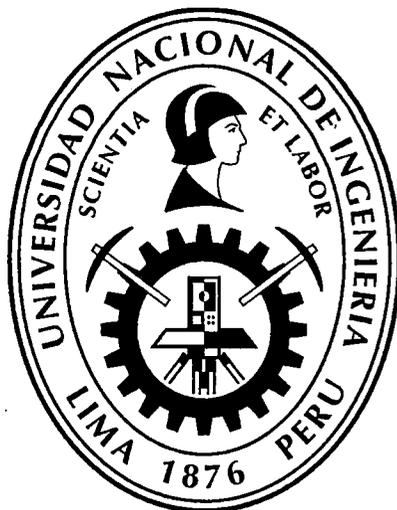


# UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL



**“EFECTOS DEL ÁCIDO SULFURICO EN LA EXTRACCION  
DE COBRE MEDIANTE EL METODO DE LIXIVIACION DE  
MINERALES”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTADO POR:**

**ENCISO SOLANO CARLOS ARTURO**

**LIMA – PERÚ**

**Digitalizado por:**

**2014**

**Consortio Digital del  
Conocimiento MebLatam,  
Hemisferio y Dalse**

**A DIOS:**

**No temas, porque yo estoy contigo; no desmayes, porque yo soy tu Dios que te esfuerzo; siempre te ayudaré, siempre te sustentaré con la diestra de mi justicia**

**Isaías 41: 10**

**A MIS PADRES:**

**CARLOS Y HAYDEE, por el apoyo incondicional que me brindaron en todo momento, por saber guiarme por el buen camino y por todos los consejos que me dieron, ya que fueron importante fuente de motivación en el logro de mis metas.**

A MI HERMANO:

FRANJO, por la motivación que me brindaste en todo momento, ahora tienes una meta más que superar querido hermano.

Yo sé que tú podrás lograrlo.

## AGRADECIMIENTO

INGENIERA HERMINIA VIOLETA CHÁVARRI, quien amablemente con sus conocimientos y experiencias supo brindarme un buen asesoramiento.

INGENIERO JULIAN ROJAS SOLANO, por el gran apoyo incondicional y por la Fé que pusiste en mí durante mi trayecto como estudiante y como Profesional.

A MIS AMIGOS DEL CÓDIGO 2010 -I Y 2009 – I, por los gratos momentos vividos y por el apoyo que recibí de ellos durante mi estancia en la Facultad.

Así mismo a mis maestros y profesores que en todo momento supieron transmitir invalores conocimientos.

Bienaventurado el hombre que halla la sabiduría, y que obtiene la inteligencia; porque su ganancia es mejor que la ganancia de la plata; y sus frutos más que el oro fino.

Más preciosa es que las piedras preciosas; y todo lo que puede desear, no se puede comparar a ella.

Ella es árbol de vida a los que de ella echan mano, y bienaventurado son los que la retienen.

Proverbios 3:13, 14,15 y 18.

## RESUMEN

Hoy en día uno de los procesos más limpios que se puede apreciar en la minería es la Hidrometalurgia, la cual es un proceso mucho más limpio en comparación con la tostación y fundición que generan mucho Dióxido de Azufre ( $\text{SO}_2$ ), estos procesos son también usados para la obtención de cobre.

Entre las actuales etapas que se aplican en la Hidrometalurgia se puede apreciar una que es la clave de todo, me refiero a la Lixiviación que es un proceso mediante el cual se trata de disolver el metal valioso en una solución la cual es llamada solución rica o preñada (PLS) que será tratada mediante otros procesos para obtener el metal casi puro, en esta tesis trataremos el mineral oxidado de cobre, ya que actualmente el cobre es uno de los metales que se explotan en muy grandes cantidades en Perú y el mundo.

En esta tesis también presento también investigaciones para ver la acción de uno de los reactivos que se usa para la recuperación de cobre, me refiero al ácido sulfúrico el cual puede ser obtenido de tiendas proveedoras o mediante el tratamiento del  $\text{SO}_2$  que generan las fundiciones, otro motivo por el cual se usa este reactivo es por el rápido ataque a los óxidos. En esta Tesis se investigo las dosis exactas de ácido para obtener la máxima recuperación en un proyecto minero que se está dando actualmente en el Perú y así poder Optimizar esta etapa del proceso de recuperación de Cobre de las menas Cupríferas.

## **ABSTRACT**

Today one of the cleanest processes can be seen in mining Hydrometallurgy , which is a much cleaner process compared to the roasting and smelting to generate much  $\text{SO}_2$  ( Sulfur Dioxide ) , these processes are also used to obtaining copper .

Among the current steps applied in Hydrometallurgy you can see one that is the key to everything, I mean Leaching is a process by which it is dissolving the precious metal in a solution which is called rich solution or pregnant to be treated by other processes to obtain nearly pure metal , in our case try the Mineral Research copper , as copper is currently one of the metals mined in large quantities in Peru and the world.

Will be research in this thesis to see the action of one of the reagents used for the Recovery of Copper , I mean the sulfuric acid which can be obtained from supply stores or by treatment of  $\text{SO}_2$  generated by foundries, other reason by which this reagent is the fast attack oxides used . In this thesis the exact dose of acid was investigated to obtain maximum recovery in a mining project that is currently taking place in Peru so we can optimize this stage of the recovery process of the copper copper ores.

## **INDICE**

### **CAPITULO I**

Pág.

#### **INTRODUCCIÓN**

### **CAPITULO II**

#### **ASPECTOS FUNDAMENTALES DEL COBRE**

2.1 Cobre en la naturaleza .....	13
2.2 Aplicación .....	15
2.3 Historia .....	15
2.4 Abundancia y obtención .....	21
2.5 Propiedades del Cobre .....	26
2.6 Comportamiento del cobre en el medio ambiente .....	31
2.7 Ocurrencias del cobre en las minas.....	33

### **CAPITULO III**

#### **TOXICIDAD DEL COBRE**

3.1 Exposición del ser humano al Cobre .....	35
3.2 Efectos del Cobre a la salud humana .....	37
3.3 Actividades que generan enfermedades por contaminación con Cu .	37
3.4 Impactos generados por el cobre en la minería .....	38
3.5 Ley general de aguas .....	40
3.6 Límites Máximos Permisibles (LMP) del Cobre en el agua .....	41

	Pág.
<b>CAPITULO IV</b>	
<b>LIXIVIACION</b>	
4.1 Tipos de Lixiviación .....	47
4.1.1 Lixiviación de Óxidos .....	47
4.1.1.1 Química y mecanismos de Lixiviación de los Óxidos ...	48
4.1.2 Lixiviación de Sulfuros .....	50
4.1.2.1 Química y mecanismos de Lixiviación de los Sulfuros..	50

**CAPITULO V**  
**METODOS ALTERNATIVOS DE RECUPERACION PARA EL COBRE**

5.1 Flotación de Cobre .....	68
5.2 Biolixiviación de Cobre .....	78

**CAPITULO VI**

**PRUEBAS EXPERIMENTALES**

6.1 Prueba de nivel banco .....	96
6.2 Prueba de nivel piloto .....	132

**CAPITULO VII**  
**ANALISIS ECONÓMICO**

**CAPITULO VIII**

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	161
<b>ANEXOS</b> .....	162

# **CAPITULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

Hoy en día el Cobre es uno de los metales más importantes usados en la vida del hombre. Su utilidad se debe a la combinación de sus propiedades químicas, físicas y mecánicas, así como a sus propiedades eléctricas y su abundancia. El cobre fue uno de los primeros metales usados por la humanidad, se encuentra en la naturaleza en forma de minerales desde donde es recuperado por diferentes procesos, la presente abarca la recuperación de cobre mediante la lixiviación.

La lixiviación de minerales de cobre es una tecnología que se ha ido incrementando a medida que ha ido haciéndose más eficiente y económica.

En los circuitos de lixiviación industrial las soluciones lixiviantes son recirculadas continuamente entre etapas o ciclos de lixiviación y extracción por solventes. En la extracción por solventes se extrae selectivamente el cobre, mientras los demás iones permanecen en solución acuosa. Como consecuencia los iones metálicos diferentes del cobre y los aniones que los acompañan llegan a un estado estacionario donde su concentración puede ser muy alta. La concentración de los iones acumulados en el proceso de lixiviación (hierro, aluminio, magnesio, manganeso, etc.), proviene de la disolución de las especies que contienen el metal de interés (cobre) y de la ganga, esta disolución depende del consumo de ácido del mineral, tiempo de residencia del mineral en la pila y concentración de ácido en las soluciones lixiviantes.

La información bibliográfica disponible sobre lixiviación de minerales de cobre con soluciones con alta carga iónica es escasa. El proceso de lixiviación de minerales oxidados de cobre es estudiado normalmente de acuerdo a la tasa de irrigación y concentración del agente reactante.

En la presente tesis se estudia el proceso de lixiviación ácida utilizando como agente reactante el ácido sulfúrico, disolviendo el cobre para luego pasar a los demás tratamientos de concentrado del mineral. Los procesos de lixiviación se pueden clasificar: por los solventes usados, por los diferentes procesos aplicados a minerales de alta y baja ley, así como el método de lixiviación "in situ".

Los procesos de recuperación de cobre de la solución rica también varían, se puede hacer cemento de cobre precipitado, este con fierro o puede usarse el proceso de extracción por solventes y precipitación electrolítica, método que ha ido revolucionando la industria del cobre por sus bajos costos para obtener cobre electrolítico de alta calidad. En los procesos de precipitación en pulpa para minerales arcillosos se hace difícil la separación del cobre disuelto de la pulpa estéril.

## CAPITULO II

### ASPECTOS FUNDAMENTALES DEL COBRE

#### 2.1 Cobre en la naturaleza

La mayor parte del cobre en el mundo se obtiene de los sulfuros de minerales como la calcocita, covelita, calcopirita, bornita y enargita. Los minerales oxidados son la cuprita, tenorita, malaquita, azurita, crisocola y brocantita. La ley del mineral empleado en la producción de cobre ha ido disminuyendo regularmente, conforme se han agotado los minerales más ricos y ha crecido la demanda de cobre. Hay grandes cantidades de cobre en la Tierra para uso futuro si se utilizan los minerales de los grados más bajos, y no hay probabilidad de que se agoten durante un largo periodo.

El cobre es el primer elemento del subgrupo I B de la tabla periódica y también incluye los otros metales de acuñación, plata y oro. El átomo de cobre posee la estructura electrónica  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^1$ , el peso atómico del cobre es 63.546. Tiene dos isótopos naturales estables  $^{63}\text{Cu}$  y  $^{65}\text{Cu}$ . También se conocen nueve isótopos inestables (radiactivos). El cobre se caracteriza por su baja actividad química. Se combina químicamente en alguno de sus posibles estados de oxidación. Los estados de oxidación más comunes es la de  $2^+$  (cúprico), pero  $1^+$  (cuproso) es también frecuente; el estado de oxidación  $3^+$  ocurre sólo en unos cuantos compuestos inestables.

