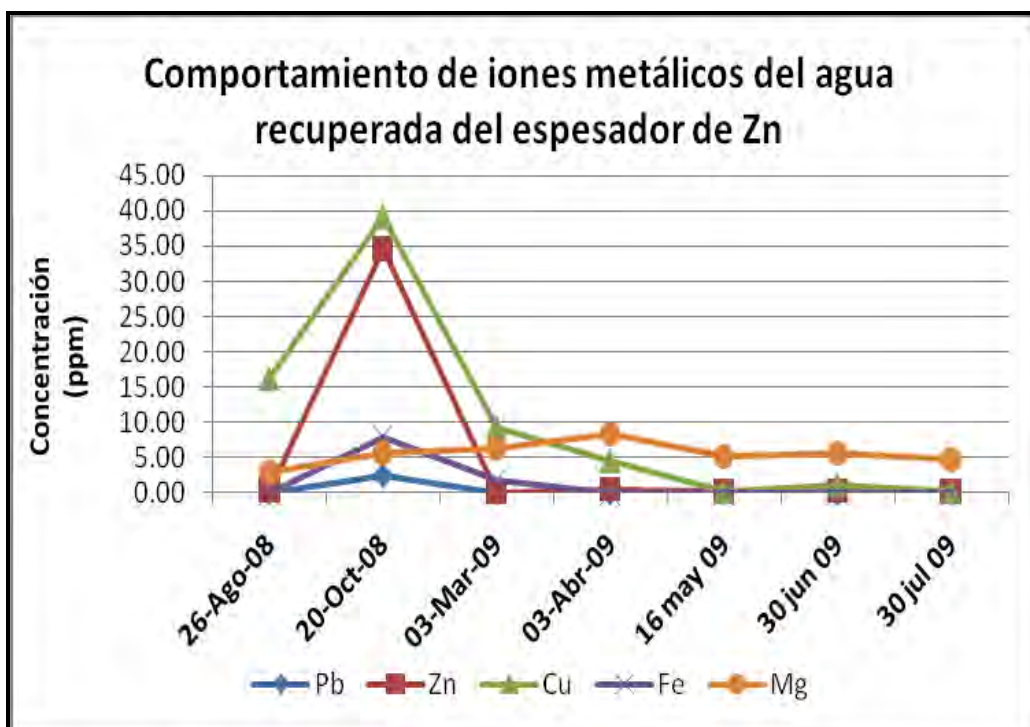


Figura D.8. Concentración de los iones metálicos de interés en el agua recuperada del espesador de zinc. Se observan concentraciones altas de iones Cu. La tendencia de los iones Cu es muy similar a las observadas en los espesadores de Cu y Pb.

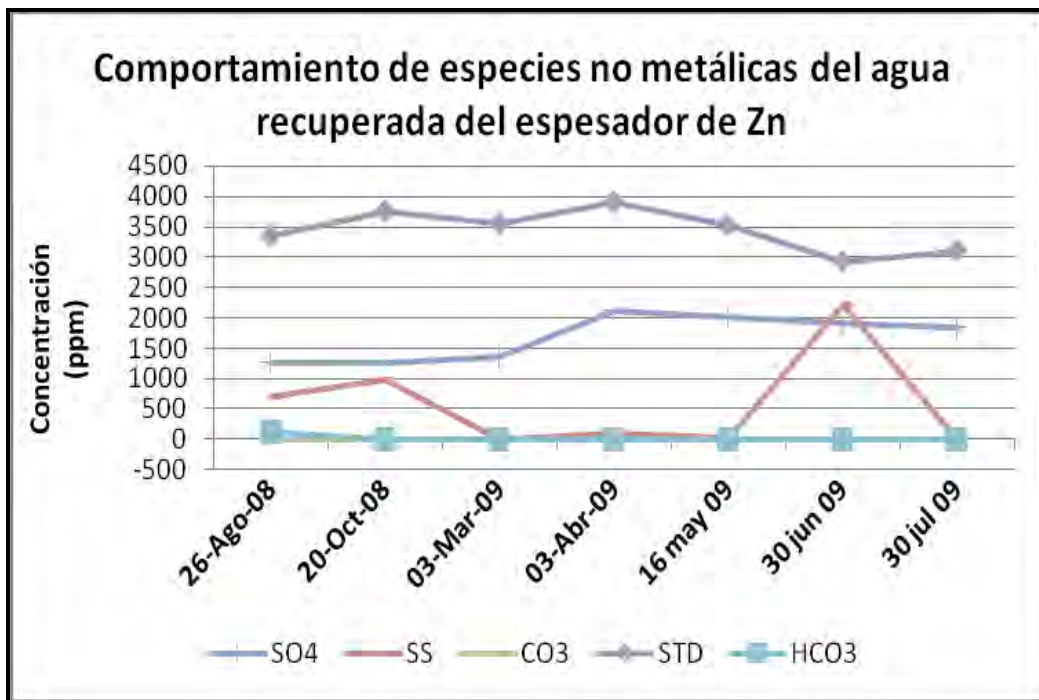


Figura D.9. Concentración de de las especies no metálicas de interés en el agua recuperada del espesador de zinc. Se observan concentraciones altas de sulfatos y sólidos disueltos totales (STD). Aunque también se presenta una ligera tendencia a presentar concentraciones altas de sólidos suspendidos.

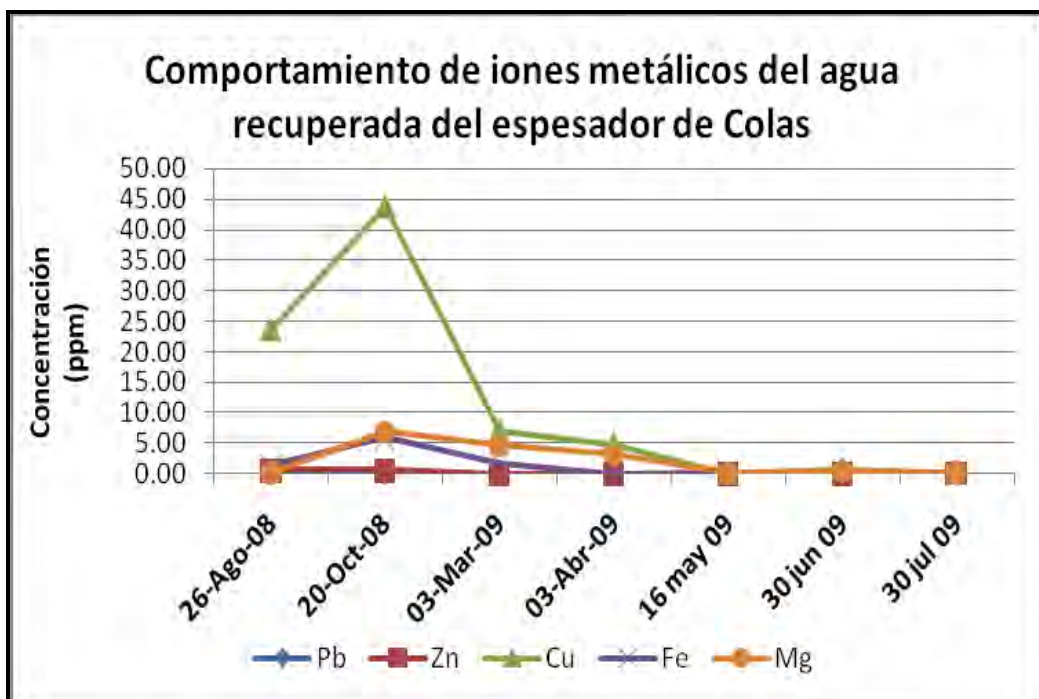


Figura D.10. Concentración de los iones metálicos de interés en el agua recuperada del espesador de colas finales. Se observa concentraciones de consideración de iones Cu con tendencia bajar su concentración en últimos meses. Tendencia similar a la de los espesadores de Cu, Pb y Zn.

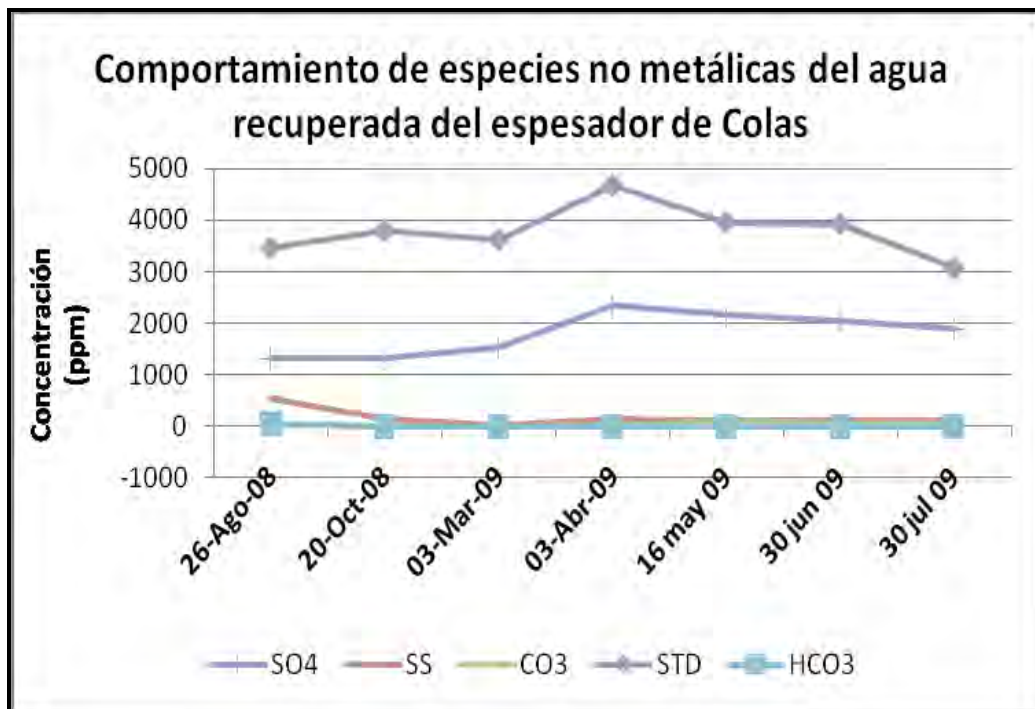


Figura D.11. Concentración de de las especies no metálicas de interés en el agua recuperada del espesador de colas finales. Se observa la concentración de sulfatos y sólidos disueltos totales (STD) altas, con tendencias muy similares a la de los espesadores de Cu, Pb y Zn.

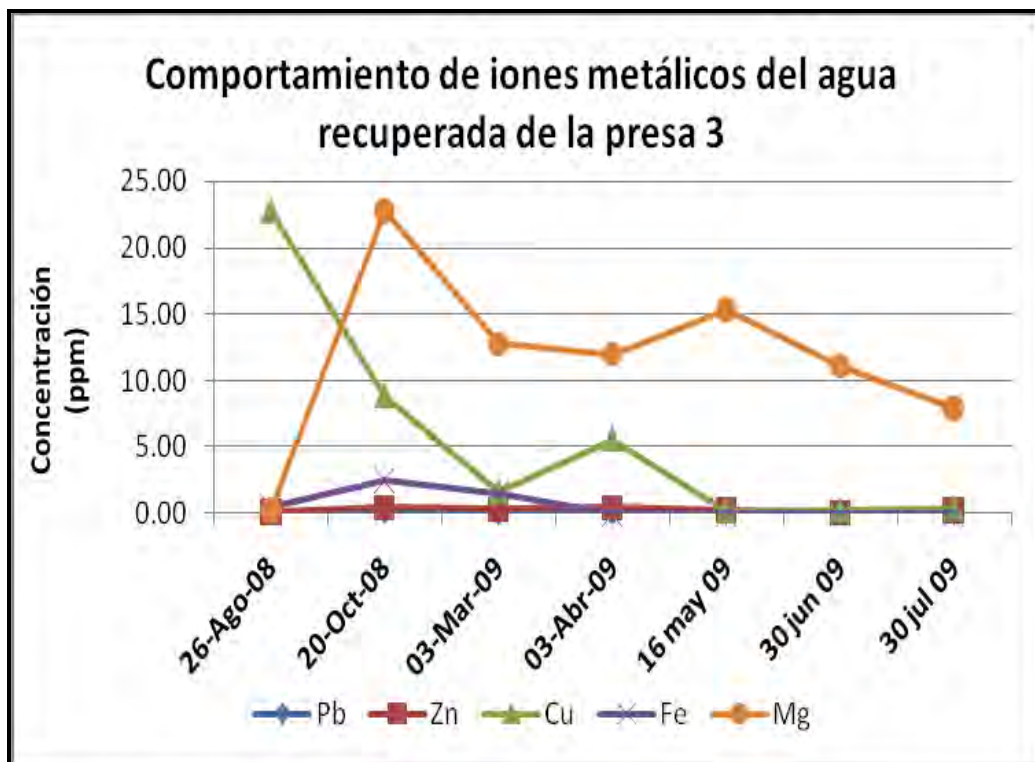


Figura D.12. Concentración de los iones metálicos de interés en el agua recuperada de la Presa de jales 3. Se observan concentraciones considerables de iones Cu y Mg.

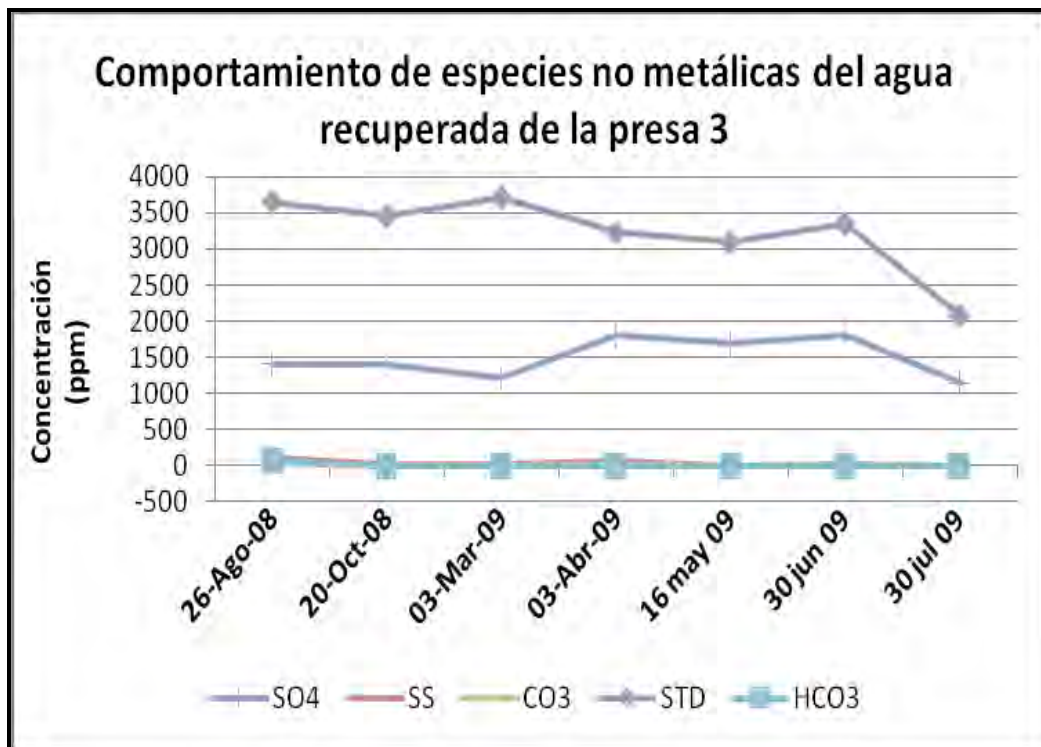


Figura D.13. Concentración de de las especies no metálicas de interés en el agua recuperada de la Presa de jales 3. Al igual que en los espesadores de Cu, Pb, Zn y Colas las concentraciones de los sulfatos y sólidos disueltos totales son altas.

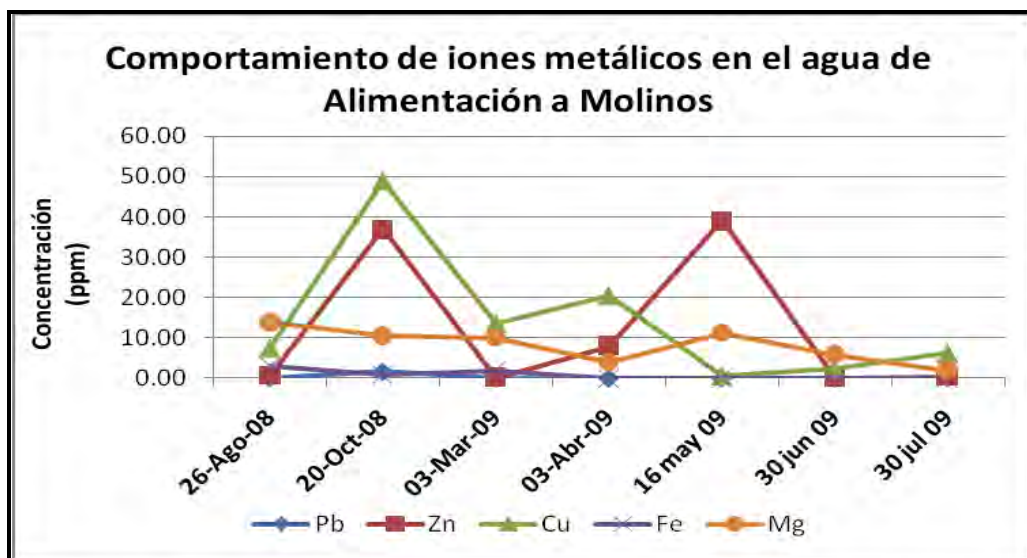


Figura D.14. Concentración de los iones metálicos de interés en la corriente de agua que es alimentada los molinos. Se observa que las concentraciones de los iones de Cu y Zn son las que tienen una presencia considerable en el agua de proceso.