El cobre sólido puro es un metal comparativamente pesado, tiene una densidad de  $8.96 \text{ g/cm}^3$  a  $20^\circ\text{C}$ , mientras que el del tipo

comercial varía con el método de manufactura, oscilando entre 8.90 y 8.94 g/cm<sup>3</sup>. El punto de fusión del cobre es de 1083 °C a una presión de 1 atm, su punto de ebullición normal es de 2595°C .

El cobre no es magnético; o más exactamente, es un poco paramagnético. Su conductividad térmica y eléctrica es muy alta. Es uno de los metales que puede tenerse en estado muy puro, es moderadamente duro, tenaz en extremo y resistente al desgaste. La resistencia del cobre está acompañada de una alta ductibilidad. Las propiedades mecánicas y eléctricas de un metal dependen en gran medida de las condiciones físicas, temperatura y tamaño de grano del metal.

De los cientos de compuestos de cobre, sólo unos cuantos son fabricados de manera industrial en gran escala. El más importante es el sulfato de cobre (II) pentahidratado o azul de vitriolo, (CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O). Otros incluyen la mezcla de Burdeos; (3Cu(OH)<sub>2</sub>CuSO<sub>4</sub>); verde de París, un complejo de metaarsenito y acetato de cobre; cianuro cuproso (CuCN); óxido cuproso (Cu<sub>2</sub>O); cloruro cúprico (CuCl<sub>2</sub>); óxido cúprico (CuO); carbonato básico cúprico; naftenato de cobre ( el agente más ampliamente utilizado en la prevención de la putrefacción de la madera, telas, cuerdas y redes de pesca). Las principales aplicaciones de los compuestos de cobre se encuentran en la agricultura, en especial como fungicidas e insecticidas, pigmentos; otras aplicaciones son en soluciones galvanoplásticas, en celdas primarias; como mordentes en teñido, y como catalizadores.

## **2.2Aplicaciones**

Su uso está relacionado principalmente con la electricidad y su manufactura se basa en gran parte a formar aleaciones diversas en la industria del automóvil, municiones, edificios, etc.

Por su volumen ocupa actualmente el tercer lugar en el consumo mundial, después del hierro y del aluminio. Probablemente en los próximos 200 años no habrá problema con el agotamiento del cobre; Especialmente porque la tecnología mecánica (grandes equipos) harán viable los procesos en mina y de los yacimientos que poseen bajas leyes como por ejemplo 0.2 % de cobre en contenido metálico. En 1950 el mundo consumía 2.5 millones de cobre, el Perú proveía el 1%; y hoy en día la demanda se aproxima a 8 millones y el Perú suministra 5.5 %.

### **2.3 Historia**

A continuación se detalla la historia en 4 partes: Antigua, media, moderna y contemporánea

#### **2.3.1 Edad antigua**

Se estima que el descubrimiento del cobre nativo, o como se extrae de la mina fue accidental, en Europa y en Asia en el periodo comprendido entre el 8000 y el 12000 A.C.

Los primeros usos del cobre se atribuyen a los sumerios, de quienes se conservan objetos ornamentales de más de 6500 años de antigüedad elaborados a partir de cobre nativo.

El cobre fue utilizado en estado puro o fundido inicialmente con plomo y después con estaño en una aleación conocida como bronce, en la fabricación de armas, monedas y utensilios domésticos.

Se han encontrado utensilios de cobre nativo en torno al año 7000 A. C. en Tepesí (en la actual Turquía) y en Irak. El cobre de Tepesí fue recocido pero el proceso aún no estaba perfeccionado. En esta época, pero en otra parte del mundo, en oriente Próximo también se utilizaban carbonatos de cobre (malaquita y azurita) con motivos ornamentales.

En la región de los Grandes Lagos de América del Norte, donde abundaban los yacimientos de cobre nativo, desde el año 4000 A. C. los indígenas acostumbraban a moldear el cobre golpeándolos hasta darles forma de punta de flecha, aunque nunca llegaron a descubrir la fusión.

Los primeros crisoles para producir cobre metálico a partir de carbonatos mediante reducciones con carbón datan del V milenio A.C. Es el inicio de la llamada Edad del Cobre, apareciendo crisoles en toda la zona entre los Balcanes e Irán, Incluyendo Egipto se han encontrado pruebas de exploración de minas de carbonatos de cobre desde épocas muy antiguas tanto en Tracia (Ai Bunar) como en la península del Sinaí. De un modo endógeno, no conectado con las civilizaciones del Viejo Mundo, en la América pre colombiana, en torno al siglo IV A.C. la cultura Moche desarrollo la metalurgia del cobre ya refinado a partir de la malaquita y otros carbonatos cupríferos.

Hacia el 3500 A. C. la producción de cobre en Europa entró en declive a causa del agotamiento de los yacimientos de carbonatos. Por esta época se produjo la irrupción desde el este de unos pueblos que genéricamente denominados en ese entonces kurganes, que poseían una nueva tecnología: el uso del cobre arsenical. Esta tecnología, quizás desarrollada en Oriente Próximo o en el Cáucaso, permitía obtener cobre mediante la oxidación de sulfuro de cobre. Para evitar que el cobre se oxide se añadía arsénico al mineral. El cobre arsenical (a veces llamado también "bronce arsenical") era más cortante que el cobre nativo y además podía obtenerse de los muy abundantes yacimientos de sulfuros, uniéndolo a la nueva tecnología del molde de dos

piezas, que permitía la producción en masa de objetos, los kurganes se equiparon de hachas de guerra y se fueron extendiendo rápidamente.

### **2.3.2 Edad media**

Según la historia avanza, el hombre domina cada vez más el mundo que lo rodea. En cuanto al cobre, característica de nuestra época (después de Cristo) es el pleno desarrollo de la técnica para extracción de metales a partir del elemento en estado natural.

Los investigadores consideran que el uso del cobre en un principio de acuerdo a las necesidades que tenía en la Edad Media era bélico, para la fabricación de hachas, espadas, cascos, armaduras, etc. herramientas para la guerra. Por otro lado también fue evidente la presencia del cobre y aleaciones en utensilios portadores de luz (candelabros, antorchas, blandones, candiles, etc.)

La resistencia a la corrosión del cobre, el bronce y el latón permitió que estos metales hayan sido utilizados no sólo como decorativos sino también como funcionales desde la edad media hasta nuestros días.

Entre los siglos X y XII se hallaron en Europa Central grandes yacimientos de plata y cobre, principalmente en Rammelsberg y Joachimsthal. De ellos surgió una gran parte de la materia prima para realizar las grandes campanas, puertas y estatuas de aquellas grandes catedrales góticas europeas que pudieron además aplicarse en el uso bélico del cobre para la fabricación de objetos, como hachas, espadas, cascos o corazas.

### **2.3.3 Edad moderna**

Durante el renacimiento, se utilizaron con mayor frecuencia materiales, como la plata, el oro, los esmaltes y las incrustaciones de piedras preciosas. Pero en los siglos XVII y XVIII, con el desarrollo y esplendor del barroco, el cobre asume la función de soporte en las obras monumentales que embellecen el interior de monumentos, sobre todo las grandes catedrales. La nobleza europea impulsa en este periodo la fabricación de relojes, se incorpora a la máquina del reloj el péndulo y la aleación de bronce como material utilizado.

Así el cobre en plena revolución industrial es usado para hacer las piezas de las nuevas maquinarias y pasa a usarse en labores cotidianas.

Los primeros cañones europeos de hierro forjado datan del siglo XIV, pero hacia el siglo XVI el bronce se impuso como el material casi único para toda la artillería y mantuvo ese dominio hasta bien entrado el siglo XIX. En el Barroco, durante los siglos XVII y XVIII, el cobre y sus aleaciones adquirieron gran importancia en la construcción de obras monumentales, la producción de maquinaria de relojería y una amplia variedad de objetos decorativos y funcionales. Las monarquías autoritarias del antiguo régimen utilizaron el cobre en aleación con la plata (denominada vellón), para realizar repetidas devaluaciones monetarias, llegando a la emisión de monedas puramente de cobre, características de la Monarquía Hispánica del siglo XVII (que lo utilizó en tanta cantidad que tuvo que recurrir a importarlo de Suecia).

### **2.3.4 Edad contemporánea**

En la actualidad el cobre es usado en fontanería o instalaciones de gas, todo en forma de tubería, instalaciones eléctricas en forma de hilo conductor, también se gasta en tecnología aeroespacial, por ejemplo: el revestimiento interior de la cámara de combustión de los grupos de propulsión de Ariane 5 ( un cohete de un solo uso diseñado para colocar satélites en órbita geoestacionaria) que son de una aleación de cobre, plata y circonio, también la estructura de un transbordador espacial es de una aleación de aluminio que contiene cobre. Las células solares de los paneles fotovoltaicos también contienen cobre.

En las nuevas tecnologías también se utiliza el cobre en fabricación de chips y por último en la industria química, porque han apreciado en él la resistencia y la conductividad térmica (por ejemplo en hornos de fermentación).

Durante 1831 y 1832, Michael Faraday descubrió que un conductor eléctrico moviéndose perpendicularmente a un campo magnético generaba una diferencia de potencial, Aprovechando esto construyó el primer generador eléctrico (el disco de Faraday), empleando un disco de cobre que giraba entre los extremos de un imán con forma de herradura, induciendo una corriente eléctrica. El posterior desarrollo de generadores eléctricos y su empleo en la historia de la electricidad ha dado lugar a que el cobre haya obtenido una importancia destacada en la humanidad, que ha aumentado su demanda notablemente.

Durante gran parte del siglo XIX, Gran Bretaña fue el mayor productor mundial de cobre, pero la importancia que fue

adquiriendo el cobre motivó la explotación minera en otros países, llegando a destacarse la producción en Estados Unidos y Chile, además de la apertura de minas en África. De esta forma, en 1911 la producción mundial de cobre superó el millón de toneladas de cobre fino.

La aparición de los procesos que permitían la producción masiva de acero a mediados del siglo XIX, como el convertidor Thomas-Bessemer o el horno Martin-Siemens dio lugar a que se sustituyera el uso del cobre y de sus aleaciones en algunas aplicaciones determinadas donde se requería un material más tenaz y resistente. Sin embargo, el desarrollo tecnológico que siguió a la revolución industrial en todas las ramas de la actividad humana y los adelantos logrados en la metalurgia del cobre ha permitido producir una amplia variedad de aleaciones. Esto ha dado lugar a que se incrementen los campos de aplicación del cobre, lo cual añadido al desarrollo económico de varios países, ha conllevado un notable aumento de la demanda mundial.

## **2.4 Abundancia y obtención**

A continuación se detalla la abundancia y las principales formas de obtención del cobre:

### **2.4.1 Abundancia**

La producción mundial de cobre durante el 2011 alcanzó un total de 16,10 millones de toneladas métricas de cobre fino. El principal país productor es Chile, con más de un tercio del total, seguido por Perú y China, esto se puede apreciar de mejor manera en la Tabla № 1.

De entre las diez mayores minas de cobre del mundo, cinco se encuentran en el país de Chile (Escondida, Codelco Norte, Collahuasi, El Teniente y Los Pelambres), dos en Indonesia, una en Estados Unidos, una en Rusia y otra en Perú (Antamina).

### **Reservas**

De acuerdo a información entregada en el informe anual del United States Geological Survey (USGS), las estimaciones señalan que las reservas conocidas de cobre en el 2011 a nivel mundial alcanzarían 690 millones de toneladas métricas de cobre fino. Y según las estimaciones de USGS, en Chile existirían del orden de 190 millones de toneladas económicamente explotables, equivalentes al 28% del total de reservas mundiales del mineral; seguido de Perú con 90 millones de toneladas económicamente explotables, equivalentes al 13% del total de reservas mundiales del mineral, esto se puede apreciar de mejor manera en la Tabla N° 2.

## **2.4.2 Obtención**

### **Metalurgia de transformación**

La mayoría del cobre que se produce a nivel mundial proviene de la piro metalurgia (90 % aproximadamente), los estudios para extraer cobre mediante la hidrometalurgia es una ciencia que cada vez crece más, a continuación se detalla la diferencia entre estos 2 métodos:

### **Procesos Pirometalúrgicos**

Los procesos Pirometalúrgicos implican el uso de elevadas temperaturas para poder fundir el metal y así poder separar lo

valioso(metal de interés, en este caso cobre) de la ganga (escorias), entre los procesos Pirometalúrgicos que se aplican al cobre luego de ser concentrado mediante Flotación se tiene los siguientes Procesos:

- El convencional o general (tostación – fundición – conversión – electro refinación)
- Fundición instantánea (relámpago o flash )
- Segregación.
- Obtención de mata en Horno de Cuba.
- Obtención de mata en Horno Eléctrico.
- Por reacción ciclónica (en fase experimental).

### **Procesos Hidrometalúrgicos**

Los procesos Hidrometalúrgicos a diferencia de los Pirometalúrgicos son procesos más limpios e implican el uso del agua como principal materia para la obtención de concentrados del metal de interés (cobre), entre los principales procesos Hidrometalúrgicos que existen para recuperar el Cobre se tienen los Siguietes:

- Lixiviación con ácido sulfúrico variante: Natural, in situ, en montones y pilas (heap leaching), en percoladores, en agitadores mecánicos, lixiviación con soluciones de ácido sulfúrico más sulfato ferrico.
- Extracción por solventes.
- Bio-lixiviación.
- Lixiviación con soluciones. amoniacaes.
- A temperaturas moderadas y a presión (en investigación par a minerales específicos)
- Con ácido clorhídrico (en investigación).
- Con cianuro (en investigación).

**Tabla Nº 1 Principales Productores Mundiales de Cobre durante el 2011**

<b>Posición Mundial en Producción de Cobre</b>	<b>País</b>	<b>Producción (Millones de Toneladas / Año)</b>
1	Chile	5,420
2	Perú	1,220
3	China	1,190
4	Estados Unidos	1,120
5	Australia	0,940
6	Zambia	0,715
7	Rusia	0,710
8	Indonesia	0,625
9	Canadá	0,550
10	República Democrática del Congo	0,440
11	Polonia	0,425
12	México	0,365
13	Kazajistán	0,360

Fuente: Esteban Domic

**Tabla Nº 2. Principales Reservas de Cobre durante el 2011**

<b>Rango</b>	<b>País</b>	<b>Reservas Mundiales de Cobre ( Millones toneladas)</b>	<b>Porcentaje total</b>
1	Chile	190	28 %
2	Perú	90	13 %
3	Australia	86	12 %
4	México	38	6 %
5	Estados Unidos	35	5 %
6	China	30	4 %
7	Rusia	30	4 %
8	Indonesia	28	4 %
9	Polonia	26	4 %
10	República Democrática del Congo	20	3 %

Fuente: Esteban Domic

## 2.4 Propiedades del cobre

Las principales propiedades químicas y mecánicas se detallan en la Tabla Nº 3 y Tabla Nº 4 respectivamente.

**Tabla Nº 3. Principales propiedades químicas del cobre**

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Nombre	Cobre
Símbolo	Cu
Número atómico	29
Grupo del sistema periódico	grupo 11
Valencias	1 y 2
Estados de oxidación	+1, +2
Electronegatividad	1,9
Radio atómico	1,28 Å
Radio covalente	1,38 Å
Radio iónico	0,69 Å
Estructura cristalina	Cubica centrada en las caras (CCC)
Masa atómica	63,54 g/mol
Densidad a 20 °C	8,96 g/cm <sup>3</sup>
Punto de fusión (1 atm)	1083 °C
Punto de ebullición (1 atm)	2595 °C
Calor específico	0,385 J/g·K
Calor latente de fusión	214·10 <sup>3</sup> J/kg
Calor latente de ebullición	5410·10 <sup>3</sup> J/kg
Conductividad eléctrica a 20 °C	58,108·10 <sup>6</sup> S/m (siemens por metro)
Resistencia eléctrica	0,017 Ohmio/mm <sup>2</sup>
Conductividad térmica	400 W/m

**Tabla Nº 4. Características Mecánicas del Cobre**

<b>Estado</b>	<b>Resistencia a la tracción, kg/mm<sup>2</sup></b>	<b>Límite elástico, kg/mm<sup>2</sup></b>	<b>Alargamiento en la rotura, %</b>
Fundido	15 - 22	-	25 - 15
Recocido	21 - 24	9	46 - 47
Templado	37 - 41	36	5 - 6

El límite elástico, también denominado límite de elasticidad o límite de fluencia, es la tensión máxima a la que puede ser sometida un material sin sufrir deformaciones permanentes, es decir, que al cesar la carga la pieza recupera su dimensión inicial.

Pero si a la pieza se le aplican unos niveles de cargas superiores que superan el límite elástico, entonces el material sufre deformaciones permanentes y ya no recupera su forma original cuando cesan estas cargas. Es entonces cuando el material entra en el régimen plástico hasta alcanzar el punto de rotura o resistencia a la tracción.

#### **Módulo de elasticidad longitudinal**

El módulo de elasticidad longitudinal o módulo de Young (E) relaciona la tensión aplicada a una pieza según una dirección con la deformación originada en esa misma dirección, y siempre considerando un comportamiento elástico en la pieza.

Para el material de cobre, el módulo de elasticidad longitudinal, E, tiene el siguiente valor:

$$E = 110.000 \text{ MPa} (110.000 \text{ N/mm}^2) (1.100.000 \text{ kg/cm}^2)$$

### **Módulo de elasticidad transversal**

El módulo de elasticidad transversal, módulo de cortante o también llamado módulo de cizalla ( G ), para la mayoría de los materiales, y en concreto para los materiales isótropos, guarda una relación fija con el módulo de elasticidad longitudinal ( E ) y el coeficiente de poisson (  $\nu$  ), según la siguiente expresión:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.1)$$

En la Tabla Nº 5 se detallan los valores para el Módulo de elasticidad transversal, G, para el cobre y otros elementos químicos.

### **Coefficiente de Poisson**

El coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) corresponde a la razón entre la elongación longitudinal y la deformación transversal en el ensayo de tracción. Alternativamente el coeficiente de Poisson puede calcularse a partir de los módulos de elasticidad longitudinal y transversal, según la expresión siguiente:

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (2.2)$$

Para el cobre, el coeficiente de poisson es:  $\nu = 0,34$

**Tabla № 5. Módulos de elasticidad transversal, G**

<b>Material</b>	<b>Módulos de elasticidad transversal</b>
Acero	81.000
Aluminio	26.300
Bronce	41.000
Cobre	42.500
Fundición Gris (4.5 %C)	41.000
Hierro Colado	< 65.000
Hierro Forjado	73.000
Latón	39.200

Como en el caso anterior, las expresiones arriba indicadas del coeficiente de Poisson,  $\nu$ , son valores constantes siempre dentro del rango de comportamiento elástico del material.

## **2.5 Comportamiento del cobre en el medio ambiente**

La producción mundial de Cobre está todavía creciendo, esto básicamente significa que más y más cobre termina en el medioambiente. Los ríos están depositando barro en sus orillas que están contaminados con Cobre, debido al vertido de aguas residuales contaminadas con Cobre. El Cobre entra en el aire mayoritariamente a través de la liberación durante la combustión de fuel. El cobre en el aire permanecerá por un periodo de tiempo eminente, antes de depositarse, cuando empieza a llover este terminará mayormente en los suelos,

como resultado los suelos pueden también contener grandes cantidades de Cobre después de que este sea depositado desde el aire.

El cobre puede ser liberado en el medioambiente tanto por actividades humanas como por procesos naturales, Ejemplo de fuentes naturales son las tormentas de polvo, descomposición de la vegetación, incendios forestales y aerosoles marinos; unos pocos ejemplos de actividades humanas que contribuyen a la liberación del Cobre han sido ya nombrados. Otros ejemplos son la minería, la producción de metal, la producción de madera y la producción de fertilizantes fosfatados.

El cobre es a menudo encontrado cerca de minas, asentamientos industriales, vertederos y lugares de residuos. Cuando el Cobre termina en el suelo este es fuertemente atado a la materia orgánica y minerales, como resultado este no viaja muy lejos antes de ser liberado y es difícil que entre en el agua subterránea. En el agua superficial el cobre puede viajar largas distancias, tanto suspendido sobre las partículas de lodos como iones libres.

El cobre no se rompe en el ambiente y por eso se puede acumular en plantas y animales cuando éste es encontrado en suelos. En suelos ricos en cobre sólo un número pequeño de plantas pueden vivir, por esta razón no hay diversidad de plantas cerca de las fábricas de Cobres, debido al efecto del cobre sobre las plantas; es una seria amenaza para la producción en las granjas. El Cobre puede seriamente influir en el proceso de ciertas tierras agrícolas, dependiendo de la acidez del suelo y la presencia de materia orgánica, a pesar de esto el estiércol que contiene cobre es todavía usado.

El cobre puede interrumpir la actividad en el suelo, porque tiene influencia negativa en la actividad de microorganismos y lombrices de tierra y de esta manera la descomposición de la materia orgánica puede disminuir.

Cuando los suelos de las granjas están contaminados con Cobre, los animales pueden absorber concentraciones de cobre que dañan su salud, principalmente las ovejas sufren un gran efecto por envenenamiento con Cobre, debido a que los efectos del Cobre se manifiestan a bajas concentraciones.

## **2.6 Ocurrencias de cobre en las mineras**

El cobre se puede encontrar, ya sea como cobre nativo o como parte de los minerales. El cobre nativo es un poli cristalino, y los cristales más grandes encontrados hasta la fecha miden alrededor de 4.4 x 3.2 x 3.2 cm. El cobre está presente en la corteza terrestre principalmente en forma de minerales sulfurados como calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), Bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) y Calcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ). La ley o concentración de estos minerales es baja, las menas más comunes contienen de 0,5 % (Minas a tajo abierto) hasta 1-2% de cobre (en minas subterráneas).

El cobre también se presenta en forma de minerales con oxígeno (carbonatos, Óxidos, Silicatos y Sulfatos) pero en menor concentración. A continuación se aprecia una relación de ocurrencias de cobre con sus respectivos porcentajes de Cobre, en la Tabla Nº 6.