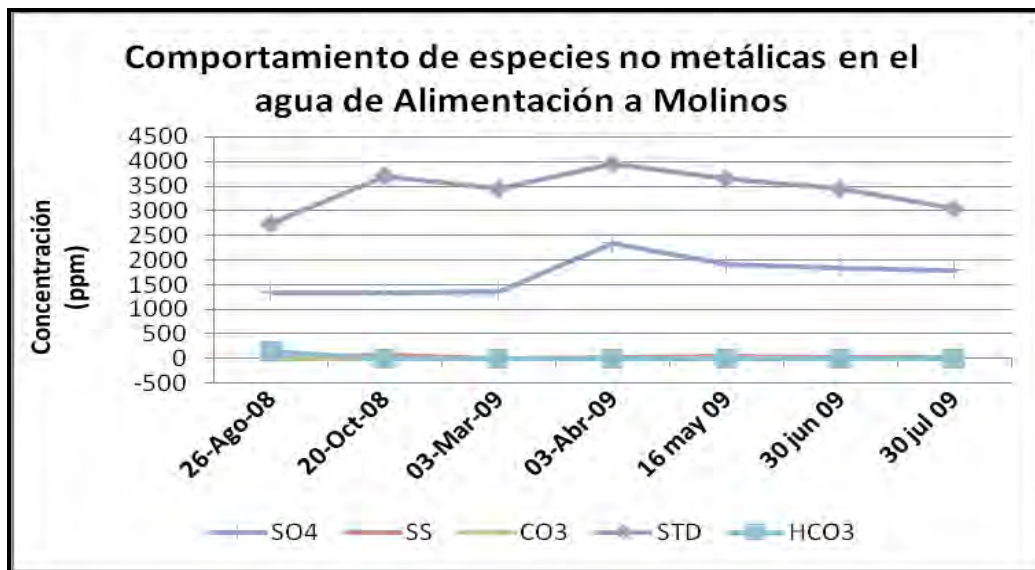


Figura D.15. Concentración de de las especies no metálicas de interés en la corriente de agua que es alimentada los molinos. La concentración de sulfato y sólidos disueltos totales (STD), se observan elevadas, al igual que en las aguas recuperadas de la Presa de jales y de los espesadores.

**D.2. GRÁFICAS DE LA QUÍMICA DE LA PULPA DE LA SEGUNDA ETAPA DE INVESTIGACIÓN.**

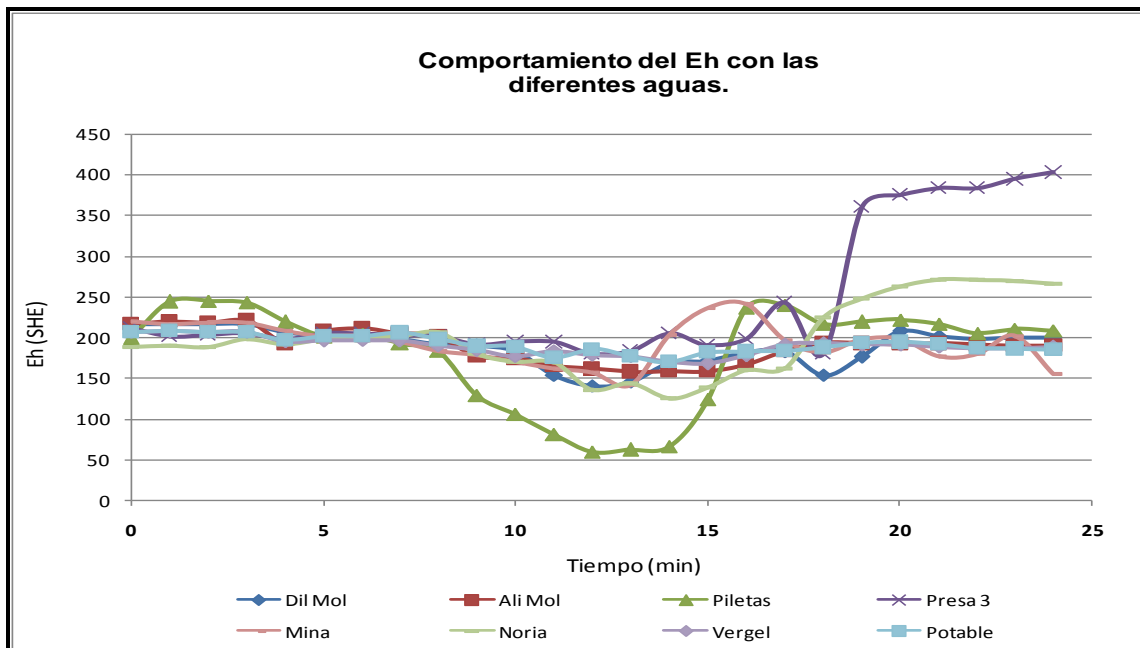


Figura D.16. Comportamiento del  $E_h$  durante la molienda en el laboratorio. Se observa que en general el potencial tiende a disminuir al ir transcurriendo el tiempo de la molienda, de la misma forma como se observó en la sección 5.2.1 en el perfil de  $E_h$  para la planta.

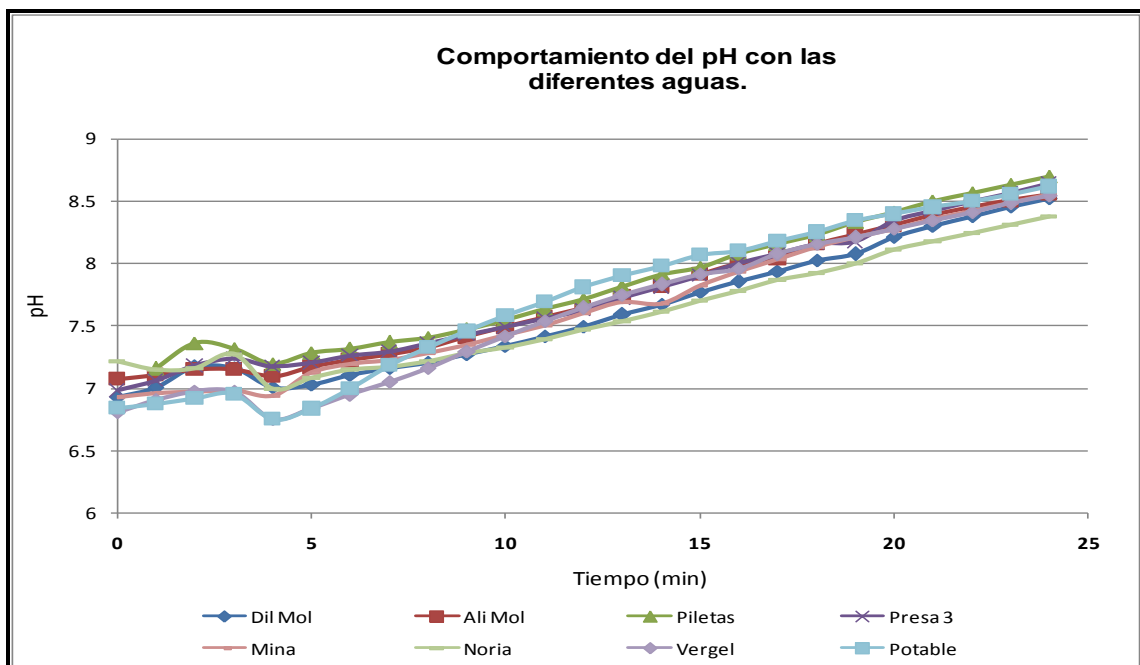


Figura D.17. Comportamiento del pH durante la molienda en el laboratorio. Se observa que la pulpa en los molinos tiende a ser ligeramente alcalina al ir transcurriendo la molienda, lo que refleja un incremento en la concentración del ion oxhidrilo.



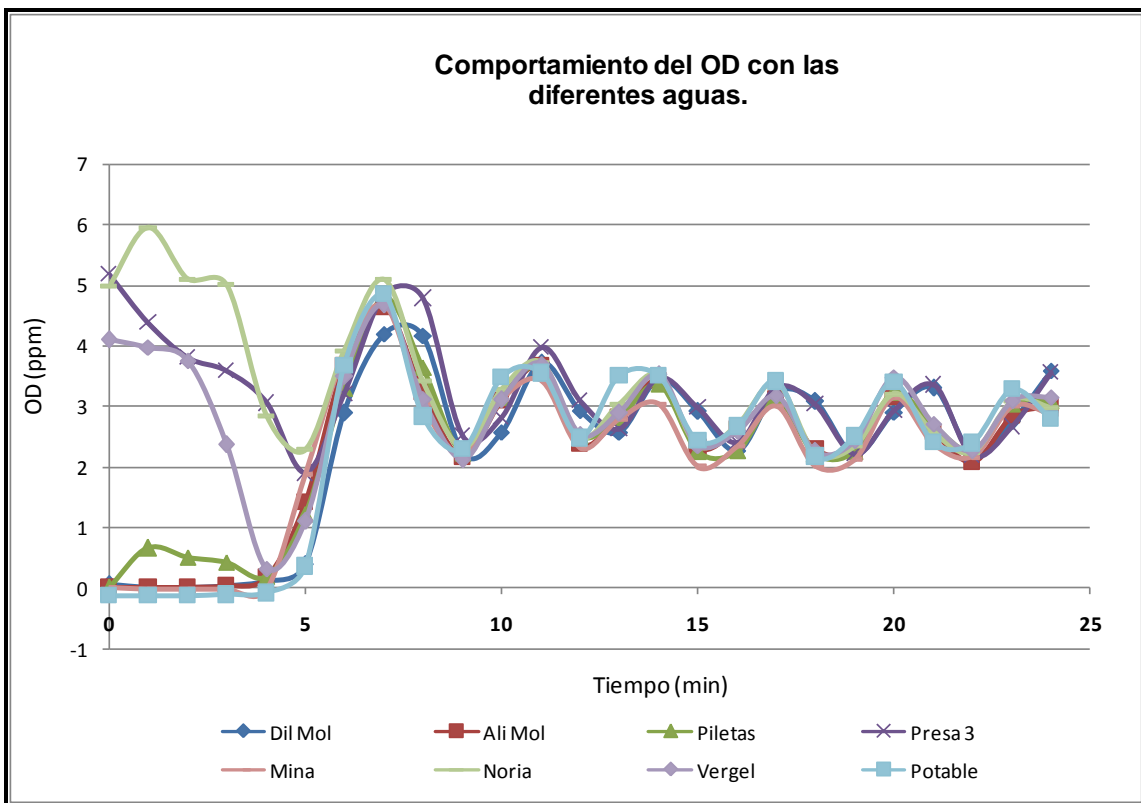


Figura D.18. Comportamiento del oxígeno disuelto durante el tiempo de molienda en el laboratorio.

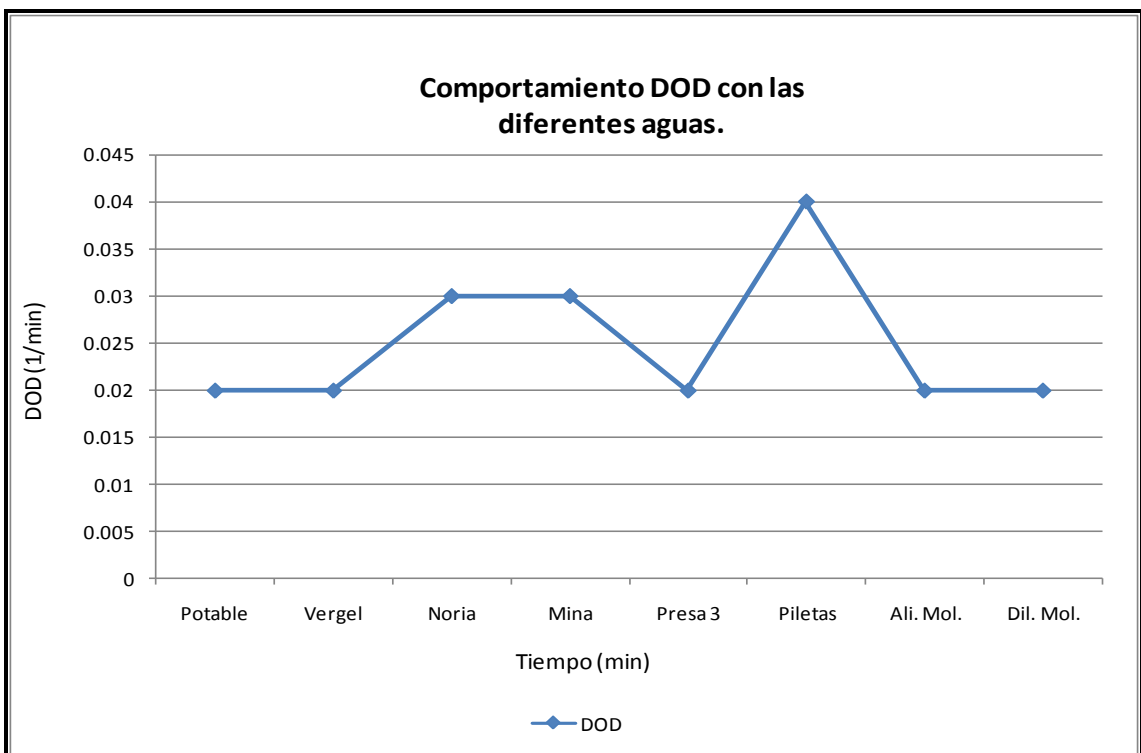


Figura D.19. Comparación de la demanda de oxígeno disuelto con cada tipo de agua utilizada en el estudio durante la molienda en el laboratorio.

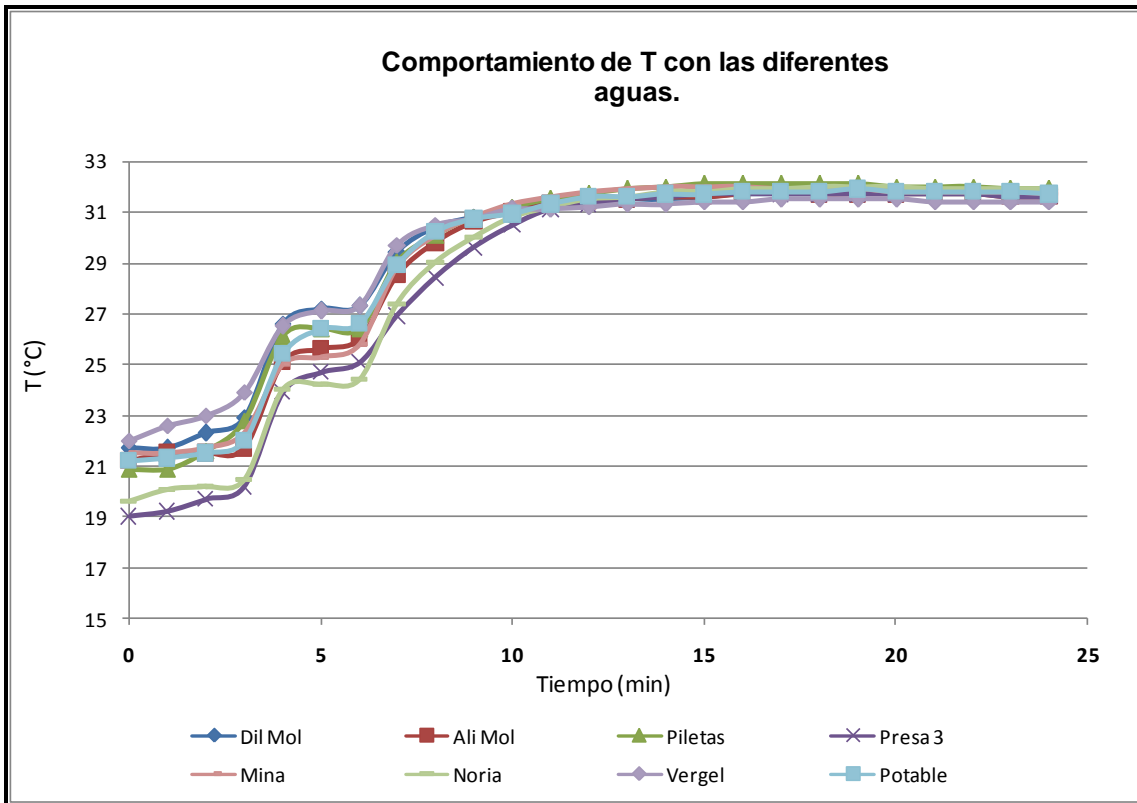


Figura D.20. Comportamiento ligeramente ascendente de la temperatura durante el tiempo de molienda en el laboratorio.