**Tabla Nº 6. Principales Sulfuros y Óxidos de Cobre**

<b>Tipo de mineral</b>	<b>Composición teórica</b>	<b>Porcentaje teórico de cobre</b>
<b>Sulfuros</b>		
Calcopirita	$\text{CuFeS}_2$	34.60%
Calcocita	$\text{Cu}_2\text{S}$	79.90%
Bornita	$\text{Cu}_5\text{FeS}_4$	63.30%
Covelita	$\text{CuS}$	66.40%
<b>Óxidos</b>		
Malaquita	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$	57.50%
Azurita	$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$	55.30%
Cuprita	$\text{Cu}_2\text{O}$	88.80%
Crisocola	$\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	36.20%
Antlerita	$\text{Cu}_3\text{SO}_4(\text{OH})_4$	537%

Fuente: Metalurgia del cobre - Biswas

## **CAPITULO III**

### **TOXICIDAD DEL COBRE**

En este capítulo se presenta las principales formas de contaminación que existen para el cobre.

#### **3.1 Exposición del ser humano al cobre**

El cobre es muy común en el medio ambiente, el hombre puede estar expuesto al cobre al respirar aire, tomar agua, comer alimentos o cuando su piel entra en contacto con tierra, agua u otras sustancias que contienen cobre. La mayoría de los compuestos de cobre que se encuentran en el aire, el agua, el sedimento, el suelo y las rocas están fuertemente adheridos al polvo u otras partículas o están incrustados en minerales; cierta cantidad de cobre en el ambiente está unido con menos fuerza al suelo o a partículas en el agua y puede ser suficientemente soluble en el agua como para ser incorporada por plantas y animales. Para la población general, los compuestos de cobre soluble en agua usado principalmente en la agricultura representan un riesgo mayor para la salud. Cuando se liberan compuestos de cobre solubles a lagos y ríos, generalmente pueden adherirse a partículas en el agua en aproximadamente 1 día, esto puede reducir la exposición del cobre en el agua, dependiendo de la fuerza de la unión del cobre con las partículas y de la cantidad de partículas que se depositan en el sedimento de lagos y ríos, sin embargo, las partículas pequeñas tienen una superficie enorme y pueden permanecer suspendidas durante mucho tiempo; por lo tanto, cuando la concentración de las partículas pequeñas es alta, tanto la exposición como la absorción pueden ser considerables aun cuando el cobre esté fuertemente adherido a las partículas en suspensión.

La concentración de cobre en el aire es aproximadamente en promedio de 1 nano gramo de este metal (1 nano gramo equivale a  $10^{-9}$  gramos) por cada metro cúbico ( $m^3$ ) de aire, el metro cubico es un volumen aproximadamente 25% más grande que 1 yarda cúbica. Cerca de fundiciones que procesan mineral de cobre para producir cobre metálico, las concentraciones de cobre en el aire pueden alcanzar 5,000 ng/ $m^3$ . El hombre puede respirar niveles altos de polvos que contienen cobre si vive o trabaja cerca de minas de cobre o plantas que procesan cobre.

Se puede estar expuesto a niveles de cobre soluble en el agua potable más altos que la norma de 1,300 partes de cobre por billón de partes de agua (ppb); especialmente si el agua es corrosiva y se tiene cañerías de cobre y grifos de bronce. La concentración promedio de cobre en el agua de grifo varía entre 20 y 75 ppb, sin embargo, muchos hogares tienen concentraciones de cobre de más de 1,000 ppb, esto es más de 1 miligramo por litro de agua.

La concentración de cobre en lagos y ríos varía entre 0.5 y 1,000 ppb con una concentración promedio de 10 ppb. La concentración promedio de cobre en el agua subterránea (5 ppb) es similar a la que se encuentra en lagos y ríos; sin embargo, las mediciones ambientales indican el agua subterránea contiene niveles de cobre (hasta de 2,783 ppb) que están muy por encima de la norma de 1,300 ppb para el agua potable, este cobre generalmente está unido a partículas en el agua. Los lagos y embalses que han sido tratados recientemente con compuestos de cobre para controlar algas o que reciben agua de refrigeración desde plantas de energía pueden tener concentraciones altas de cobre disuelto en el agua. Una vez en el agua, la mayor parte de este cobre rápidamente se adhiere a partículas o se convierte a otras formas que pueden depositarse en sedimentos, esto puede limitar la exposición al cobre a menos que los sedimentos se agiten, como por ejemplo, cuando personas que nadan en aguas de recreación vuelven a suspender los sedimentos y luego los tragan.

El suelo generalmente contiene entre 2 y 250 ppm de cobre, aunque se han encontrado concentraciones de aproximadamente 17,000 ppm cerca de plantas que producen cobre y latón, se pueden encontrar concentraciones altas de cobre en el suelo porque el polvo proveniente de estas industrias se deposita en el suelo, o porque residuos de minas u otras industrias de cobre se desechan en el suelo. Otra fuente común de cobre en el suelo es la dispersión de lodo proveniente del tratamiento de aguas residuales. Este cobre generalmente permanece adherido fuertemente a la capa de tierra superficial.

Los alimentos contienen cobre natural. Usted come y toma aproximadamente entre  $10^{-3}$  gramos de cobre al día.

### **3.2 Efectos del cobre a la salud humana**

Los efectos del cobre varían según su especie y la química del agua, la toxicidad esta atribuida a las especies que son principalmente el  $\text{Cu}^{2+}$ , pero también  $\text{Cu}(\text{OH})^+$ ,  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  y  $\text{Cu}_2(\text{OH})_2^{2+}$ . El método para identificar las distintas especies de cobre es complejo y normalmente la interpretación de su toxicidad se basa en concentraciones totales. Todo el mundo debe absorber pequeñas cantidades de cobre diariamente debido a que el cobre es esencial para la salud, los niveles altos de cobre pueden ser dañinos. La inhalación de niveles altos de cobre puede producir irritación de la nariz y la garganta. La ingestión de niveles altos de cobre puede producir náuseas, vómitos y diarrea, envenenamiento crónico de cobre, enfermedad de Wilson-Bendlington; y cantidades muy altas de cobre pueden dañar el hígado y los riñones causando la muerte.

### **3.3 Actividades que generan enfermedades por contaminación con cobre**

Una de las actuales actividades que generan enfermedades por contaminación con cobre, son las ejercidas por las empresas minero - metalúrgicas que trabajan con los óxidos y sulfuros derivados del cobre, en las áreas de trituración, molienda, lixiviación, fundición;

liberándose partículas y vapores conteniendo niveles no aceptables de cobre.

### **3.4 Impactos generados por el cobre en la minería**

Los impactos de la minería de cobre en el medio natural son: en la atmósfera, los suelos, aguas subterráneas y superficiales.

#### **3.4.1 Atmosfera**

##### **Emisiones solidas**

El polvo emitido tiene su origen en las propias actividades extractivas, durante la voladura y arranque del material, o durante los procesos de carga y transporte, o en relación a procesos metalúrgicos. Además puede haber una importante remoción eólica de material fino en escombreras y balsas abandonadas.

##### **Gases:**

Los gases emitidos tienen su origen en las maquinarias y equipos durante la extracción del mineral ( $\text{CO}_2$ , CO, grisú – mezcla explosiva de metano y aire), la emisión en voladuras, y la emisión en procesos directamente relacionados con la actividad minera: combustión de carbón ( $\text{CO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ), pirometalurgia ( $\text{SO}_2$ ).

##### **Aerosoles:**

La formación de aerosoles tóxicos se produce durante la explotación, y sobre, todo, durante las diversas actividades que se dan en los procesos de hidrometalurgia, que implican el riego por aspersion de pilas de mineral con compuestos a menudo de alta toxicidad (ácido sulfúrico para la extracción de algunos elementos, como el cobre).

##### **Ruido:**

Se genera por voladuras, maquinaria pesada de arranque y transporte, maquinaria de molienda, etc.

##### **Onda aérea:**

Se produce por las explosiones de las voladuras, y es una onda de presión, que se propaga por el aire atenuándose con la distancia, generando vibraciones.

### **3.4.2 Impactos en los suelos y terreno**

Entre los principales se tienen a continuación: desertización, deforestación, erosión, pérdida de suelo fértil. Modificación del relieve, impacto visual, alteración de la dinámica de los procesos de ladera.

### **3.4.3 Aguas superficiales y subterráneas**

Entre las principales, se distinguen las siguientes:

#### **Alteraciones en la dinámica fluvial:**

Variación del perfil y trazado de la corriente fluvial, variaciones en el nivel de base local, alteración en la dinámica (variaciones en las tasas de erosión/sedimentación) en el perfil (aguas abajo y aguas arriba) por excavaciones, diques y represas, aumento de la peligrosidad de inundación.

#### **Pérdida de masas de agua:**

Ocupación de lagos, embalses, bahías.

#### **Contaminación por metales pesado (cobre)**

Como por ejemplo en coloides en suspensión, en especies en disolución, además de los procesos de metalurgia por lixiviación.

#### **Variaciones del pH por el drenaje ácido de mina**

Se produce por la hidrólisis y oxidación de sulfuros, como resultado se obtienen aguas de pH muy baja (2-3), cargadas en aniones (sobre todo sulfatos), en las que generalmente son más solubles los metales pesados como Pb, Zn, Cu, As, Cd, etc.

## **3.5 Ley general de aguas**

Los estándares de calidad ambiental para aguas están definidos por el Reglamento de la ley general de Aguas (D.S. 261 – 69 – AP, modificado por D.S. N° 007-83 y D.S. N° 003-2003-SA). Los estándares de calidad están definidos en función al uso actual o potencial del cuerpo de agua, y esto se puede apreciar en la Tabla N°7.

**Tabla N°7. Categorías del uso del agua**

<b>Categoría</b>	<b>Uso</b>
Uso I	Abastecimiento doméstico con simple desinfección
Uso II	Abastecimiento doméstico con tratamiento convencional
Uso III	Riego de vegetales de consumo crudo y bebida de animales
Uso IV	Zonas recreativas de contacto primario (baños y similares)
Uso V	Zonas de pesca de mariscos bivalvos
Uso VI	Zonas de preservación(flora y fauna acuática)

Los estándares de calidad ambiental (ECA) del agua se presentan en la Tabla N°8.

Si bien la norma no lo indica de manera explícita la autoridad de salud (DIGESA) ha manifestado en sucesivas oportunidades que los límites para metales establecidos en los ECA de aguas deben aplicarse al metal total y no a la fracción disuelta y la fracción sólida o concentración total del metal, incluyendo la fracción disuelta (concentración total del metal, y la fracción sólida o adsorbida en las partículas sólidas en suspensión, tal como se obtiene al analizar una muestra sin filtrar); se reconoce también que ciertos valores no son apropiados y requieren una revisión, tal es el caso de los límites para nitratos y níquel, donde los ECA son excesivamente

rigurosos en comparación con los de otras jurisdicciones y organismos internacionales. Por ejemplo, el ECA peruano para níquel en aguas de uso I (uso doméstico) es 0.002 mg/, asimismo, el ECA peruano para nitrato en aguas de Uso I es de 0.01 mg/L (como nitrógeno), mientras que el valor gua de la OMS para agua potable es superior en tres órdenes de magnitud (11.3 mg/L).