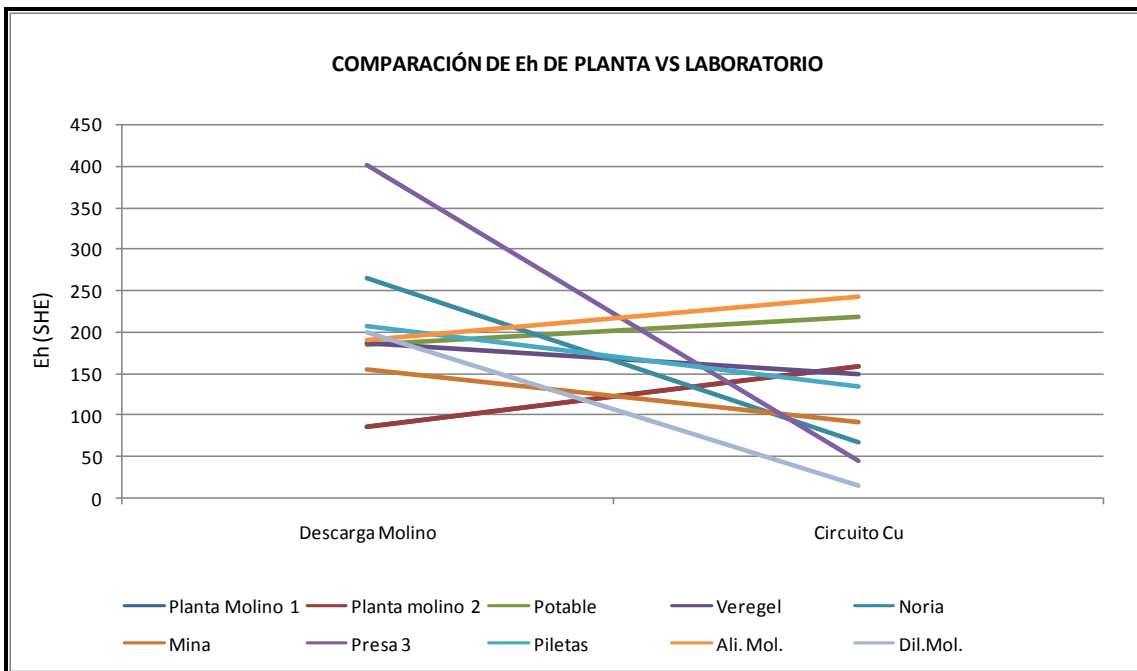


Figura D.21. Comportamiento de  $E_h$  durante la flotación en el laboratorio y en la planta.

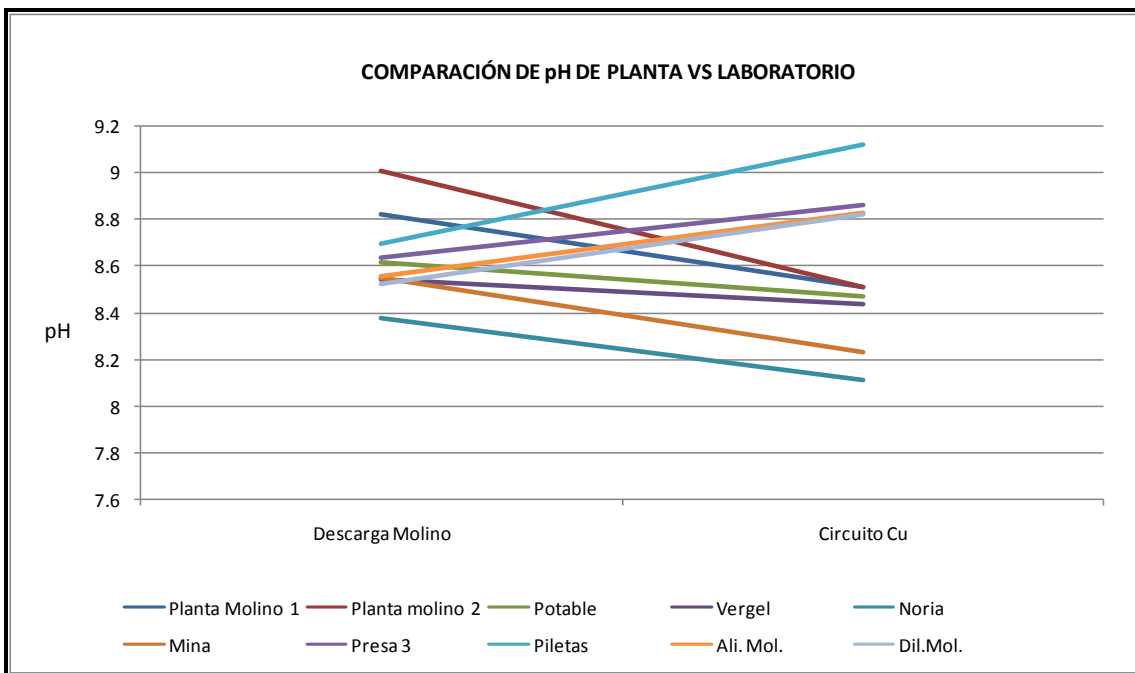


Figura D.22. Comportamiento de pH durante la flotación en el laboratorio y en la planta.

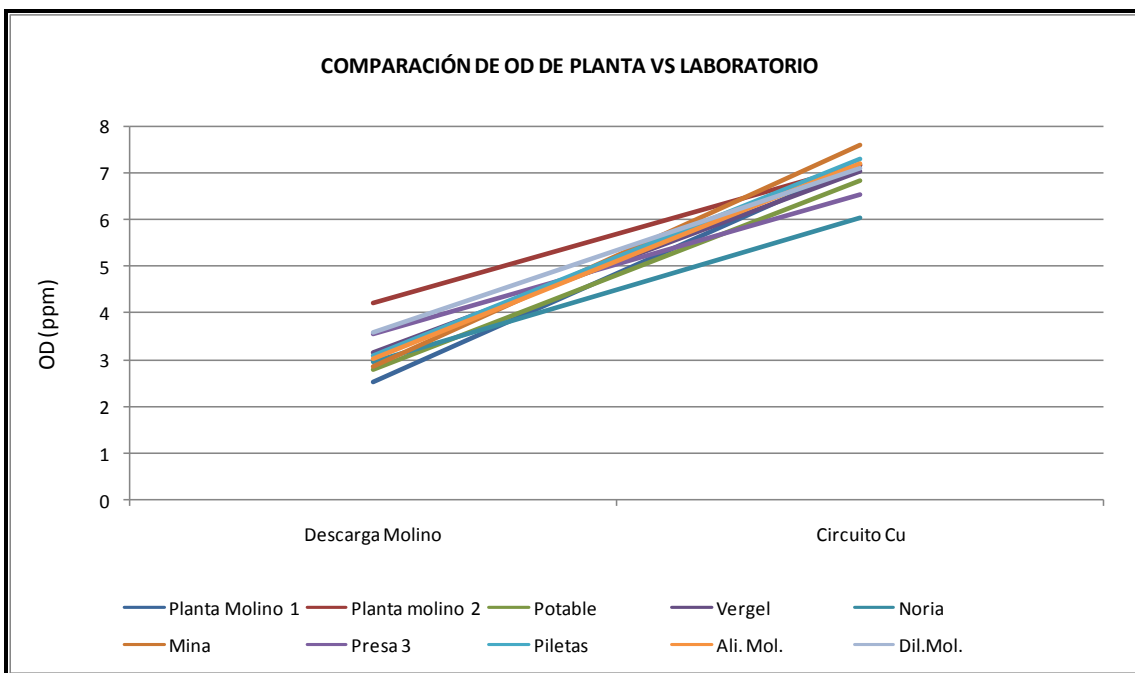


Figura D.23. Comportamiento de oxígeno disuelto durante la flotación en el laboratorio y en la planta.

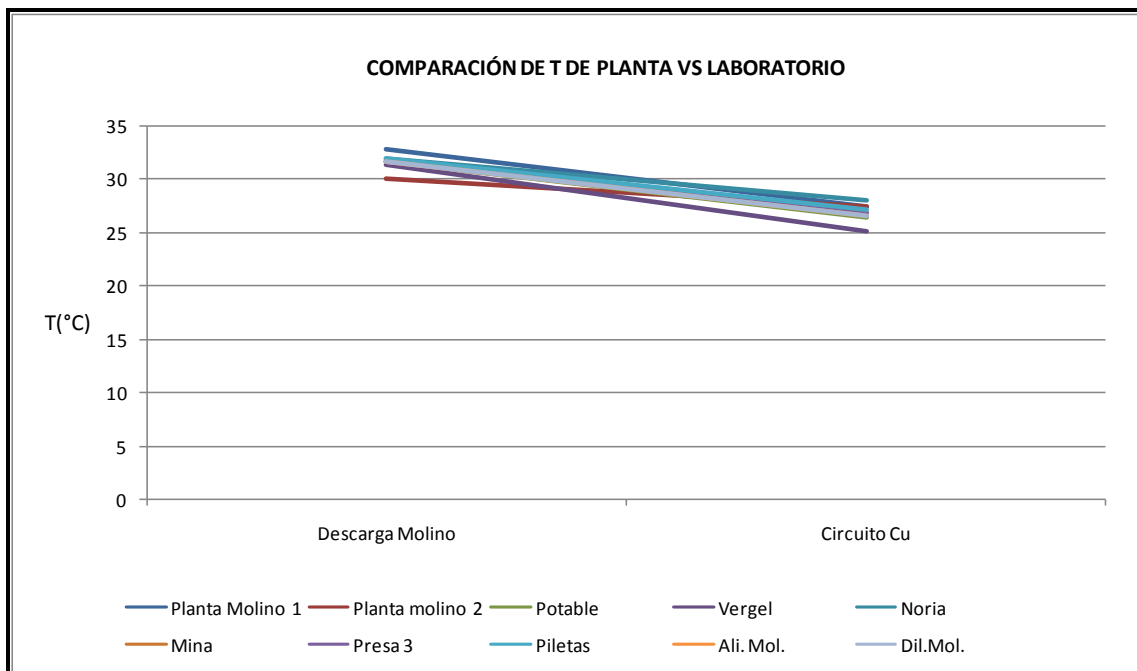


Figura D.24. Comportamiento de temperatura durante la flotación en el laboratorio y en la planta.

**D.3. GRÁFICAS DE LA QUÍMICA DE LA PULPA DE LA TERCERA ETAPA DE INVESTIGACIÓN.**

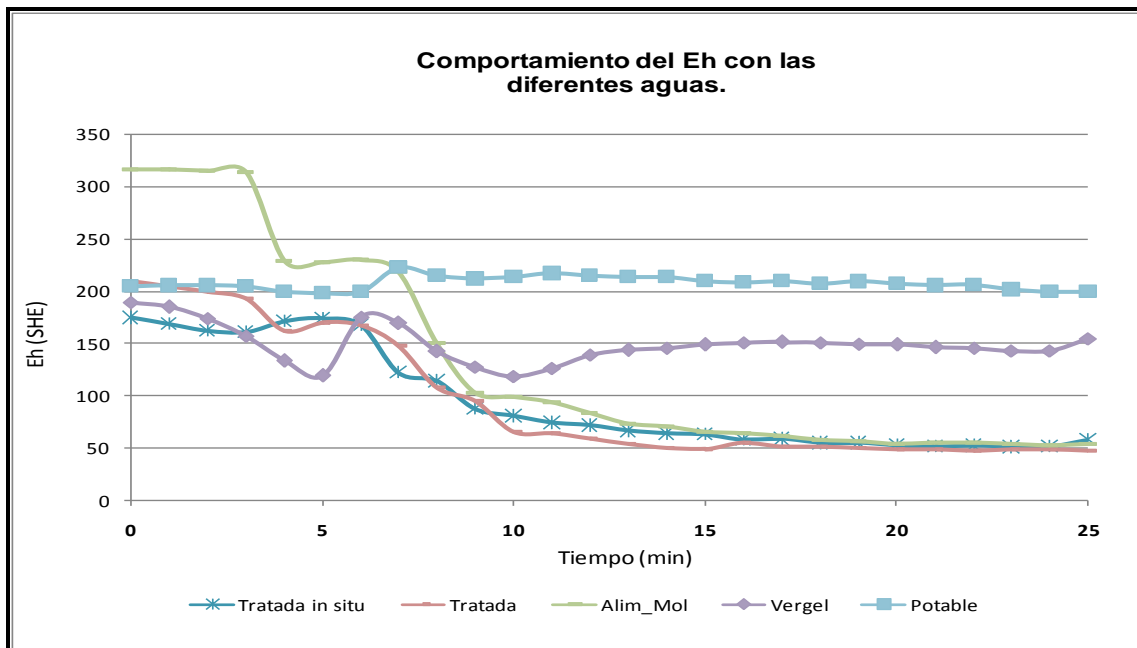


Figura D.25. Comportamiento del  $E_n$  durante la molienda en el laboratorio. Se observa que en general el potencial tiende a disminuir al ir transcurriendo el tiempo de la molienda, de la misma forma como se observó en la sección 5.2.1 en el perfil de  $E_n$  para la planta.

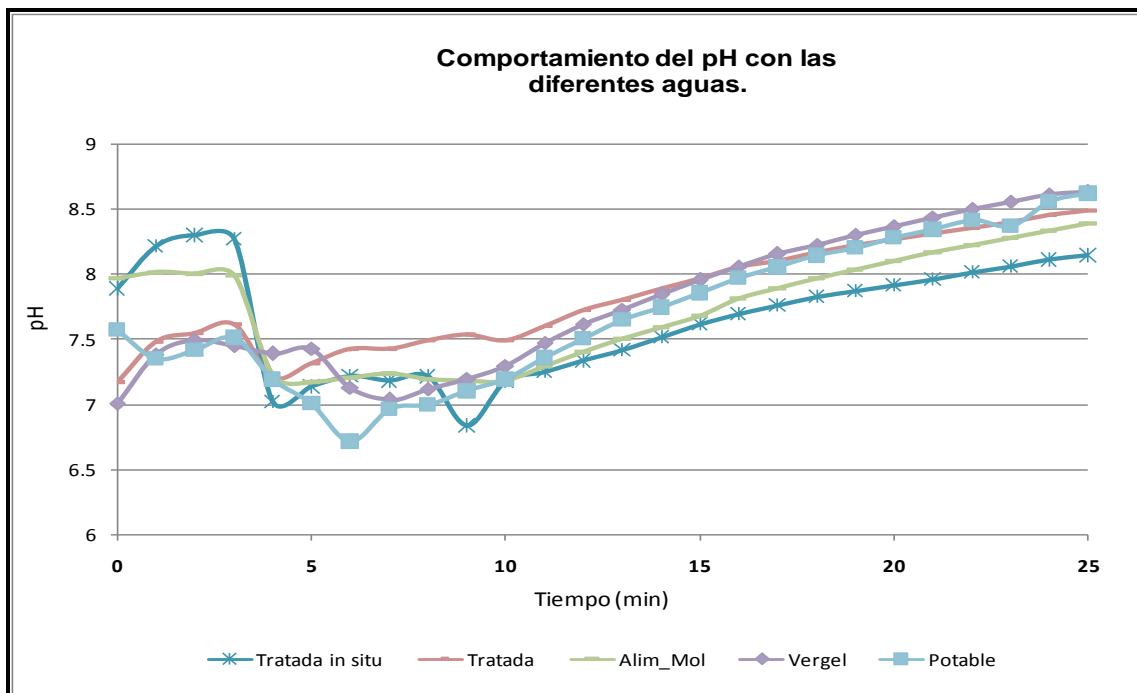


Figura D.26. Comportamiento del pH durante la molienda en el laboratorio. Se observa que la pulpa en los molinos tiende a ser ligeramente alcalina al ir transcurriendo la molienda, lo que refleja un incremento en la concentración del ion oxhidrilo.

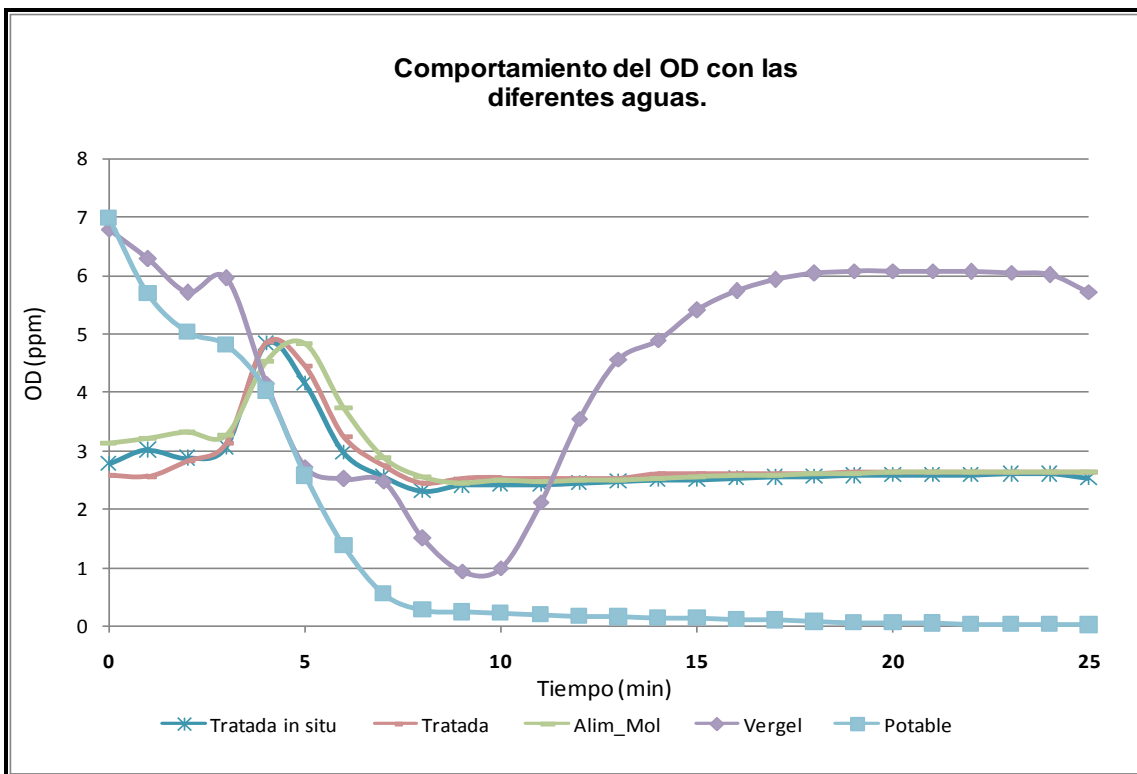


Figura D.27. Comportamiento del oxígeno disuelto durante el tiempo de molienda en el laboratorio.