En ciertos casos, la norma peruana de ECA establece que los valores límites deben ser obtenidos mediante pruebas de toxicidad (zinc, níquel y cobre en uso VI). No obstante, los criterios para el desarrollo de estas pruebas aún no han sido desarrollados en el Perú.

### **3.6 Límites Máximos Permisibles (LMP) del cobre en el agua**

Aun cuando las minas formales han mejorado muchísimo en sus operaciones con respecto al tratamiento de sus efluentes, actualmente existe una normativa (Decreto legislativo 1099 y 1103) que sanciona drásticamente cuando los LMP establecidos en la norma son superados lo que ocurre generalmente en la minería informal. La tabla N°10 detalla los niveles permisibles de cobre establecidos en el decreto supremo DS 010-2010 MINAN.

**Tabla No 8. Estándares de Calidad Ambiental del agua**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>	<b>VI</b>
Coliformes Totales	NMP/ 100 mL(1)	8.8	20 000	5 000	5 000	1 000	20 000
Coliformes Fecales	NMP/100 mL(1)	0	4 000	1 000	1 000	200	4 000
DBO5(2)	mg/L	5	5	15	10	10	20
Oxígenos disueltos (3)	mg/L	3	3	3	3	5	4
Nitratos (4)	mg/L de N	0.01	0.01	0.1			
Sulfuros	mg/L	0.001	0.002	-5		0.002	0.002
Selenio (6)	mg/L	0.01	0.01	0.05		0.005	0.01
Mercurio (6)	mg/L	0.002	0.002	0.01		0.0001	0.0002
Arsénico (6)	mg/L	0.1	0.1	0.2		0.01	0.05
Cadmio (6)	mg/L	0.01	0.01	0.05		0.0002	0.004
Cobre (6)	mg/L	1	1	0.5		0.01	-7
Cromo (6)	mg/L	0.05	0.05	1		0.05	0.05
Níquel (6)	mg/L	0.002	0.002	-5		0.002	-8
Plomo (6)	mg/L	0.05	0.05	0.1		0.01	0.03
Zinc (6)	mg/L	5	5	25		0.02	-8
Cianuro WAD	mg/L	0.08	0.08	0.1			
Cianuro libre	mg/L					0.022	0.022
Esteres Ftalatos	mg/L	0.0003	0.0003	0.0003		0.0003	0.0003
Fenoles	mg/L	0.0005	0.001	-5		0.001	0.1
PCB (10)	mg/L	0.001	0.001	-5		0.002	0.002

**Tabla No 9.** Límites de descarga para la industria Minero Metalúrgica (WBG, 1998)

Parámetro	Unidad	Límites de Emisión de Industria Mineo Metalúrgica - (WBG, 1998)						
		Guías Generales	Fabricación Aluminio	Minería Metales Base y Fe	Minera y Producción Carbón	Fundición de Cobre	Hierro y Acero	Fundición Plomo y Zinc
pH		6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
BOD5	mg/L	50						
DQO	mg/L	250	150	150			250	
STS	mg/L	50	50	50	50	50	50	20
Aceites y Grasas	mg/L	10		10	10		10	
Cianuro total	mg/L	1		1				
Cianuro libre	mg/L	0.1		0.1			0.1	
Nitrógeno	mg/L	10 (como NH3)		0.5				
Fosforo	mg/l	2						

Parámetro	Unidad	Límites de Emisión de Industria Mineo Metalúrgica - (WBG, 1998)						
		Guías Generales	Fabricación Aluminio	Minería Metales Base y Fe	Minera y Producción Carbón	Fundición de Cobre	Hierro y Acero	Fundición Plomo y Zinc
Fluoruro	mg/L	20	20				6 a 9	6 a 9
Cloruro	mg/L	0.2						
Coliformes	NMP/ 100ml	400					250	
Aluminio	mg/L		0.2					
Arsénico	mg/L	0.1		0.1		0.1		
Cadmio	mg/L	0.1		0.1		0.1		
Cromo	mg/L	0.5						
Cobre	mg/L			0.5		0.5		
Hierro	mg/L	3.5		3.5		3.5		
Mercurio	mg/L	0.01		0.01	3.5	0.01		
Níquel	mg/L	0.5		0.5				
Plomo	mg/L	0.1		0.2		0.1		
Plata	mg/L	0.1		0.2		0.1		

- (1) Número máximo permisible en 100 mL de muestra, valor máximo en 80% de 5 o más muestras.
- (2) Prueba de 5 días y a 20°C
- (3) Valores mínimos.
- (4) Como mg/L de nitrógeno.
- (5) Provisionalmente aplicar límite para uso V.
- (6) Si bien la regulación no lo especifica, se asume que son concentraciones de metal total.
- (7) 0.1\*LC50 (prueba de 96 horas)
- (8) 0.002\*LC50 (prueba de 96 horas).
- (9) En la norma aparece como “esteres estalatos”. Se presume que se refiere a esteres ftalato.
- (10) Bifenilos policlorados.
- (11) Material extractable en hexano (principalmente grasa)

**Tabla Nº 10.** Límites máximos permisibles (LMP) para descarga de efluentes líquidos de actividades minero - metalúrgicos

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>LMP en cualquier momento</b>	<b>LMP para el promedio anual</b>
pH		6 – 9	6 – 9
Sólidos Totales en Suspensión	mg/L	50	25
Aceites y Grasas	mg/L	20	16
Cianuro Total	mg/L	1	0.8
Arsénico Total	mg/L	0.1	0.08
Cadmio Total	mg/L	0.05	0.04
Cromo Hexavalente	mg/L	0.1	0.08
Cobre Total	mg/L	0.5	0.4
Hierro Disuelto	mg/L	2	1.6
Plomo Total	mg/L	0.2	1.6
Mercurio Total	mg/L	0.002	0.0016
Zinc Total	mg/L	1.5	1.2

## **CAPITULO IV**

### **LIXIVIACION**

La palabra **lixiviación** viene del latín: “Lixivia, -ae” sustantivo femenino que significa **lejía**. Los romanos usaban este término para referirse a los jugos que destilan las uvas antes de pisarlas, o las aceitunas antes de molerlas. En la actualidad, se denomina lixiviación, al lavado de una sustancia pulverizada para extraer las partes solubles, se denomina también a una de las formas de obtener oro, para ello se usa la lixiviación con cianuro a la mena de oro para purificarlo, Esto produce una gran contaminación por el envenenamiento producido por los componentes del cianuro y la gran cantidad de agua que se utiliza. El procedimiento de lavado (lixiviación) se hace en pilas gigantes, hasta del tamaño de varios estadios olímpicos, y por desgracia, posteriormente estos residuos pasarán a las capas freáticas de agua que generalmente se ubican en las altas montañas, que es donde están las minas de oro.

#### **4.1 Tipos de lixiviación**

##### **4.1.1 Lixiviación de óxidos**

Los metales pueden ser lixiviados de sus óxidos por las siguientes vías:

- Reacción directa con una solución acuosa de un ácido o un álcali, reacciones de este tipo son representados por el proceso histórico Bayer para la producción de aluminio; el proceso de la jarosita para la recuperación de Zn de las

ferritas de Zn, o la lixiviación de los siguientes óxidos: CuO, SnO<sub>2</sub>, ZnO etc.

- Por reacción de algunos de estos reactivos en presencia de un agente oxidante, reacciones de este tipo son la lixiviación de óxido de uranio en presencia de oxígeno, o muchos sulfuros
- Por reacción de algunos de estos reactivos en presencia de un agente reductor tal como el ácido sulfuroso o sulfato ferroso para el caso del dióxido de manganeso.

Los más abundantes minerales de cobre oxidados son la malaquita y la crisocola, la Tabla N° 11 presenta los principales.

### **Química y mecanismos de la lixiviación de minerales oxidados**

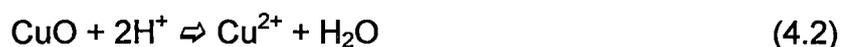
De manera general los minerales oxidados se pueden expresar sin el hidroxilo o las moléculas de H<sub>2</sub>O, como se indica a continuación: MO.NO<sub>2</sub>, en la que M es Cu y N puede ser Si o C.

En forma general la reacción de lixiviación se puede representar como sigue:

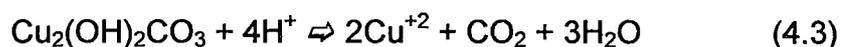


Así para la tenorita y la malaquita, se tiene:

Tenorita:



Malaquita:



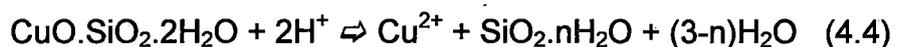
En la Tabla Nº 14 se presentan las características de lixivialidad de algunos minerales oxidados de cobre usando ácido sulfúrico.

Los carbonatos como la malaquita y azurita, se disuelven con una alta velocidad y eficiencia, características similares presenta la tenorita, sin embargo hay mayores consumos de ácido. Ambos minerales mencionados son completamente solubles a temperatura ambiente en soluciones que contienen ácido sulfúrico, sin necesidad de requerir agentes oxidantes para hacer más efectiva su disolución, por el contrario los silicatos han resultado ser comparativamente menos solubles; así la dioplasa presenta una lenta cinética de disolución, pudiéndose considerar como refractaria a la lixiviación ácida tradicional.

#### **Cinética de la lixiviación de óxido**

En general la cinética de la lixiviación de minerales oxidados es dependiente de la actividad de los iones hidrogeno (protones) en el sistema, el área superficial y factores geométricos más complejos son también involucrados.

La reacción que se plantea para el caso de la disolución de crisocola en solución ácida es la siguiente:



#### **4.1.2 Lixiviación de sulfuros**

Un gran número de metales se encuentran en la naturaleza en forma de sulfuros tal como se muestra en la tabla Nº 14.

También se puede incluir las sulfosales de Cu–As–Sb; Cu–Sb–As (tennantita, Tetraedrita) y Pb–Sb (Jamesonita) etc., que van asociados a la plata.

El tratamiento de estas menas previo proceso de concentración es por procesos Pirometalúrgicos, recién en las últimas dos décadas, los procedimientos Hidrometalúrgicos han empezado a competir con los métodos piro metalúrgicos.

### **Química y mecanismos de lixiviación de los sulfuros:**

Los métodos de lixiviación de sulfuros son divididos según la presencia o ausencia de agentes oxidantes.

#### **Lixiviación en ausencia de agentes oxidantes**

Entre los principales están los siguientes:

#### **Lixiviación ácida:**

El ácido sulfúrico diluido disuelve algunos sulfuros metálicos con liberación de sulfuro de hidrogeno ( $H_2S$ ), la reacción para el caso del sulfuro de zinc (esfalerita) se presenta a continuación:



El gas liberado puede ser oxidado y recuperado en forma de azufre elemental. Pawlek y Pietsch (1957) estudiaron el efecto de una solución al 10% de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) a  $120^\circ C$ , sobre sulfuros, el  $H_2S$  formado fue impulsado por el gas nitrógeno, llegando a los siguientes resultados:

- Sulfuros Solubles : ZnS, CoS, NiS, FeS.
- Parcialmente solubles :  $FeS_2$

- Insoluble : PbS, CuS, AS<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>,

Este método de lixiviación encontró algunas aplicaciones. Govorov (1959) encontró que el níquel y Cobalto pueden ser lixiviados de matas de Ni–Co–Cu quedando un residuo de sulfuros con todo el Cu.