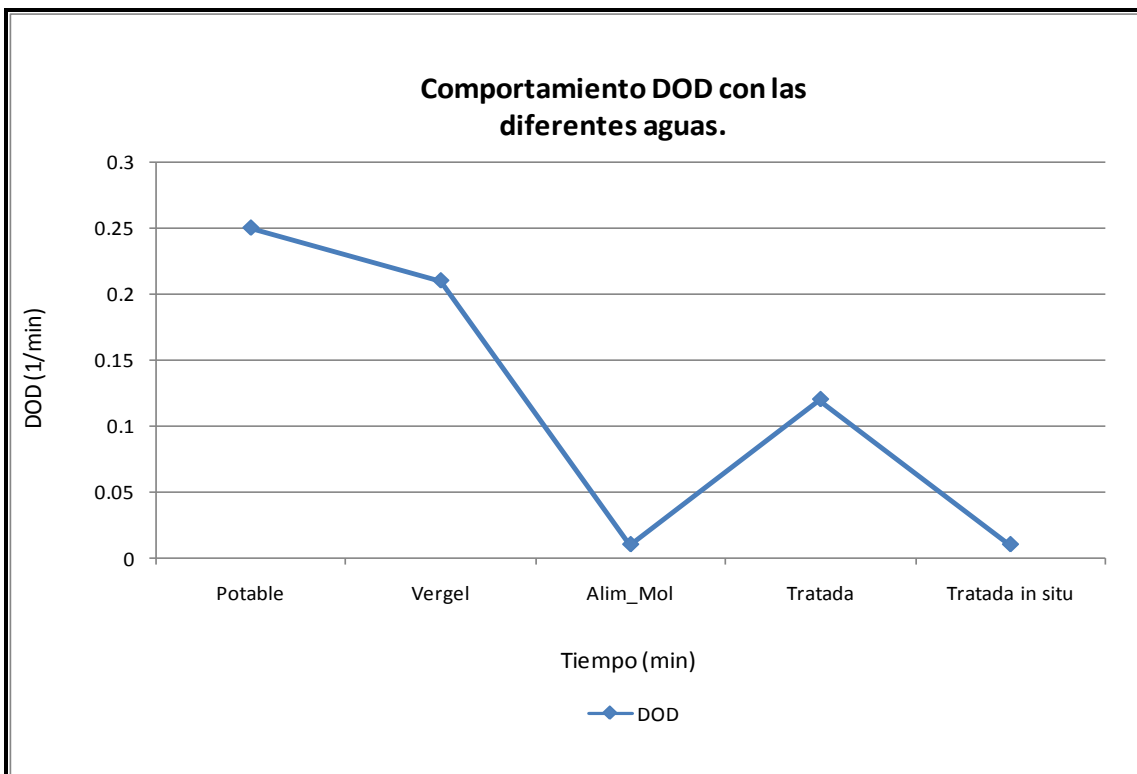


Figura D.28. Comparación de la demanda de oxígeno disuelto con cada tipo de agua utilizada en el estudio durante la molienda en el laboratorio.

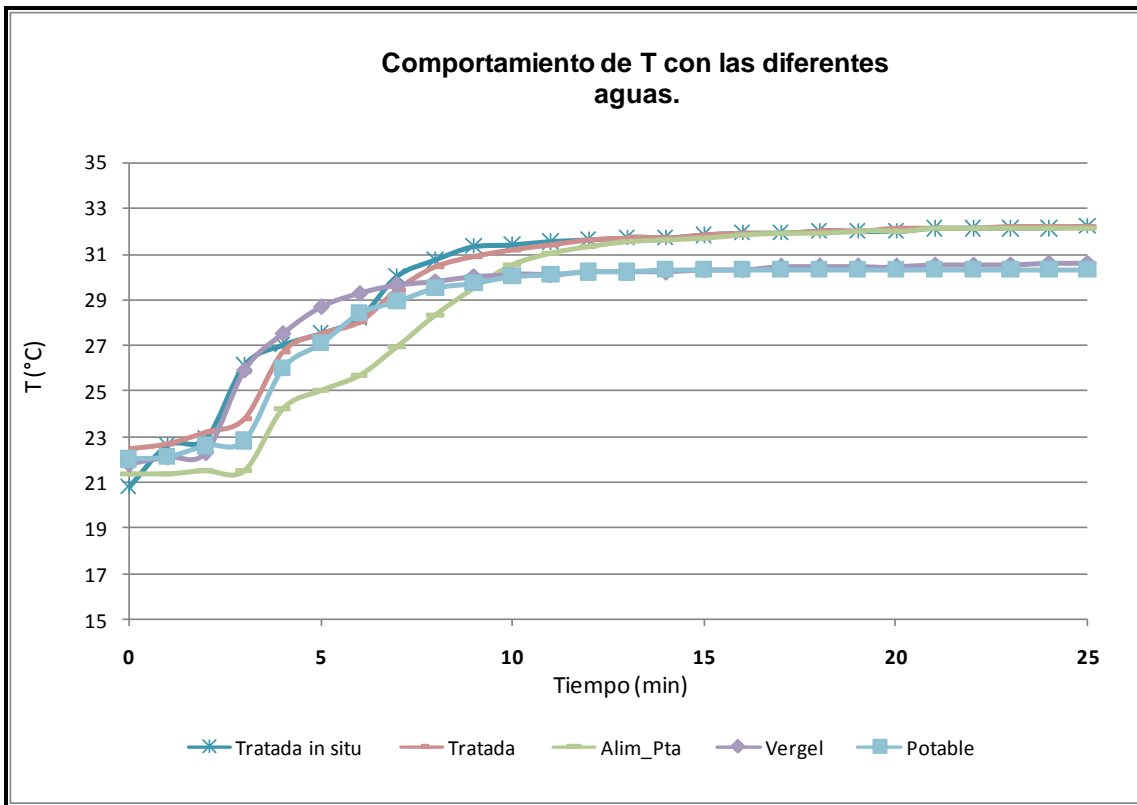


Figura D.29. Comportamiento ligeramente ascendente de la temperatura durante el tiempo de molienda en el laboratorio.

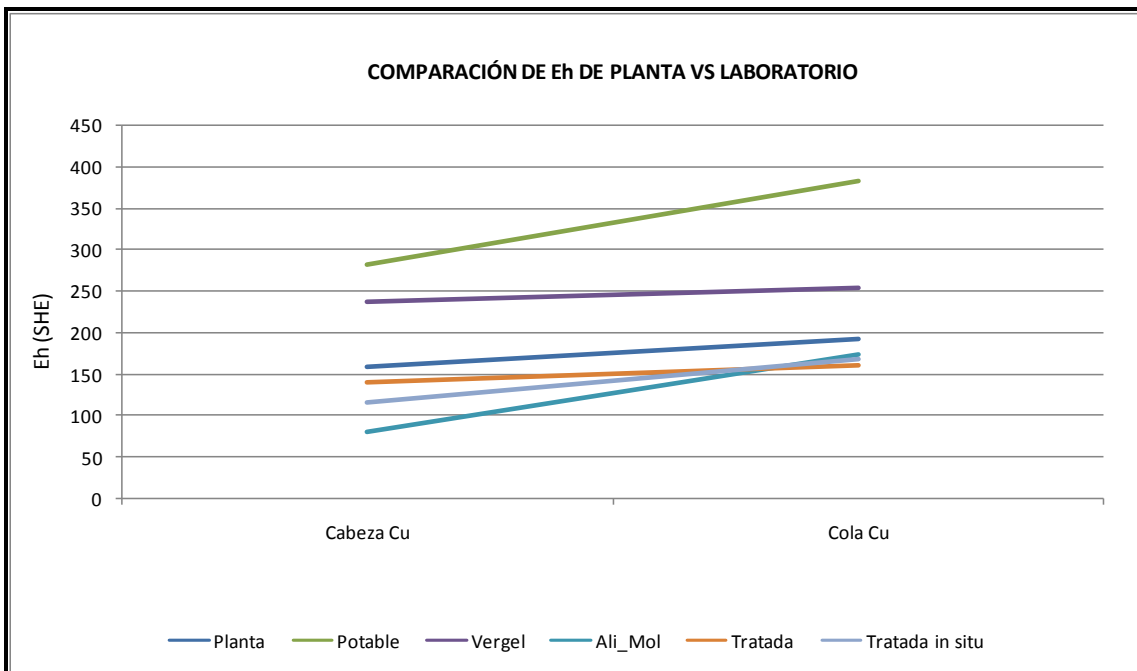


Figura D.30. Comportamiento de  $E_h$  durante la flotación en el laboratorio y en la planta.

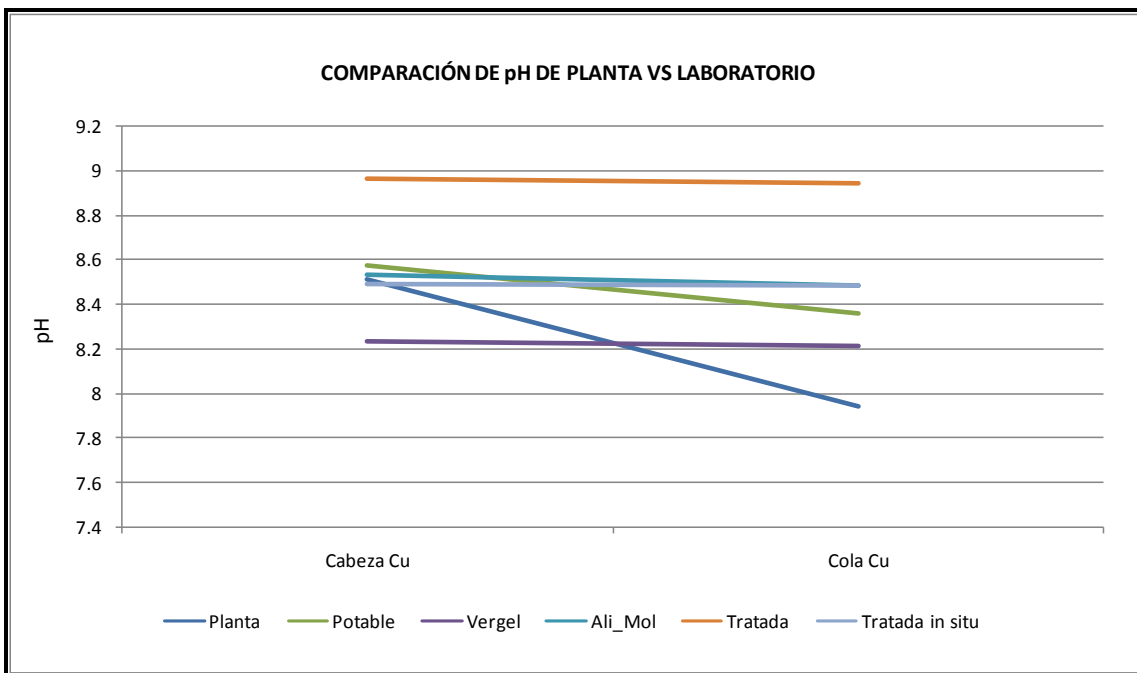


Figura D.31. Comportamiento de pH durante la flotación en el laboratorio y en la planta.

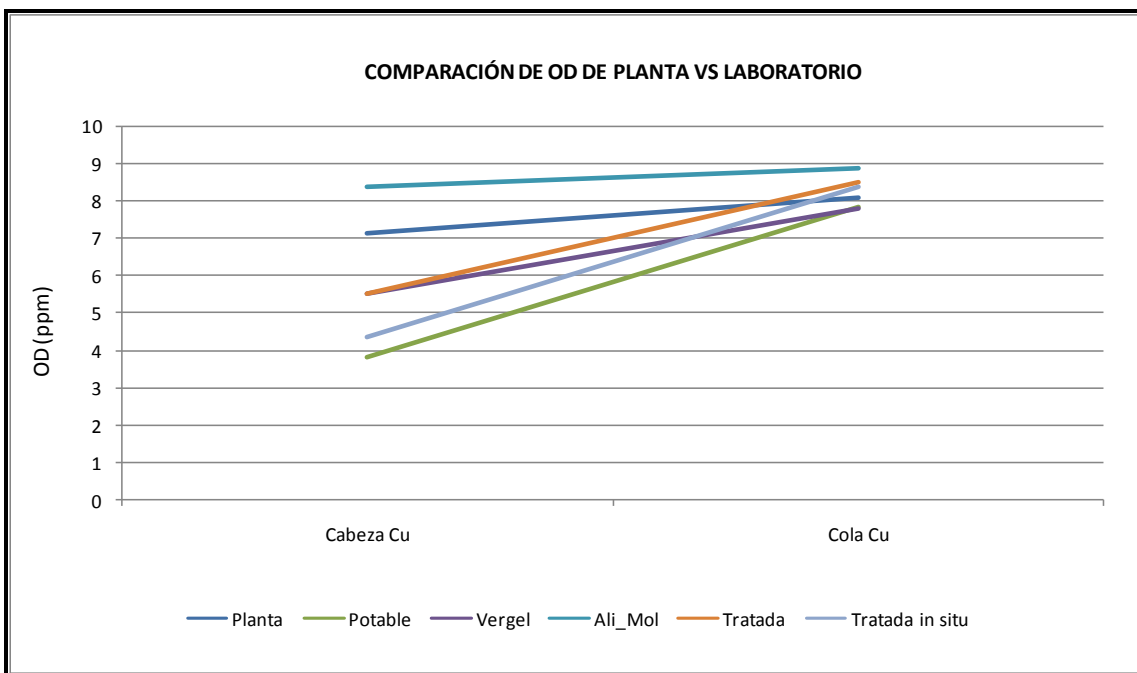


Figura D.32. Comportamiento de oxígeno disuelto durante la flotación en el laboratorio y en la planta.



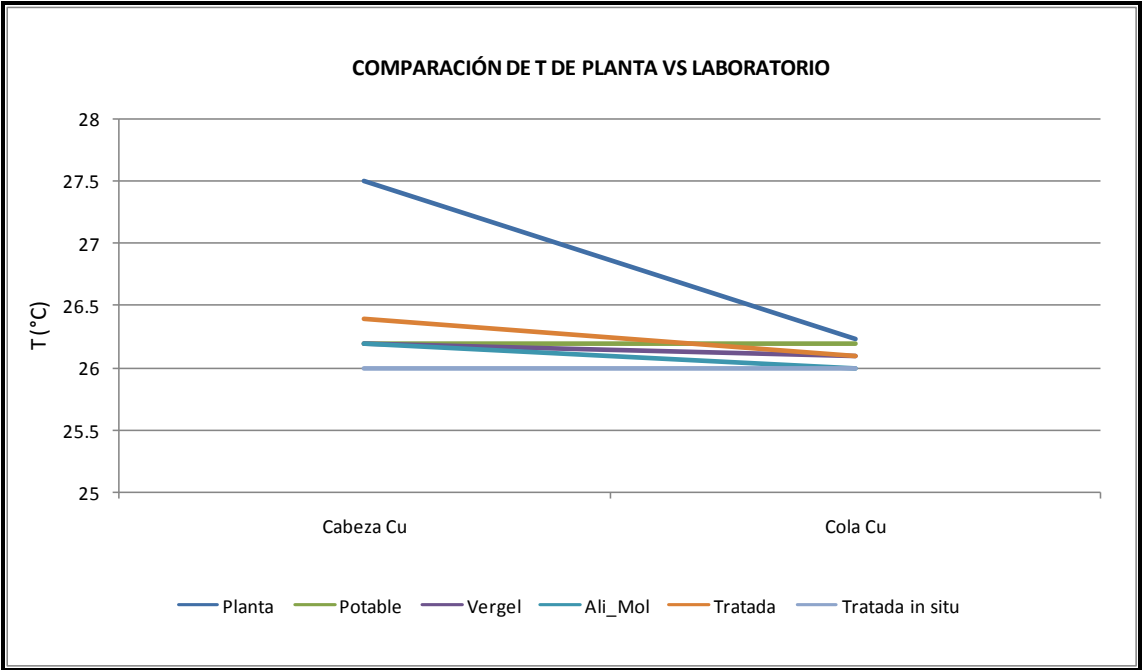


Figura D.33. Comportamiento de temperatura durante la flotación en el laboratorio y en la planta.