Dewing y Cochran, desarrollaron un método para producir sulfato de Zinc y azufre elemental a partir de concentrados de esfalerita usando H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 80%, este metodo minimiza la producción de azufre gaseoso, bajo esta concentración se produce grandes cantidades de H<sub>2</sub>S y encima de esta concentración se produce SO<sub>2</sub>, Recuperándose más de 98% de Zinc como sulfato de zinc (ZnSO<sub>4</sub>) soluble a 175°C y por 3 horas, el proceso comprende las siguientes reacciones:



#### **Lixiviación con hidróxidos alcalinos:**

El hidróxido de sodio (NaOH) es sugerido para la lixiviación de sulfuro de plomo (PbS) y esfalerita (ZnS), formando Plumbatos y Zincatos solubles, las reacciones correspondientes se presentan a continuación:



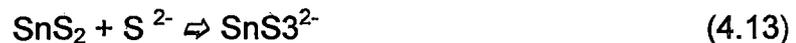
JANGG (1963) sugirió el tratamiento de menas piriticas complejas con solución de NaOH a 400°C y bajo presión,

por esta vía el sulfuro de hierro es cubierto por un óxido hidratado, los sulfuros de Cobre y Níquel no son afectados.



### **Lixiviación con sulfuros alcalinos**

Soluciones de sulfuro de Sodio reaccionan con sulfuros de arsénico, antimonio, estaño y mercurio para formar thiosales solubles, las reacciones correspondientes se presentan a continuación:



Hidróxido de Sodio es usualmente adicionado a las soluciones de lixiviación para prevenir la hidrólisis del sulfuro de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}$ )

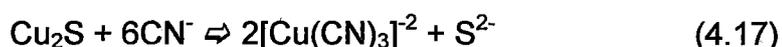


Jangg y Bach (1958) usaron una mezcla de 200 g/l de sulfuro de sodio hidratado ( $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) y 50 g/l de NaOH para lixiviar arsénico de una mena compleja (16.3% As, 28.3% S, 39.7% Fe, 1.8% Cu y 1.2% Ni), la reacción fue llevada a cabo en un autoclave a 450° C por 2 horas, pasando el arsénico a solución como Thioarsenito.

Polymbetona(1963) extrajo arsénico de polvos de convertidor, conteniendo 8 -18% arsénico por lixiviación con  $\text{Na}_2\text{S}$  (100g/l) a  $95^\circ\text{C}$  por 2 horas.

### **Lixiviación con cianuros alcalinos**

El cianuro de sodio tiene acción solvente sobre los sulfuros y es sugerido para la lixiviación de menas de sulfuros de Cobre (especialmente cobre secundario como la chalcocita, covellita, etc.):



### **Doble descomposición**

Soluciones de sulfato de cobre fue sugerido por Salvetsberg (1932) para la separación de Níquel en una mena sulfurada de acuerdo a la siguiente reacción:



El precipitado sulfuro de cobre ( $\text{CuS}$ ) es filtrado y oxidado a sulfato y recirculado.

McGauley(1951) sugirió concentrar  $\text{CuS}$  en una mena de sulfuros de  $\text{Cu-Fe}$  por lixiviación de acuerdo a :



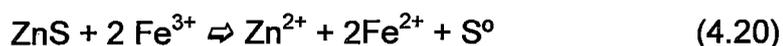
Tseft y Serikov(1963) Sugirieron usar  $\text{CuSO}_4(\text{aq})$  para remover  $\text{Pb}$ ,  $\text{Zn}$  y  $\text{Fe}$  de menas sulfuradas de cobre.

### **En presencia de agentes oxidantes**

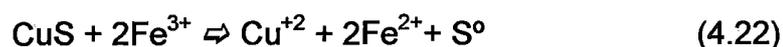
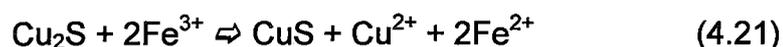
A continuación se detallan los principales:

#### **Lixiviación con ion férrico:**

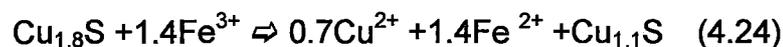
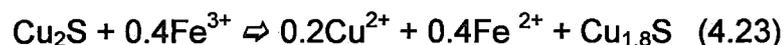
Sulfato o cloruro Férrico reacciona con los metales sulfurados, liberando azufre elemental, de acuerdo a la siguiente reacción:



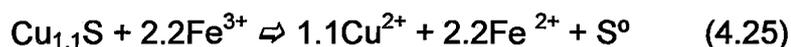
Sullivan (1930-1933) investigó la disolución de menas de chalcocita con leyes entre 5-10% de Hierro y en el rango de temperatura de 23 – 95 °C. Encontró que el  $\text{Cu}_2\text{S}$  se disuelve en dos etapas de acuerdo a las siguientes reacciones:



Thomas, Ingraham y Mc Donald (1967) mostraron que la reacción es más compleja que lo señalado anteriormente, estableciendo que el  $\text{Cu}_2\text{S}$  es convertido a digenita ( $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$ ) en la etapa inicial de la lixiviación, las reacciones correspondientes se muestran a continuación:



Esta última reacción es seguida por:



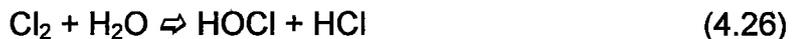
El uso de sulfato férrico ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ) como un oxidante para sulfuros es limitado por el hecho que la solución de lixiviación es siempre contaminada con iones ferrosos.

### Agua de cloro e hipoclorito:

Ambos reactivos no están siendo usados en el presente en metalurgia pero están siendo considerados seriamente para el tratamiento de minerales sulfurados.

El cloro es producido en gran escala por la electrolisis de soluciones acuosas de NaCl, si la electrolisis es llevada a cabo en ausencia de un diafragma, una solución de hipoclorito de Sodio hipoclorito de sodio (NaOCl) es obtenida.

Cuando se disuelve en agua, el cloro(Cl<sub>2</sub>) forma ácido hipocloroso y clorhídrico.



El ácido hipocloroso gradualmente se descompone en ácido clorhídrico y oxígeno, en la que su acción oxidante se debe a ese oxígeno liberado.



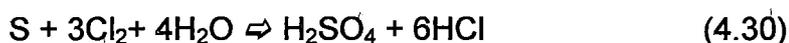
Su acción oxidante potente es utilizada para lixiviar menas sulfuradas, la reacción total es:



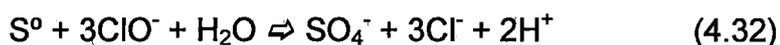
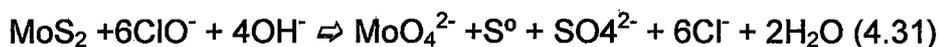
Dependiendo de la concentración del agente lixiviante, azufre elemental o ion sulfato pueden ser producidos cuando los minerales son tratados con agua de Cloro (Sherman y Strickland, 1957), esto es cierto en el caso de la lixiviación de sulfuros de Pb.



El azufre reacciona con el exceso de Cloro, formando ácido sulfúrico y ácido clorhídrico de acuerdo a la siguiente reacción:



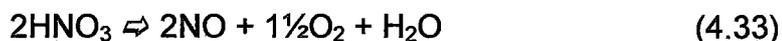
La lixiviación de la Molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ) por hipoclorito de sodio ( $\text{NaOCl}$ ), está siendo estudiada extensamente; a bajas concentraciones de  $\text{NaOCl}$ , azufre elemental es formado y a altas concentraciones el azufre es oxidado a sulfato:



La lixiviación de sulfuros por cloro ( $\text{Cl}_2$ ) puede ocurrir en medio ácido o alcalino.

### **Acido nítrico y nitratos**

El ácido Nítrico en caliente se descompone con liberación de oxígeno:

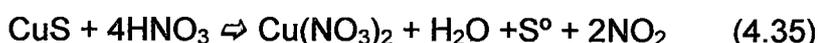


En donde el oxígeno es el oxidante y en menor grado el oxido nitroso ( $\text{NO}$ ).

A  $45^\circ\text{C}$  el  $\text{NO}$  puede ser reconvertido a ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) por aire y vapor de agua:



La acción oxidante del ácido nítrico y Nitratos es utilizado para lixiviar menas sulfuradas:



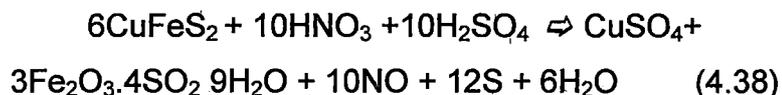
El ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) también reacciona sobre el azufre elemental de acuerdo a la siguiente reacción:



El ácido sulfúrico formado convierte a los nitratos formados en sulfatos



Una mezcla de ácido nítrico y sulfúrico fue probado por Prater(1973) para el caso de la chalcopirita y encontró que la siguiente reacción toma lugar:



Este proceso encuentra pequeño uso por el costo y la formación de óxido Nitroso que necesita ser recuperado y re oxidado para un subsecuente uso.

### **Ácido sulfúrico concentrado**

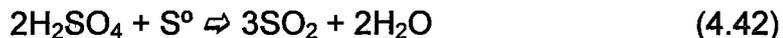
Acido sulfúrico concentrado caliente (66% ó 93%) es un agente oxidante fuerte, el poder oxidante puede ser considerado debido a que se forma trióxido de oxígeno (SO<sub>3</sub>) por descomposición de acuerdo a las siguientes reacciones:



Muchos sulfuros son oxidados a sulfatos por este reactivo (Dewey, 1893)



A alta temperatura la siguiente reacción toman lugar:



De la mena sulfatada, todo el Zn, Cu y Fe pueden ser lixiviados con agua; el sulfato de Pb, Ag, Au y antimonio quedan en el residuo en forma insoluble.

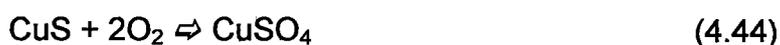
### Oxigeno

Los metales sulfurados son prácticamente insolubles en agua a temperaturas altas, tal como 400°C como se observa en la Tabla № 17, pero en presencia de oxígeno, ellos son solubilizados como sulfatos, de esta manera Hengleni y Niemann(1927) trataron una suspensión acuosa de blenda (ZnS) a 180°C con oxígeno bajo 20 atmósferas, convirtiéndose completamente en 6 horas en sulfato de Zinc.

En algunos casos, cuando la lixiviación es llevada a cabo en medio ácido y a menos de 120°C, no es formado azufre elemental; este es el caso cuando un sulfuro metálico en un estado de Valencia bajo se oxida a un estado de valencia alto, por ejm: Chugaev (1965) reporto que la oxidación de sulfuros cuproso ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) debajo de 120°C se oxida a sulfuro cúprico.