**D.4. REPRODUCIBILIDAD DE LAS PRUEBAS REALIZADAS CON LOS DIFERENTES TIPOS DE AGUA EN LA SEGUNDA ETAPA DE INVESTIGACIÓN.**

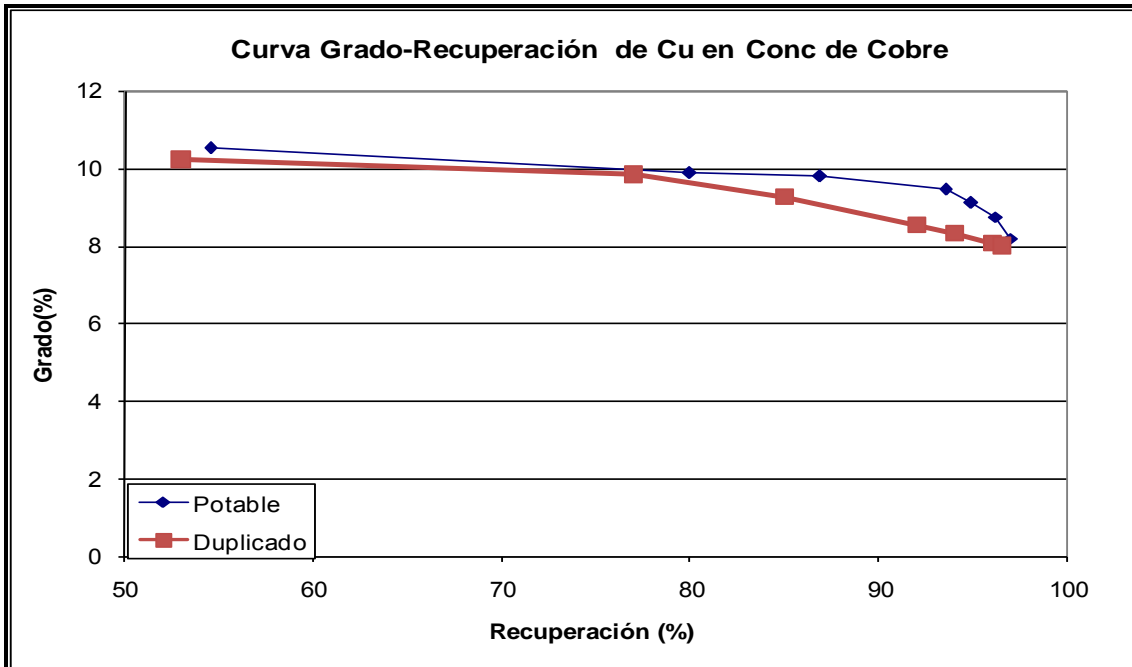


Figura D.34. Gráfica grado-recuperación para el cobre en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua potable.

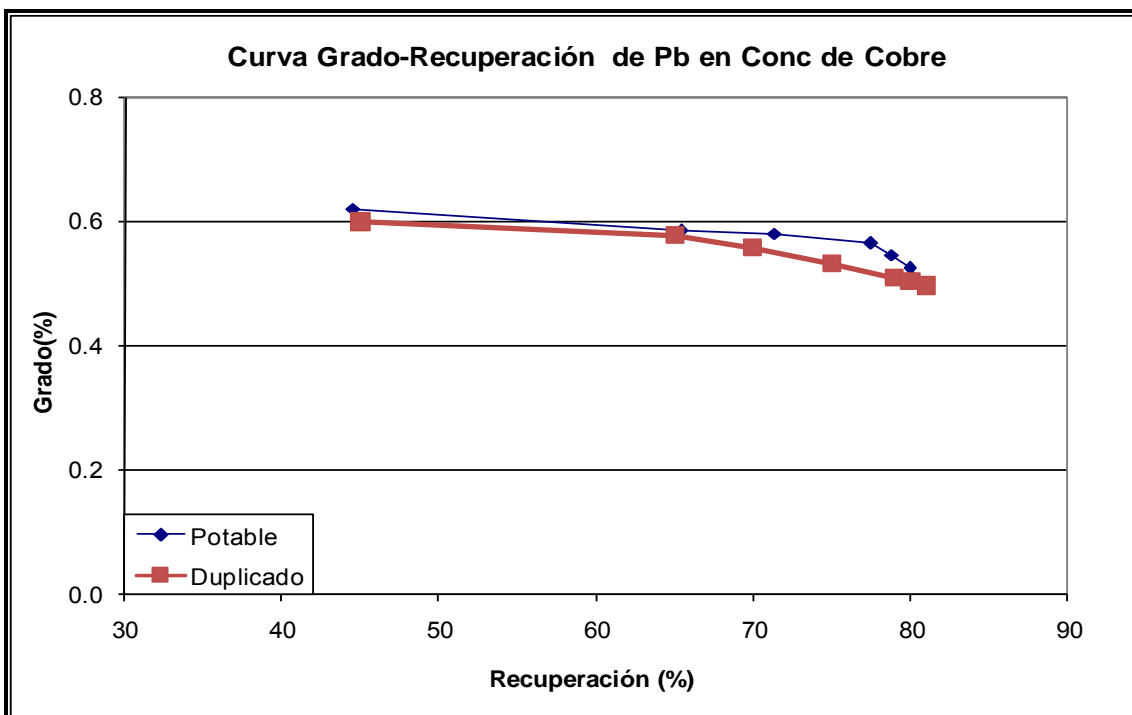


Figura D.35. Gráfica grado-recuperación para el plomo en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua potable.

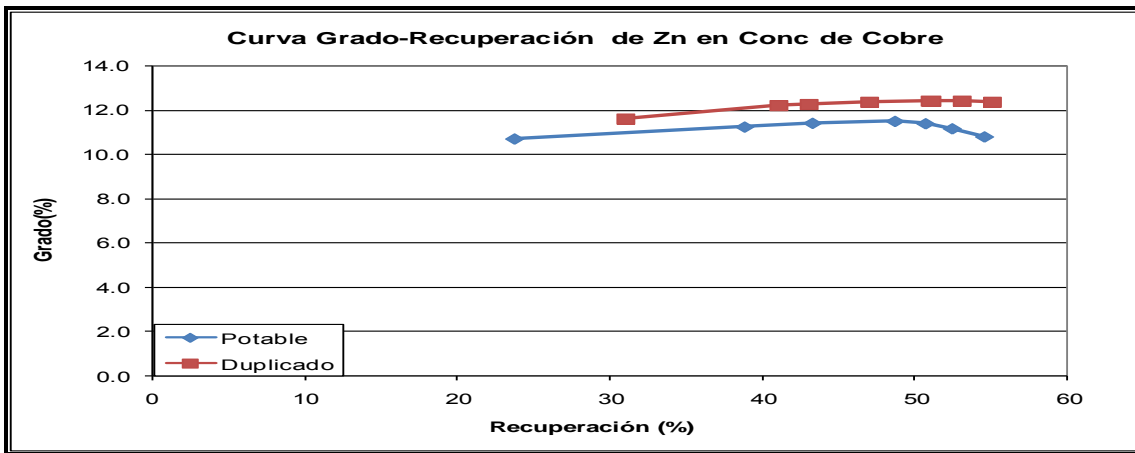


Figura D.36. Gráfica grado-recuperación para el zinc en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua potable.

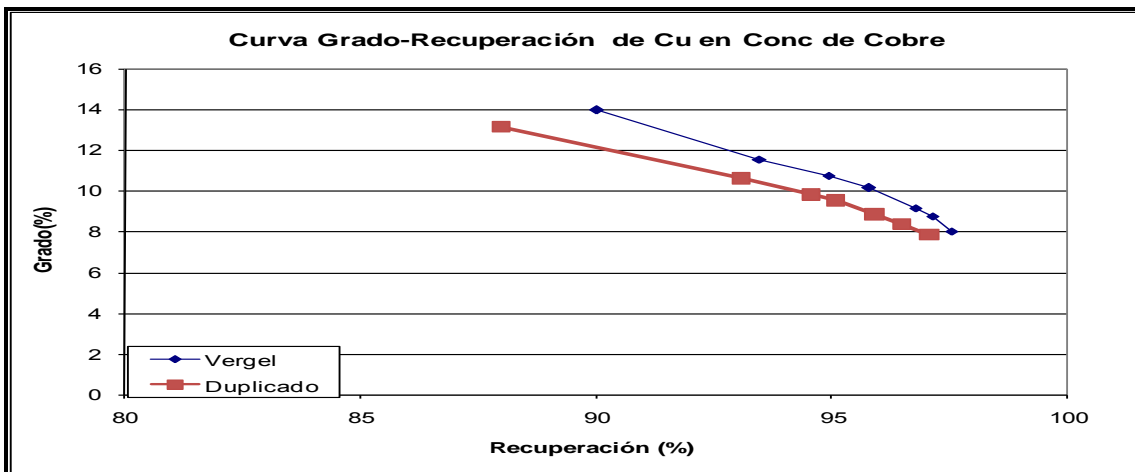


Figura D.37. Gráfica grado-recuperación para el cobre en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua del Vergel.

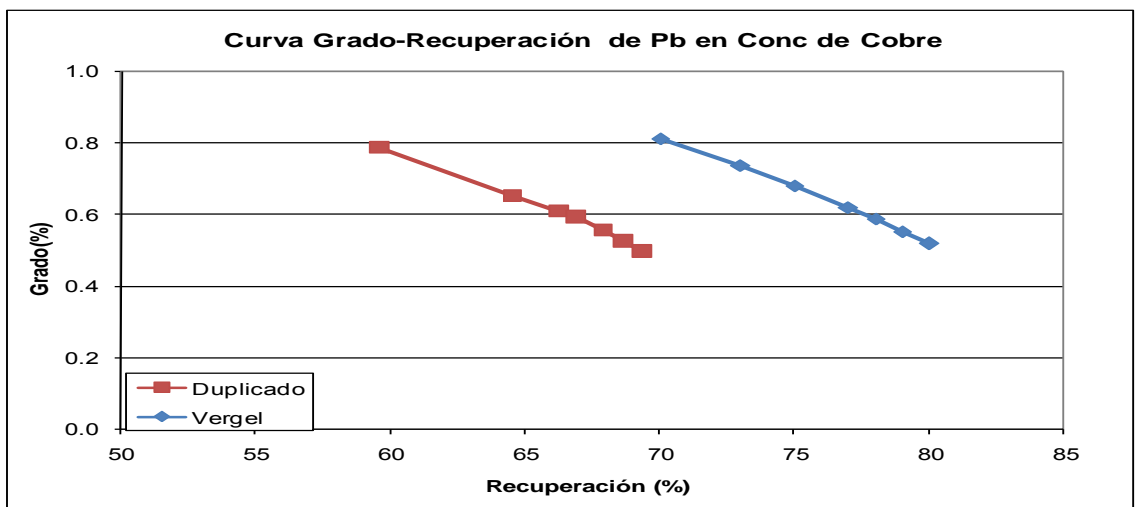


Figura D.38. Gráfica grado-recuperación para el plomo en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua del Vergel.

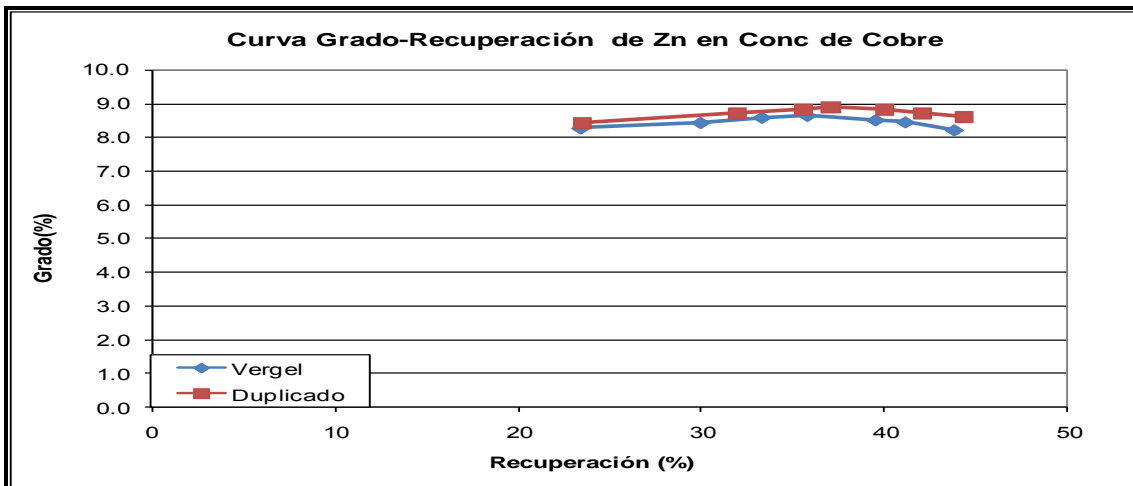


Figura D.39. Gráfica grado-recuperación para el zinc en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua del Vergel.

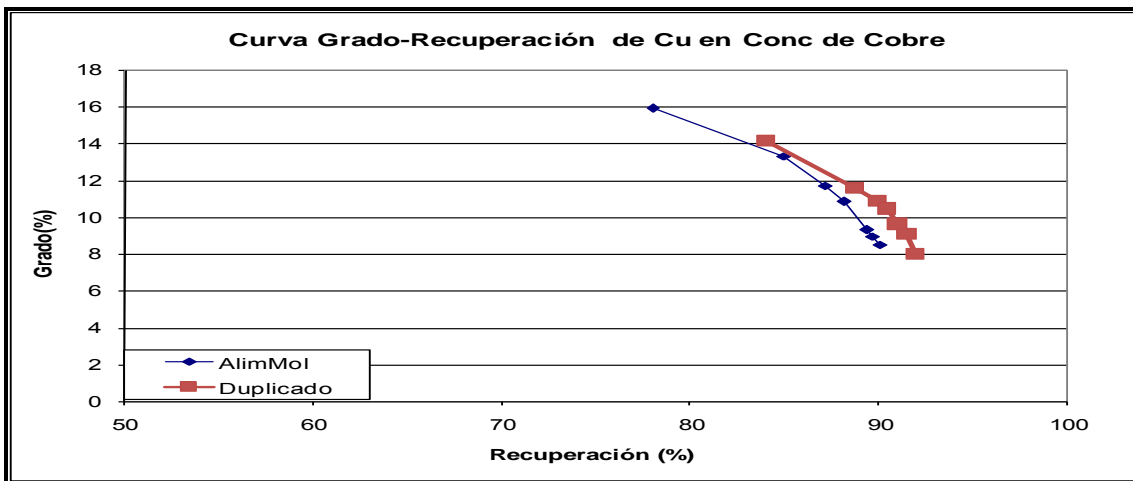


Figura D.40. Gráfica grado-recuperación para el cobre en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua alimentada a los molinos.

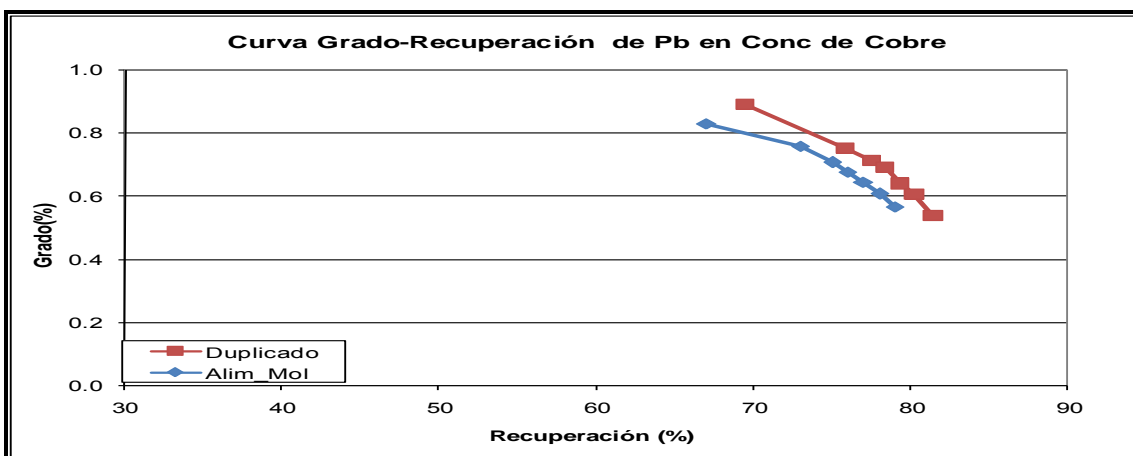


Figura D.41. Gráfica grado-recuperación para el plomo en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua alimentada a los molinos.

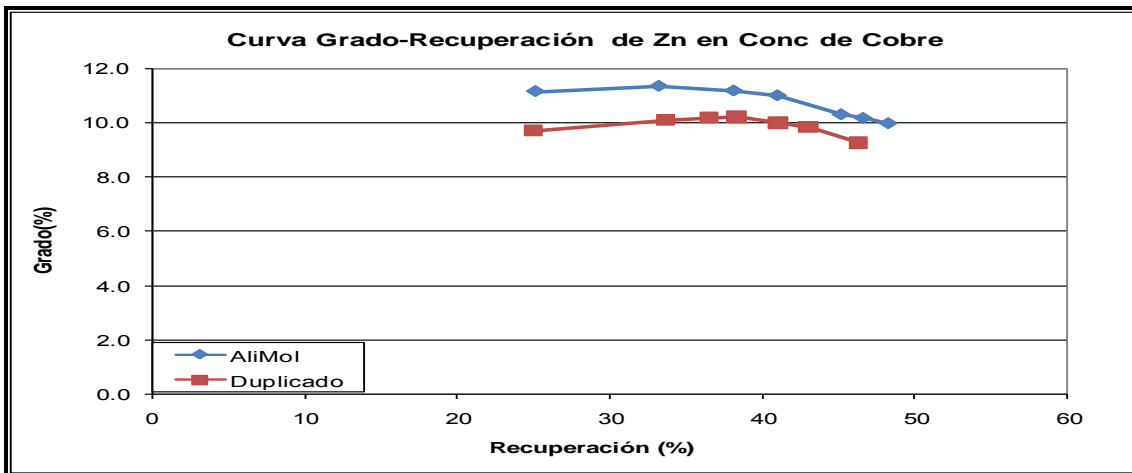


Figura D.42. Gráfica grado-recuperación para el zinc en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua alimentada a los molinos.

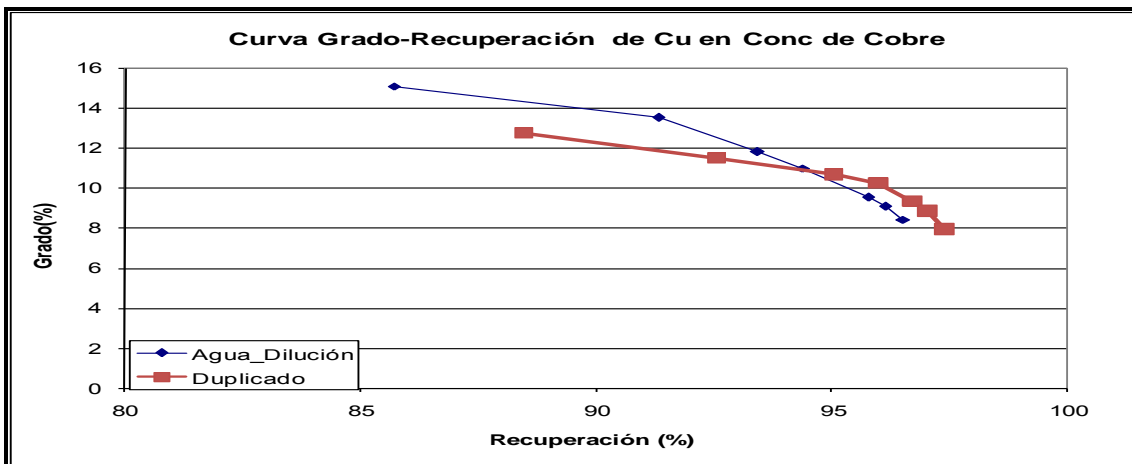


Figura D.43. Gráfica grado-recuperación para el cobre en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua agregada en la descarga del molino (agua de dilución).

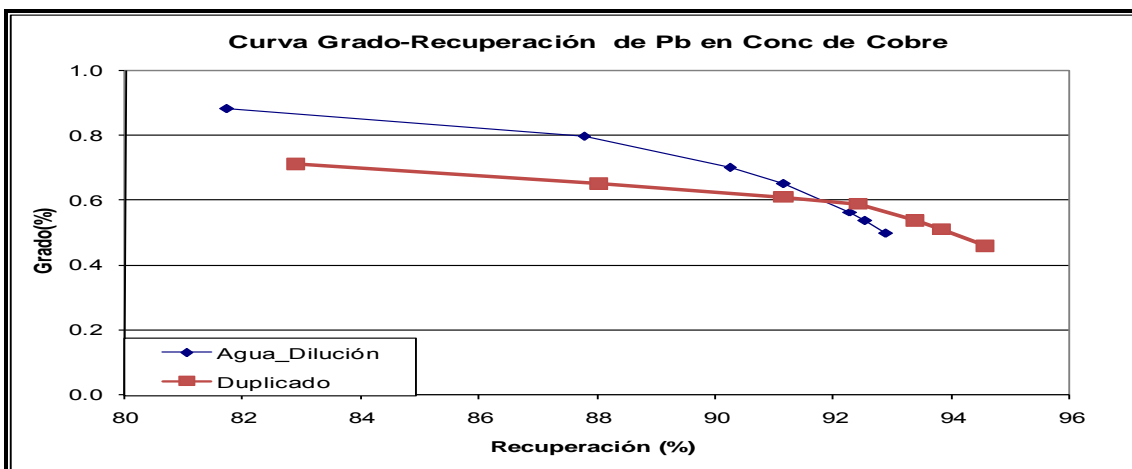


Figura D.44. Gráfica grado-recuperación para el plomo en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua agregada en la descarga del molino (agua de dilución).

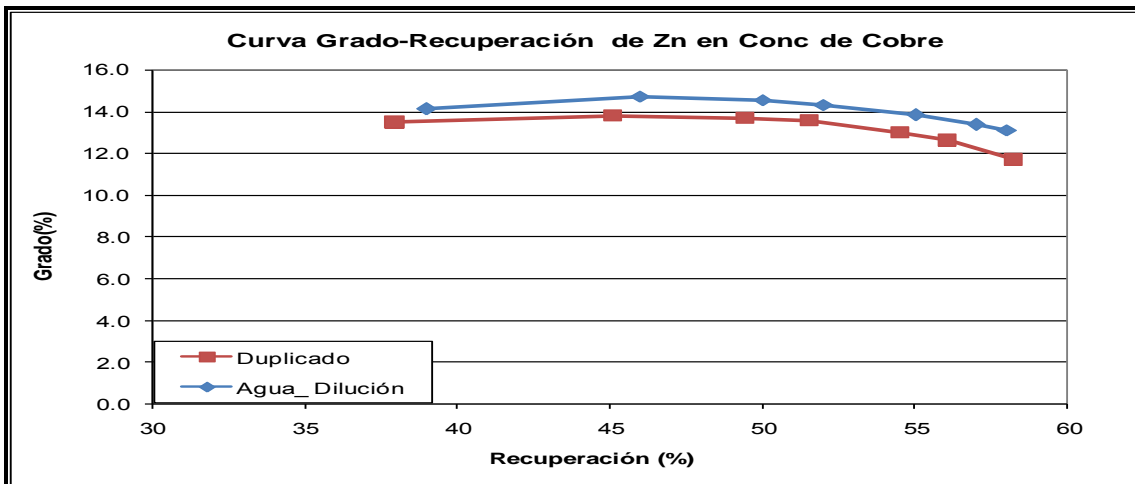


Figura D.45. Gráfica grado-recuperación para el zinc en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua agregada en la descarga del molino (agua de dilución).

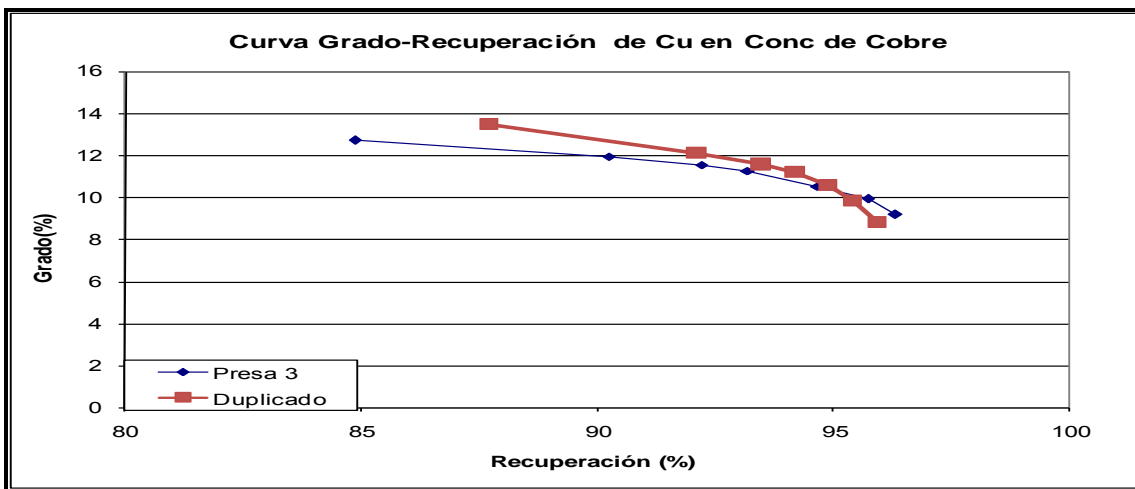


Figura D.46. Gráfica grado-recuperación para el cobre en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua recuperada de la Presa 3.

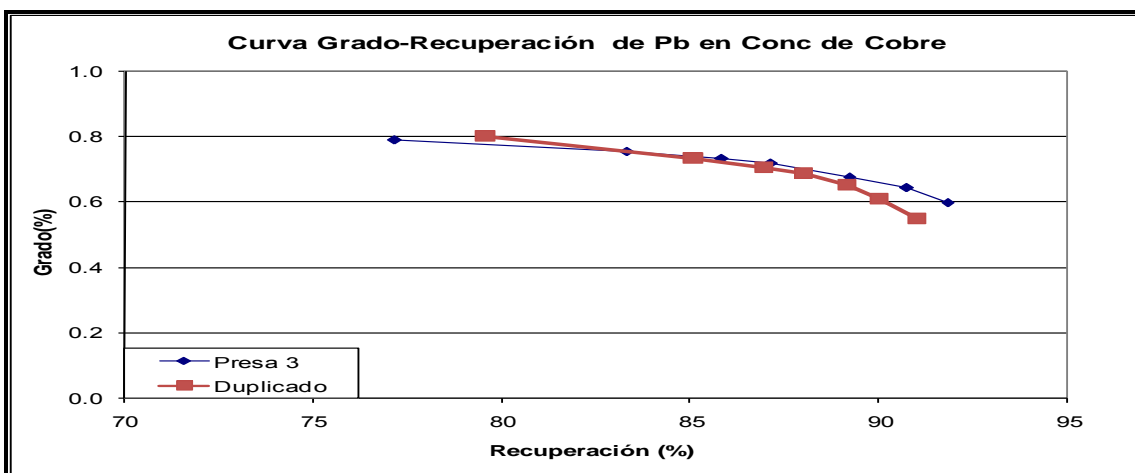


Figura D.47. Gráfica grado-recuperación para el plomo en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua recuperada de la Presa 3.

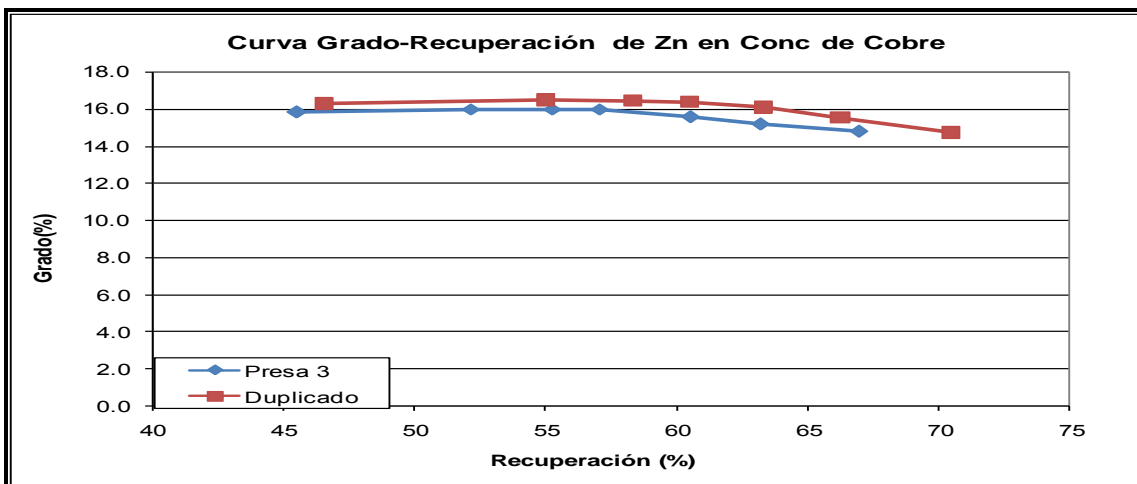


Figura D.48. Gráfica grado-recuperación para el zinc en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua recuperada de la Presa 3.

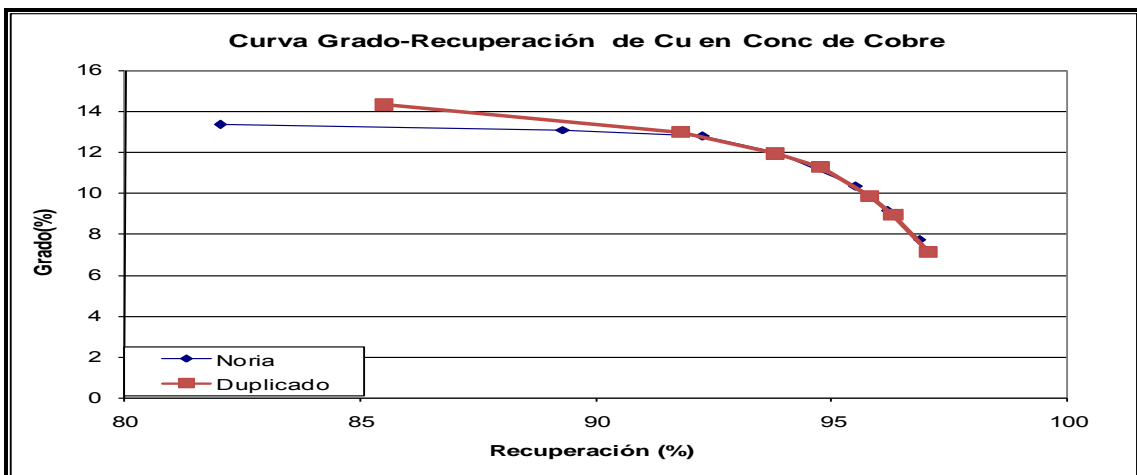


Figura D.49. Gráfica grado-recuperación para el cobre en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua de la Noria.

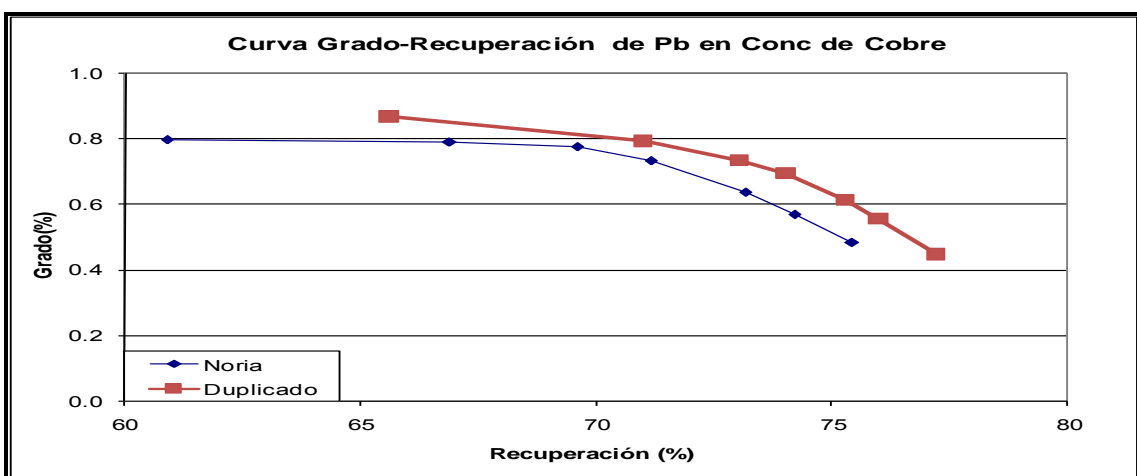


Figura D.50. Gráfica grado-recuperación para el plomo en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua de la Noria.

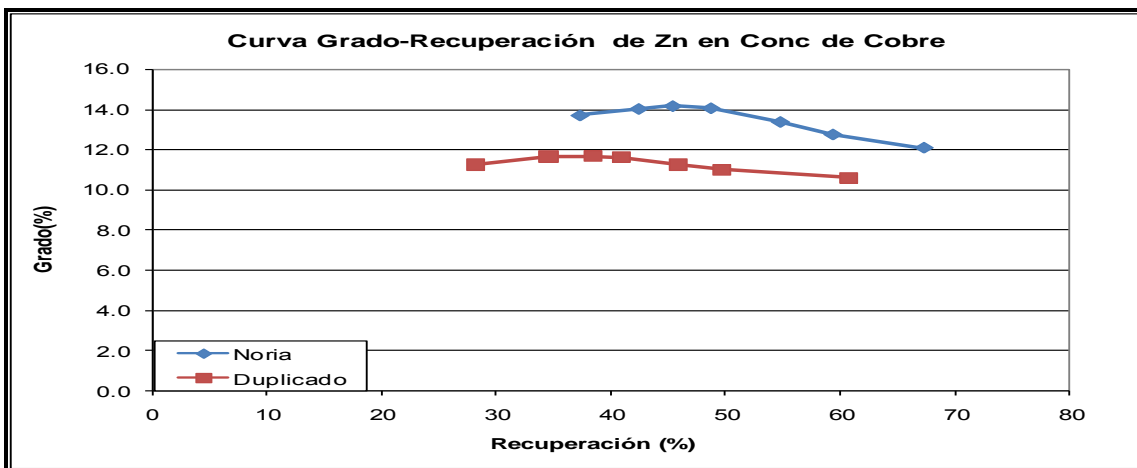


Figura D.51. Gráfica grado-recuperación para el zinc en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua de la Noria.