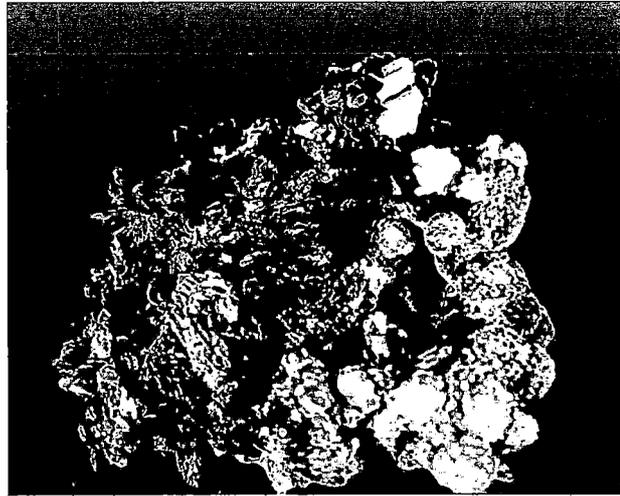
Si se lleva a cabo encima de esta temperatura, la siguiente reacción es superpuesta. Sobre la primera:



**Tabla Nº 11. Principales minerales Oxidados de cobre**

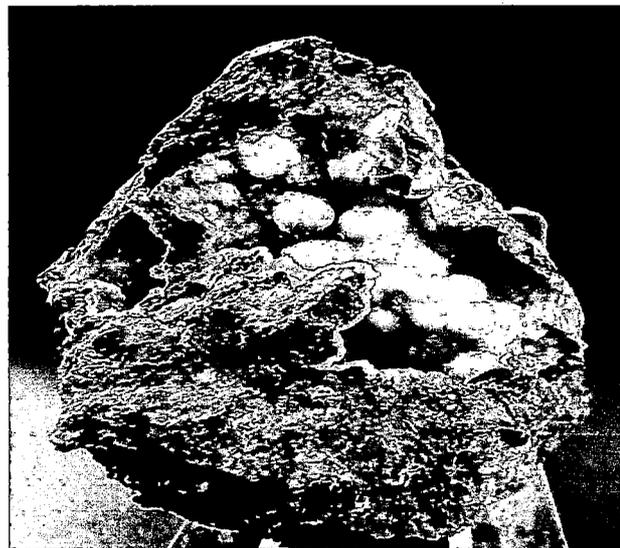
<b>Elemento</b>	<b>Nombre</b>	<b>Formula</b>
<b>Cobre</b>	Cuprita	$\text{Cu}_2\text{O}$
	Tenorita	$\text{CuO}$
	Malaquita	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$
	Azurita	$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$
	Brochantita	$\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$
	Crisocola	$\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Fuente: Metalurgia extractiva del cobre - Biswas



**Figura Nº 1 Azurita con Malaquita**

Fuente CODELCO



**Figura Nº 2 Crisocola**

Fuente CODELCO

**Tabla Nº 12. Principales minerales Oxidados**

<b>Elemento</b>	<b>Nombre</b>	<b>Formula</b>
Aluminio	Gibbsita	$Al(OH)_3$
Hierro	Magnetita	$Fe_3O_4$
	Hematita	$Fe_2O_3$
	Limonita	$Fe_2O_3 \cdot nH_2O$
	Goethita	$FeO(OH)$
	Siderita	$FeCO_3$
	Manganeso	Pirolusita
Manganita		$Mn_2O_3 \cdot H_2O$
Hausmannita		$Mn_3O_4$
Estaño	Casiterita	$SnO_2$
Uranio	Petchblenda	$U_3O_8$
	Uranita	$UO_2$
Zinc	Zincita	$ZnO$
	Hydrozincita	$ZnCO_3 \cdot 2Zn(OH)_2$
	Smithsonita	$ZnCO_3$

**Tabla Nº 13.** Los minerales más explotados de cobre en la actualidad

Elemento	Mineral	Fórmula
Cobre	Malaquita	$\text{CuO} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$
	Crisocola	$\text{CuO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

**Tabla Nº 14** Características de Lixiviación de Minerales de Cobre

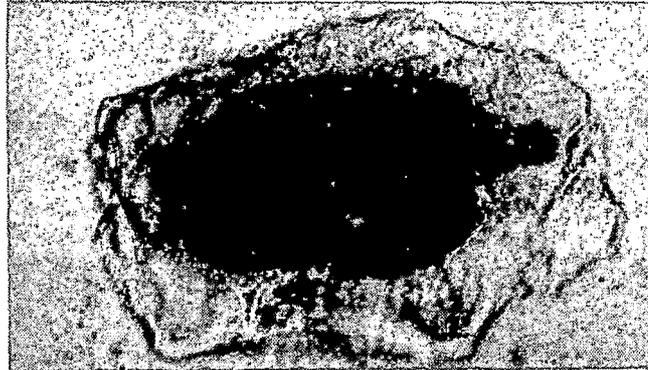
Mineral	Granulometría	Lixiviante	Tiempo	Temperatura (°C)
Azurita	-100 +200 mallas	1 – 5 % $\text{H}_2\text{SO}_4$	1 hora	Ambiente
Malaquita	-100 +200 mallas	1 – 5 % $\text{H}_2\text{SO}_4$	1 hora	Ambiente
Tenorita	-100 +200 mallas	1 % $\text{H}_2\text{SO}_4$	1 hora	Ambiente
Crisocola	-10 + 28 mallas	5 % $\text{H}_2\text{SO}_4$	6 hora	Ambiente
Cuprita	-10 + 28 mallas	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ac.	3 hora	Ambiente
	-100 +200 mallas	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ac.	1 hora	Ambiente
Dioptasa	-10 + 28 mallas	1 % $\text{H}_2\text{SO}_4$	60 días	Ambiente
	-10 + 28 mallas	2 % $\text{H}_2\text{SO}_4$	60 días	Ambiente
	-10 + 28 mallas	5 % $\text{H}_2\text{SO}_4$	37 días	Ambiente

Fuente: Esteban Domic

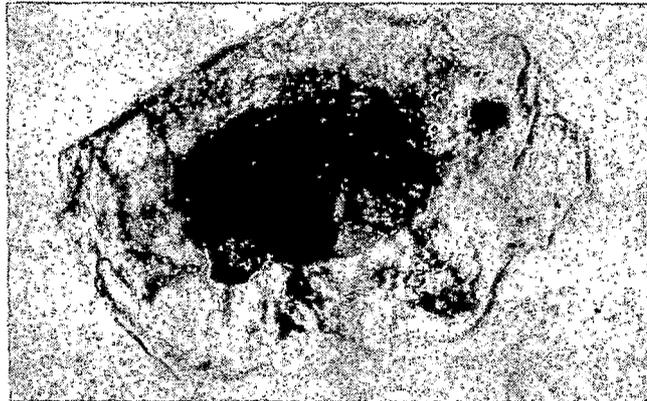
-65/+100 mesh

100 X

partially  
leached  
2 min.



partially  
leached  
5 min.



completely  
leached  
15 min.



**Figura Nº 3. Lixiviación de la Crisocola**

Fuente: CODELCO

**Tabla No 15.** Velocidades de Disolución de principales especies de Cobre a 25°C, expuestas a una solución de ácido sulfúrico diluido.

<b>Cinética relativa</b>	<b>Tiempo de referencia</b>	<b>Especies minerales de cobre</b>
Muy rápida (a temperatura ambiente)	Segundos a minutos disolución es completa	Carbonatos (malaquita, azurita) Sulfatos (chalcantita) Cloruros (atacamita)
Rápida (requiere mayor acidez)	Horas disolución es completa	Óxidos cúpricos (tenorita) Silicatos (crisocola)
Moderada (requiere oxidante)	Días a semanas disolución puede no ser completa	Cobre nativo, óxidos complejos con manganeso
Lenta (requiere oxidante)	Semanas a meses disolución puede ser incompleta	Sulfuros simples (calcosina, covelina)
Muy Lenta (requiere agente oxidante)	Años disolución es incompleta	Sulfuros complejos (bornita, Calcopirita, enargita y Tetrahedrita)

Fuente: Esteban Dómic

**Tabla No 16. Principales Minerales Sulfurados**

<b>Metal</b>	<b>Mineral</b>	<b>Formula</b>
Antimonio	Estibina	$Sb_2S_3$
Arsénico	Rejalgar	$As_4S_4$
	Oropimente	$As_2S_3$
	Arsenopirita	$FeAsS$
Cobalto	Linnaeita	$Co_3S_4$
Cobre	Chalcocita	$Cu_2S$
	Covellita	$CuS$
	Digenita	$Cu_9S_5$
	Bornita	$Cu_5FeS_4$
	Chalcopirita	$CuFeS_4$
hierro	Pirita	$FeS_2$
	Pirrotita	$FeS_2$
Plomo	Galena	$PbS$
Mercurio	Cinabrio	$HgS$
Molibdeno	Molibdenita	$MoS_2$
Níquel	Pendlandita	$(Fe,Ni)S$
Plata	Argentita	$Ag_2S$
Zinc	Esfalerita	$ZnS$

**Tabla Nº 17.** Solubilidad de sulfuros en H<sub>2</sub>O en g/l (Verhoogen, 1938)

Sulfuro	Solubilidades (g/l)				
	25°C	100°C	200°C	300°C	400°C
Ag <sub>2</sub> S	1*10 <sup>-12</sup>	5*10 <sup>-12</sup>	2*10 <sup>-11</sup>	3*10 <sup>-11</sup>	5*10 <sup>-11</sup>
CuS	2*10 <sup>-13</sup>	7*10 <sup>-13</sup>	3*10 <sup>-12</sup>	8*10 <sup>-12</sup>	1*10 <sup>-11</sup>
Cu <sub>2</sub> S	1*10 <sup>-12</sup>	5*10 <sup>-11</sup>	---	---	---
FeS <sub>2</sub>	2*10 <sup>-8</sup>	2*10 <sup>-7</sup>	2*10 <sup>-6</sup>	8*10 <sup>-6</sup>	2*10 <sup>-5</sup>
HgS	1*10 <sup>-17</sup>	7*10 <sup>-17</sup>	4*10 <sup>-16</sup>	1*10 <sup>-15</sup>	3*10 <sup>-15</sup>
PbS	3*10 <sup>-9</sup>	5*10 <sup>-8</sup>	6*10 <sup>-7</sup>	3*10 <sup>-6</sup>	8*10 <sup>-6</sup>
ZnS	3*10 <sup>-5</sup>	2*10 <sup>-3</sup>	0.1	1.2	7.0

**Tabla Nº 18.** Productos de oxidación de sulfuros en medio neutro o alcalino

COMPUESTO	NOMBRE
S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Thiosulfato
S <sub>2</sub> O <sub>6</sub> <sup>2-</sup>	Polythionato
S <sub>2</sub> O <sub>6</sub> <sup>2-</sup>	Dithionato
S <sub>2</sub> O <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Dithinito(ó Hiposulfito)
SO <sub>2</sub> <sup>2-</sup>	Sulfoxilato

## **CAPITULO V**

### **METODOS ALTERNATIVOS DE RECUPERACION PARA EL COBRE**

#### **5.1 Flotación de cobre.**

La flotación de minerales es un fenómeno físico-químico, usado como un proceso de concentración de minerales finamente divididos, que comprende el tratamiento físico y químico de una pulpa de mineral creando condiciones favorables, para la adhesión de partículas de un mineral predeterminado a las burbujas de aire.