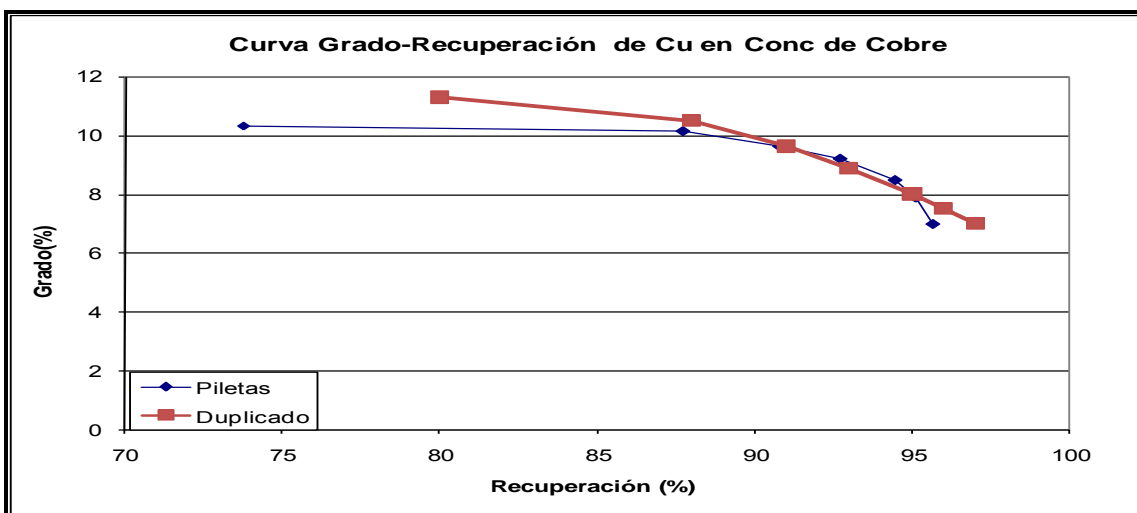


Figura D.52. Gráfica grado-recuperación para el cobre en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua recuperada de los tanques espesadores.

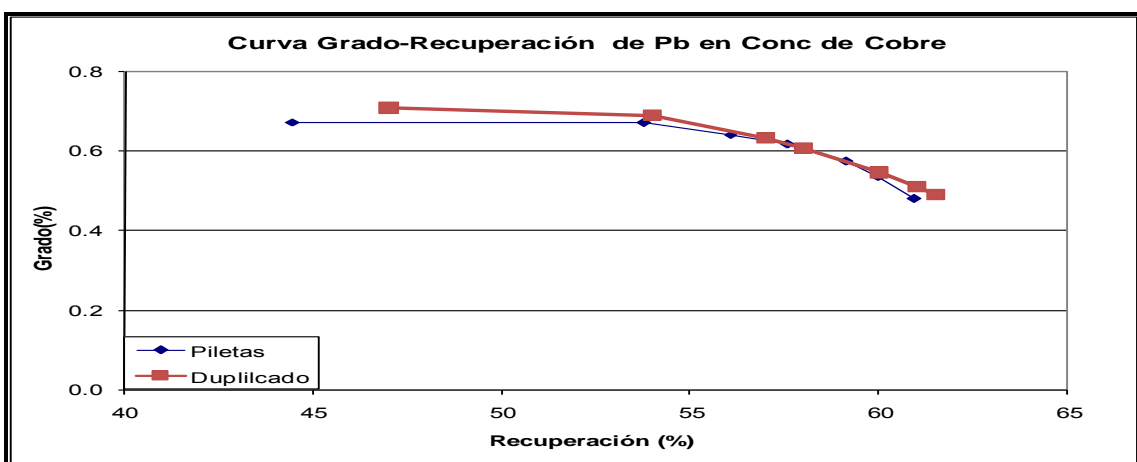


Figura D.53. Gráfica grado-recuperación para el plomo en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua recuperada de los tanques espesadores.



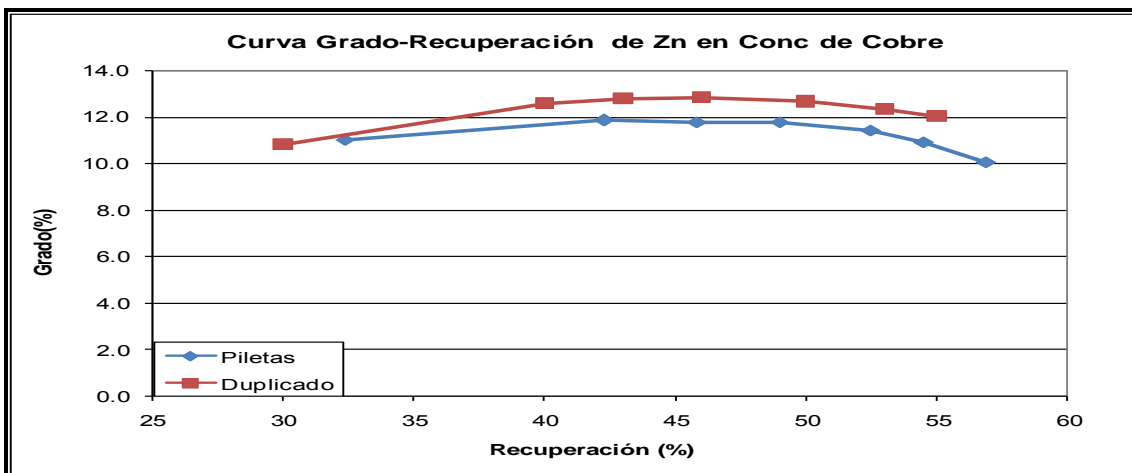


Figura D.54. Gráfica grado-recuperación para el zinc en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua recuperada de los tanques espesadores.

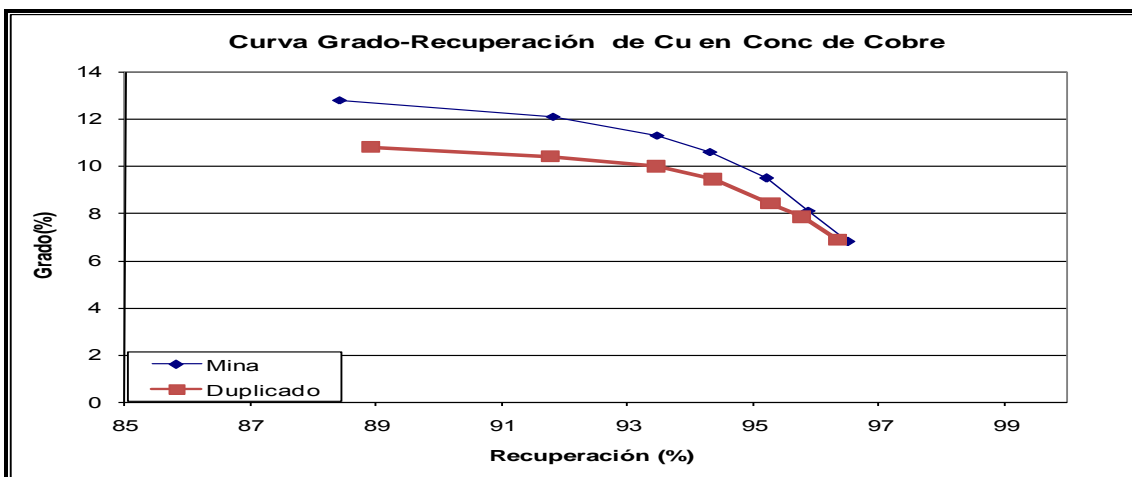


Figura D.55. Gráfica grado-recuperación para el cobre en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua de Mina.

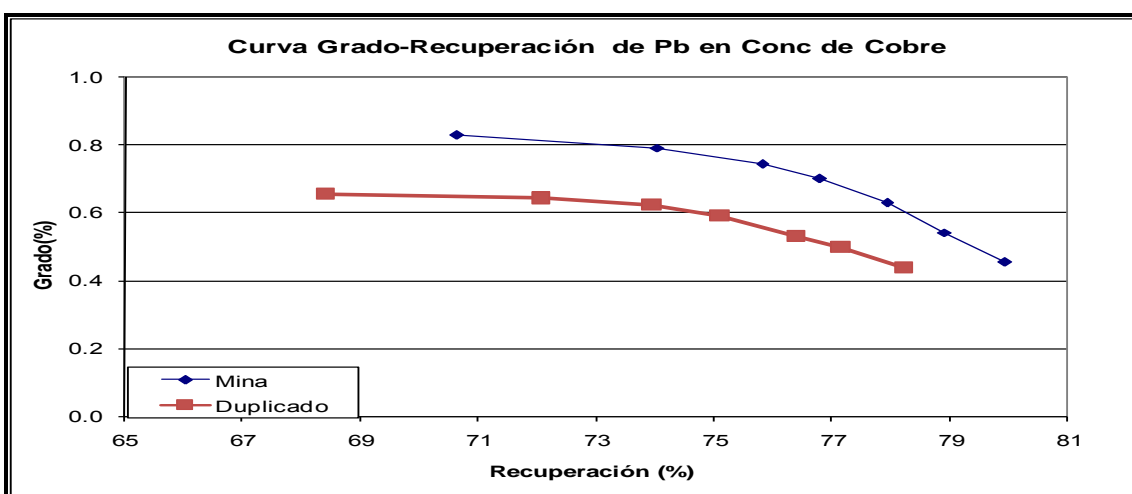


Figura D.56. Gráfica grado-recuperación para el plomo en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua de Mina.

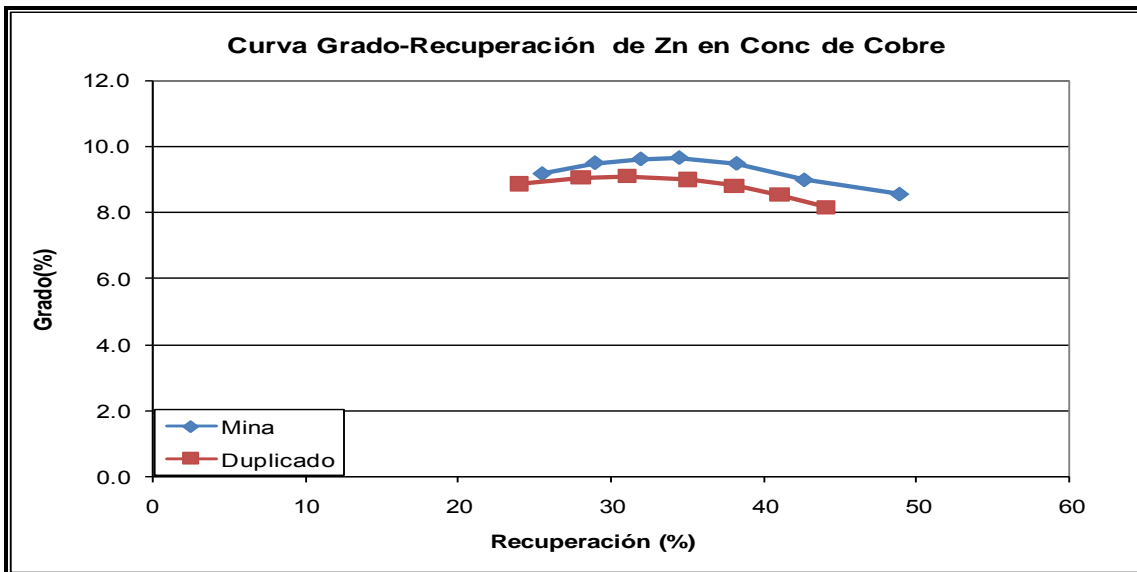


Figura D.57. Gráfica grado-recuperación para el zinc en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua de Mina.

**D.5. REPRODUCIBILIDAD DE LAS PRUEBAS REALIZADAS CON LOS DIFERENTES TIPOS DE AGUA EN LAS ETAPAS TRES Y CUATRO DE INVESTIGACIÓN.**

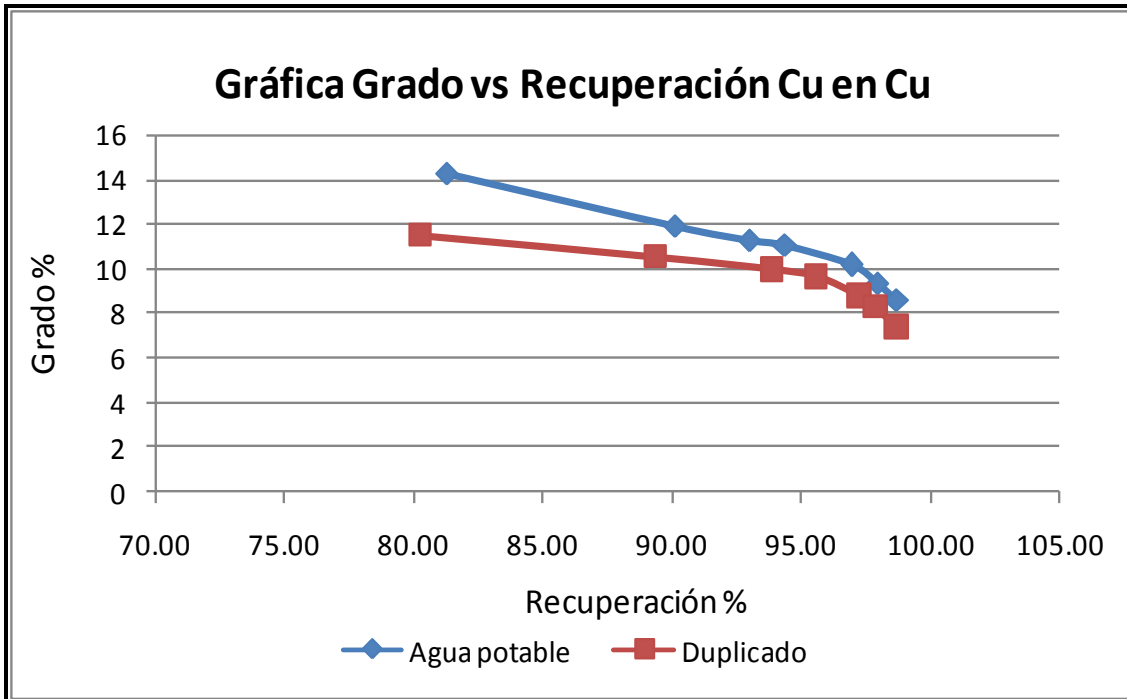


Figura D.58. Gráfica grado-recuperación para el cobre en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua de Potable.

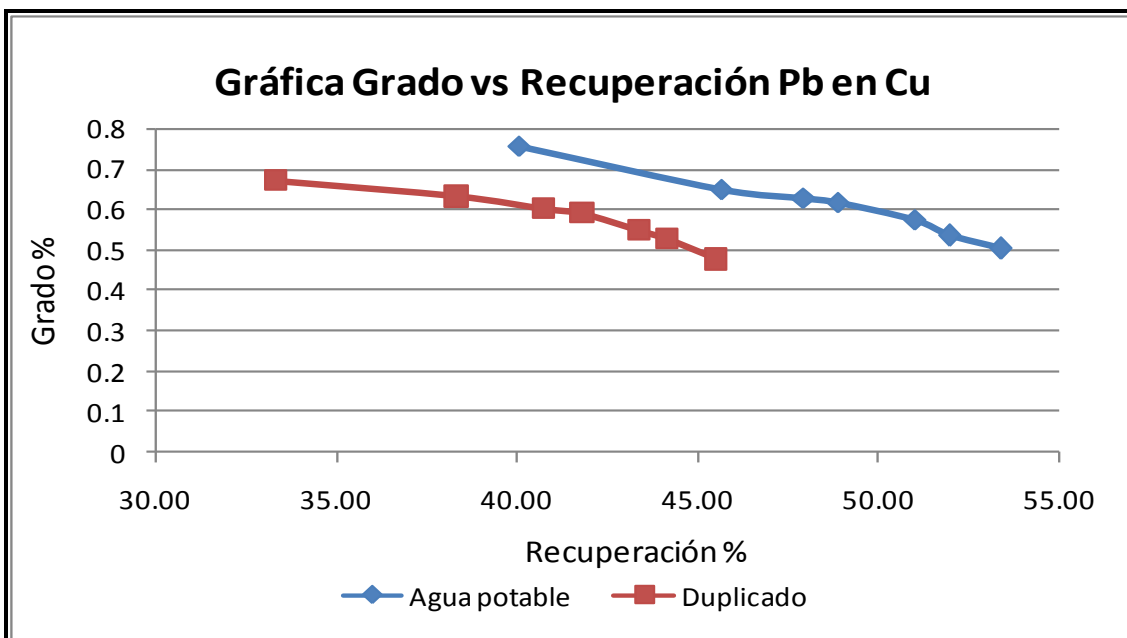


Figura D.59. Gráfica grado-recuperación para el plomo en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua de Potable.

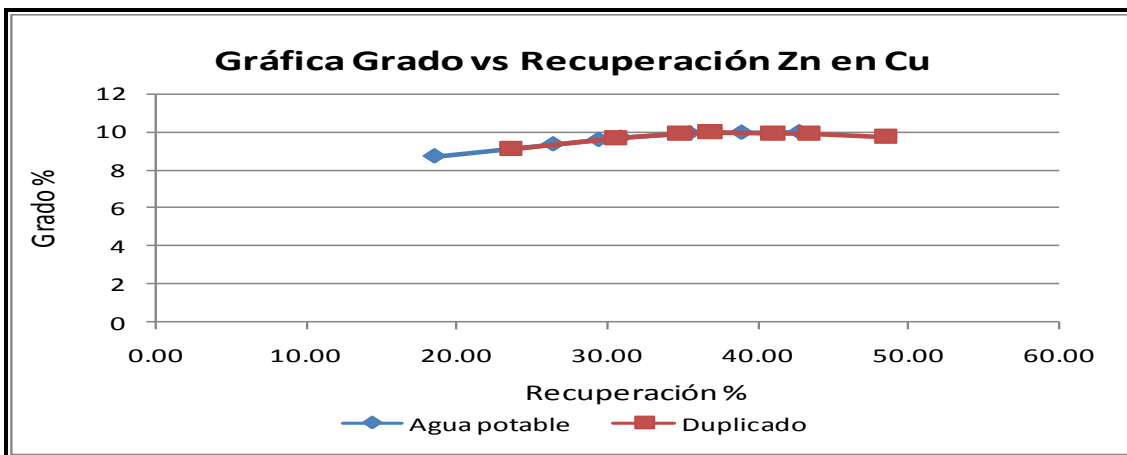


Figura D.60. Gráfica grado-recuperación para el zinc en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua de Potable.

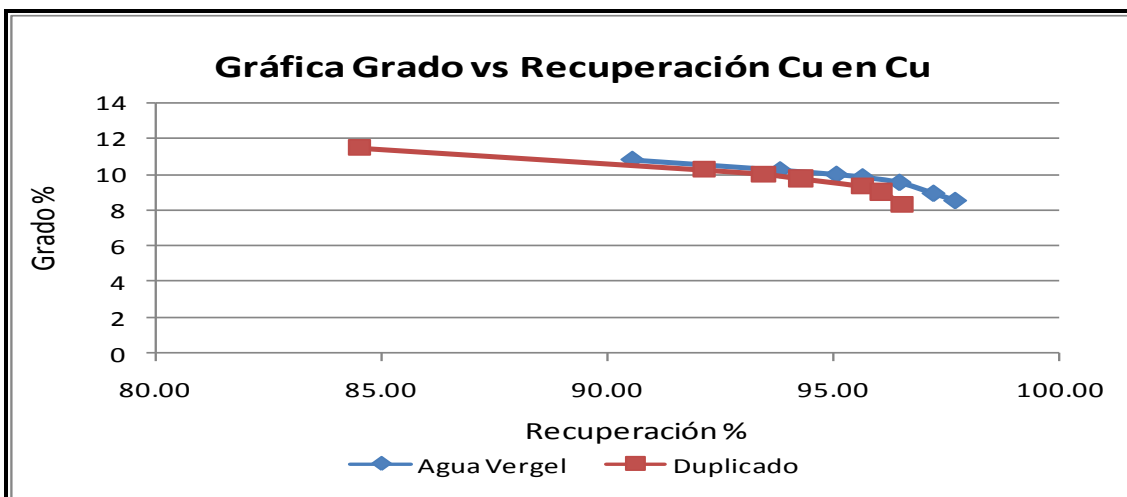


Figura D.61. Gráfica grado-recuperación para el cobre en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua de Vergel.

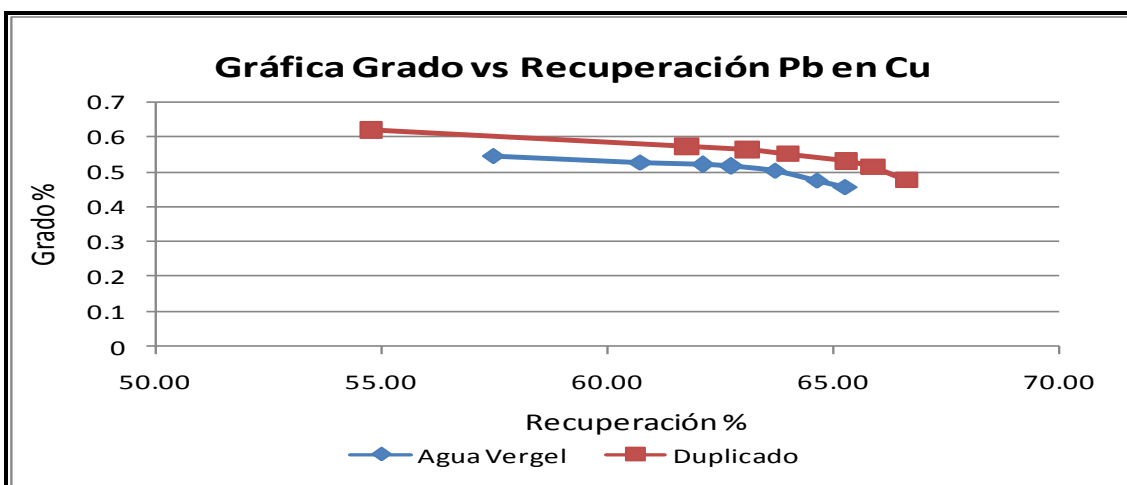


Figura D.62. Gráfica grado-recuperación para el plomo en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua de Vergel.

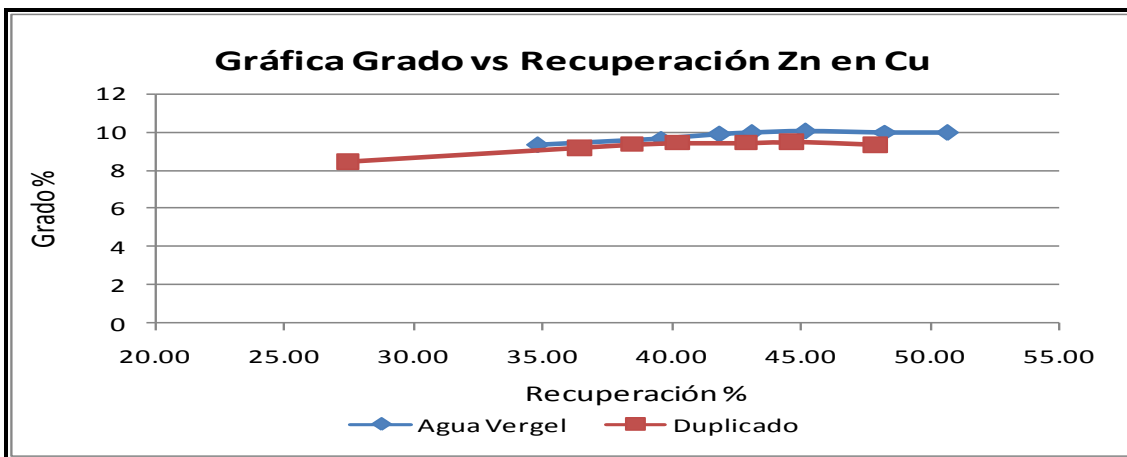


Figura D.63. Gráfica grado-recuperación para el zinc en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua de Vergel.

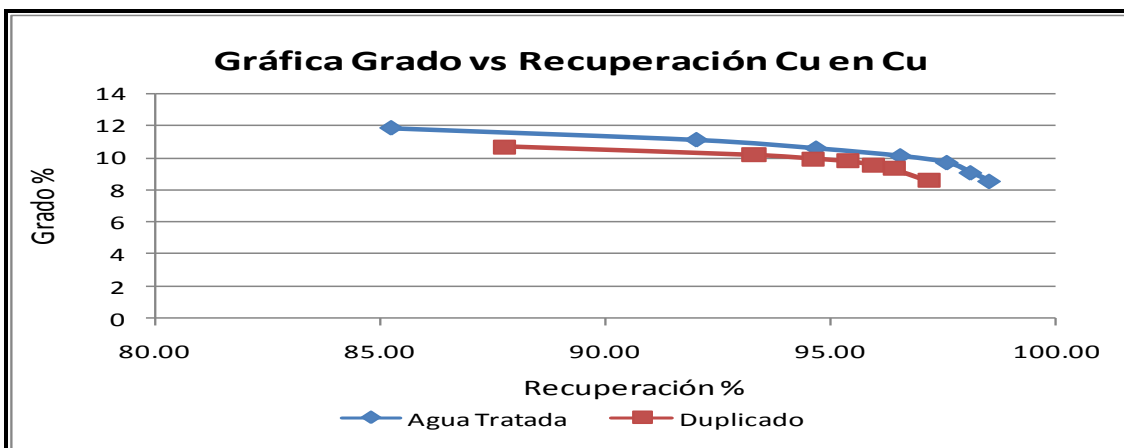


Figura D.64. Gráfica grado-recuperación para el cobre en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua agregada a la alimentación de los molinos; tratada con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

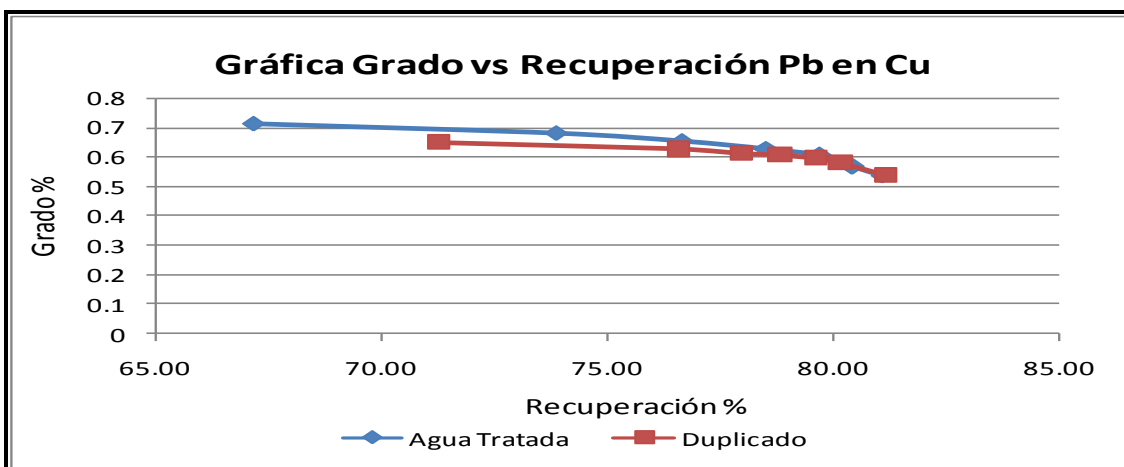


Figura D.65. Gráfica grado-recuperación para el plomo en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua agregada a la alimentación de los molinos; tratada con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

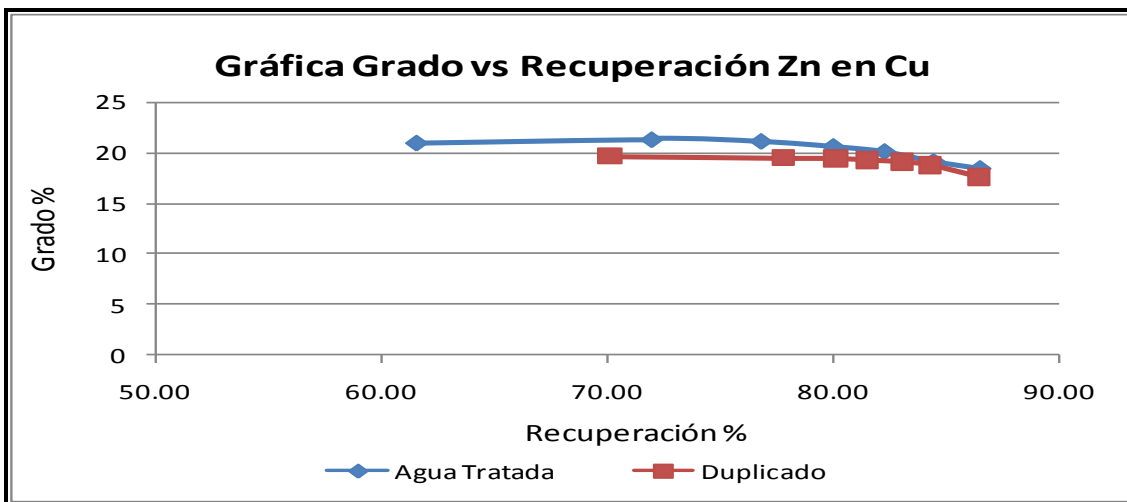


Figura D.66. Gráfica grado-recuperación para el zinc en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua agregada a la alimentación de los molinos; tratada con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

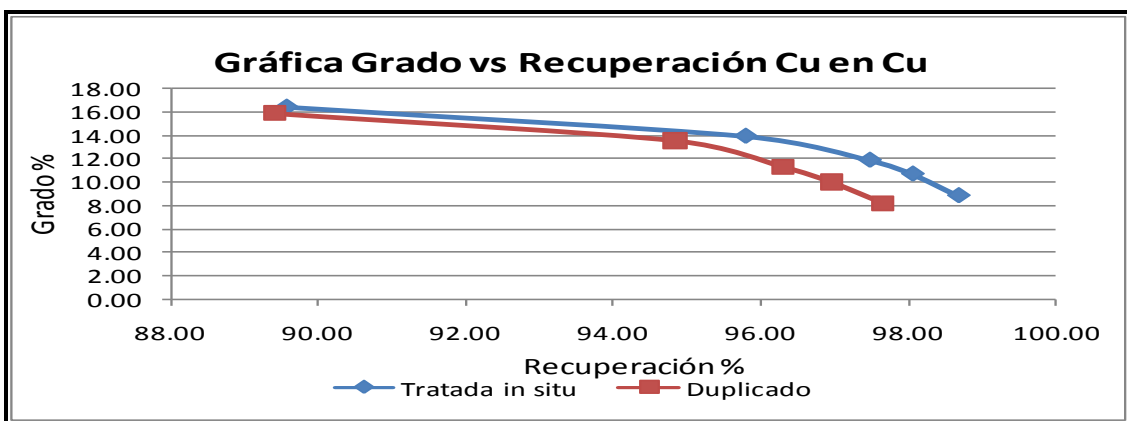


Figura D.67. Gráfica grado-recuperación para el cobre en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua agregada a la alimentación de los molinos; tratada in situ con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

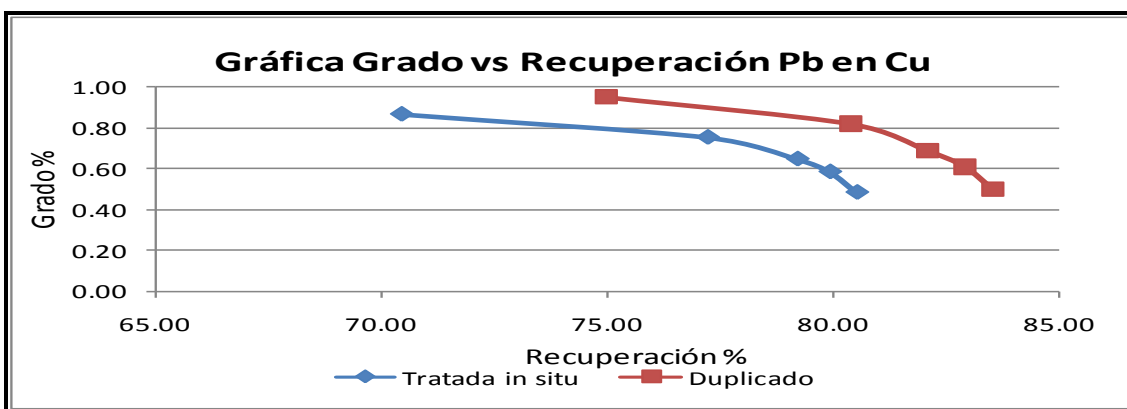


Figura D.68. Gráfica grado-recuperación para el plomo en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua agregada a la alimentación de los molinos; tratada in situ con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

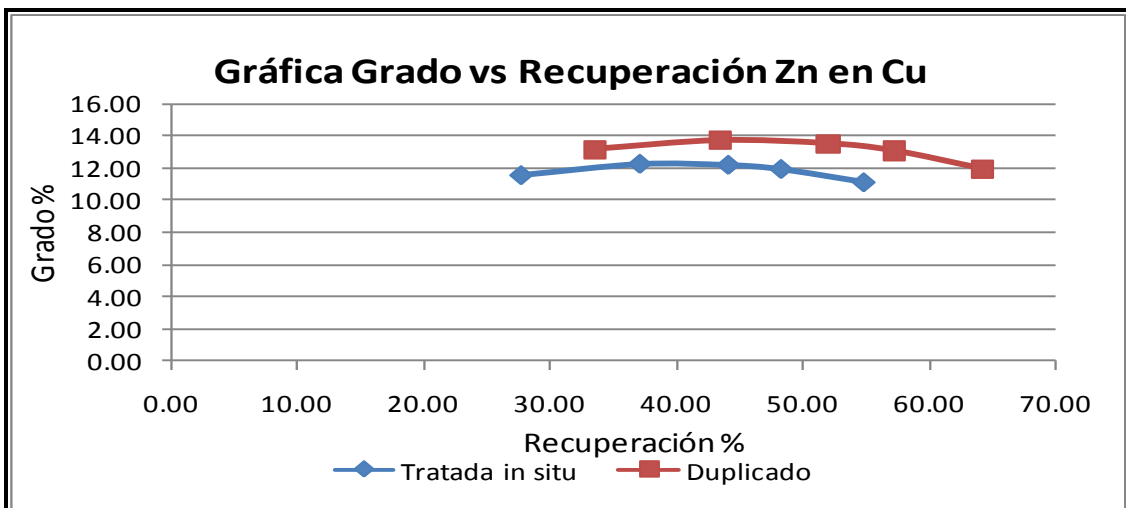


Figura D.69. Gráfica grado-recuperación para el zinc en el concentrado de cobre. Prueba realizada con agua agregada a la alimentación de los molinos; tratada in situ con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$