En este proceso que es bastante complejo, en el cual se efectúa la separación, está compuesto por tres fases: La fase líquida, generalmente agua, la cual es química y físicamente muy activa; la fase gaseosa, generalmente aire, la cual es relativamente simple y la fase sólida la cual puede ser considerada infinitamente variable. Las partículas de aire o burbujas llevan los minerales seleccionados desde el fondo de las máquinas o celdas de flotación hasta la superficie de la pulpa formando una espuma estabilizada de la cual las partículas predeterminadas son recuperadas.

La flotación es un macrofenómeno de hidrofobicidad y de aerofilicidad de la superficie de los minerales, que se desean recuperar, la Tabla N° 17 muestra los reactivos que comúnmente se usan en la flotación de sulfuros de cobre; para que la flotación de minerales sea efectiva, se requiere reactivos químicos, equipos y características de la operación que deben ser adecuadamente consideradas.

Reactivos químicos: Colectores, espumantes, activadores, depresores

Componentes del equipo: Diseño de celda, sistema de agitación, flujo de aire, configuración de los bancos de celdas, control de los bancos de celdas

Componentes de la operación: Velocidad de alimentación, mineralogía, tamaño de las partículas, densidad de pulpa, temperatura

Los reactivos que se agregan a la suspensión de mineral y agua con el propósito de crear una superficie hidrofóbica, se denominan colectores. Para facilitar la adhesión del colector al mineral útil y para impedir esta adhesión al mineral no valioso se agregan otros reactivos denominados activadores y depresores, estos compuestos químicos llevan el nombre genérico de modificadores o moduladores de la colección.

Una teoría de flotación debe explicar el mecanismo mediante el cual actúan los colectores y los modificadores, las condiciones para que un compuesto químico sea colector de un determinado mineral, este debe establecer las condiciones físico-químicas que producirán un mejor rendimiento del proceso.

Los avances que se han logrado, han llevado a la concepción actual de la interacción entre el colector y la superficie del mineral es de naturaleza electroquímica. Se ha demostrado que el oxígeno, cumple con transformar en medio alcalino la superficie de los sulfuros en especies oxidadas de mayor solubilidad, cumple la importante función de actuar como aceptante de electrones permitiendo la formación de disulfuros orgánicos que confieren un alto grado de hidrofobicidad al

recubrimiento formado únicamente por la sal metálica del colector.

De esta forma las antiguas teorías de reacción química entre el colector y el sulfuro metálico, o de simple absorción de iones, han dejado paso a nuevas teorías, existiendo a la fecha las siguientes:

- Teoría química o de la oxidación superficial.
- Teoría de semiconductores.
- Teoría Electroquímica.
- Teoría de la absorción física.

#### **5.1.1 reactivos de flotación**

Entre los principales reactivos tiene los siguientes :

##### **5.1.1.1 los colectores**

Son compuestos químicos orgánicos que actúan selectivamente en la superficie de ciertos minerales, haciéndolas repelentes al agua y asegurando la acción de las burbujas de aire, haciéndolas aerofílicas, entre los principales se tiene:

##### **- Los xantatos**

Son colectores aniónicos de uso generalizado, están disponibles comercialmente como soluciones, polvo o pellets. Estos últimos son los más deseados debido a que hay menos problemas de polvos y más estabilidad en el almacenamiento.

Todos los xantatos se descomponen con la humedad, produciendo disulfuro de carbono que es muy inflamable. Existe un considerable rango de pureza en los xantatos disponibles comercialmente.

- **Los ditiofosfatos**

Los ditiofosfatos son ésteres secundarios del ácido ditiofosfórico y se preparan haciendo reaccionar pentasulfuro de fósforo y alcoholes, como sólidos solubles en agua y son usados en soluciones de 5% a 20%. Como el ácido ditiofosfórico se hidroliza fácilmente igual que en el caso de los xantatos, es necesario usar alcoholatos para obtener las sales en vez de los ácidos correspondientes. El rango de pH para usarlo es de 4 a 12.

- **Los tiocompuestos**

Entre este grupo de colectores se encuentran: la Tiocarbánilida, los mercaptanos y tiofenoles, el mercaptobenzotiazol, el difeniltiocarbazida, el ditiocarbamatos y otros.

Los reactivos más característicos son los tiocarbamatos que son pocos solubles en agua, usualmente son añadidos como emulsiones líquidas.

### **5.1.1.2 Los espumantes**

Son sustancias orgánicas de superficies activas heteropolares, que se concentran por absorción en la interface aire-agua, ayudando a mantenerse a las burbujas de aire dispersas y evitando su coalescencia.

Los espumantes son compuestos análogos en su estructura a los colectores, su diferencia con estos radica en el carácter del grupo polar que en los colectores es un grupo químicamente activo para reaccionar con la superficie del mineral mientras que en los espumantes es un grupo liofílico de gran afinidad por el agua. En forma general puede decirse que los colectores es un grupo químicamente activo para reaccionar con la superficie del mineral mientras que en los espumantes es un grupo liofílico con gran afinidad por el agua. En forma general puede decirse que los colectores tienen afinidad por la interface sólido-líquido, los espumantes la tienen por la interface líquido-gas.

Los espumantes más característicos y los más usados son los siguientes:

- **Aceite de pino**

El aceite de pino, proporciona una espuma fina, fácilmente quebrable y manipulable. Tiene tendencia a proporcionar altas recuperaciones y grados de concentración medianos. Cuando se utiliza en exceso abate las espumas y proporciona efervescencia.

Se usa fundamentalmente en sulfuros de cobre, y en menor intensidad en la flotación de galena y blenda.

- **Acido cresílico**

El ácido cresílico proporciona espuma menos fina, pero tiene las mismas propiedades que las del aceite de pino, se usa solo combinado con el metil isobutil carbinol. Se usa muy ampliamente en la flotación de galena, de pirita y en la flotación de de productos de varios minerales sulfurados en la misma espuma.

- **Alcoholes**

Son ligeramente solubles en agua, pero se dispersan muy fácilmente y pueden usarse sin diluir. Algunas veces se usan mezclados con un colector, entre los alcoholes más usados están: Metil Isobutil carbonol, 2 etil Hexanol, poliglicoles. Estos reactivos producen espumaciones de fina textura, espumación selectiva y evitan problemas de estabilidad en canales.

### **5.1.1.3 Los modificadores**

Son reactivos usados en la flotación de minerales para controlar el efecto o la acción de los colectores de los minerales, ya sea intensificando o reduciendo su efecto hidrofóbico (repelente al agua) en la superficie del mineral, de manera que la selectividad de la flotación sea incrementada. Se dividen en: activadores, depresores, reguladores o modificadores de pH.

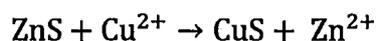
- **Activadores**

Hacen la acción del colector más selectiva, asegurando la separación de los minerales.

Generalmente son sales solubles que se ionizan en solución y los iones reaccionaron entonces con la superficie natural.

Un ejemplo clásico es la activación de la esfalerita por el cobre en solución. La esfalerita no flota satisfactoriamente con un xantato de colector, ya que los productos que se forman, tales como el xantato de zinc, son productos que se forman, tales como el xantato de colector de zinc, son relativamente solubles en agua y por lo tanto no proporcionan una película hidrofóbica alrededor de la partícula del mineral. La flotabilidad se puede mejorar por el uso de grandes cantidades de xantatos de cadena larga, pero un método más satisfactorio es usar sulfato de cobre como activador, el cual se disuelve rápidamente y se disocia en iones de cobre dentro de la solución.

La activación se debe a la formación de moléculas de sulfuro de cobre sobre la superficie de la esfalerita debido al hecho que el cobre es más electronegativo que el zinc y por consiguiente se ioniza menos rápidamente:



El sulfuro de cobre que se deposita sobre la superficie de la esfalerita reacciona rápidamente con el xantato para formar un xantato de cobre insoluble que hace hidrofóbica la superficie de la esfalerita.

Los activadores más utilizados están de acuerdo a la función que ejercen sobre la superficie de los minerales a activarse.

- **Depresores**

Estos reactivos se usan para incrementar la selectividad de la flotación volviendo hidrofílico a ciertos minerales evitando así su flotación; pueden dividirse en compuestos orgánicos y compuestos inorgánicos.

El mecanismo de acción de los compuestos inorgánicos se ha entendido razonablemente y se detalla en los siguientes puntos:

- El ion cianuro (cianuro de sodio o cianuro de calcio) que deprime a los sulfuros de zinc, de cobre, de fierro, de plata, de cadmio, de níquel y aún de antimonio, debido a que la estabilidad de los cianuros complejos de estos elementos es más estable que la de sus correspondientes tiolatos.
- El cromato y el dicromato que deprime al sulfuro de plomo por la correspondiente formación de la sal de plomo en la superficie del mineral.
- El silicato de sodio que tiene una función compleja de dispersante, depresor y modificador de espuma. Dispersa y deprime las lamas de ganga silíceas y por esto tiende a endurecer las espumas.
- El sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), pirosulfito ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ) y  $\text{SO}_2$  que deprimen los sulfuros de zinc y

de hierro, generalmente en combinación con el sulfato de zinc y el cianuro.

- Los carbonatos, fluoruros, fosfatos y sulfatos, que son usados como depresantes en la flotación de minerales tipo sales cuando se usa como colector al ácido fático.

Los depresores orgánicos son usualmente productos naturales o productos naturales modificados de alto peso molecular y con un numeroso grupo de cadenas polares hidratadas y que son la base de la acción depresante. Aun cuando los depresores orgánicos contienen grupos aniónicos ( $-\text{COOH}$ ,  $-\text{OSO}_3\text{H}$ ,  $-\text{SO}_3\text{H}$ ) y catiónicos ( $-\text{NH}_2$ ,  $-\text{NH}$ ), los reactivos más comunes son no iónicos. Desafortunadamente los mecanismo de acción de estos reactivos aún no está claro.

**Tabla Nº 19.** Reactivos que se usan comúnmente en la flotación de minerales sulfurados de cobre

<b>Operación</b>	<b>Reactivo</b>	<b>Cantidad de reactivo (kg/ton)</b>	<b>Punto en que se agrega</b>	<b>Condición de operación</b>
Flotación primaria	CaO	0.5 -5	Molino de bolas(previo a la flotación)	pH de 8.5 a 12.5
	Xantato amílico de potasio(colector)	0.001 – 0.01	Molino de bolas y deposito de alimentación del hidrociclón	Tiempo entre adición del reactivo y flotación (tiempo de acondicionamiento de 10 – 20 min) Tiempo de flotación de 40 a 60 min
	DOWFROTH 250(alcoholes de cadena larga o éteres) o aceite de pino		Derrame del hidrociclón	
Flotación en las celdas limpiadoras	NaCN(depresor)	0.001 – 0.05	Alimentación en la celda limpiadora o molino de bola intermedio	
Flotación en las celdas recuperadoras	CuSO <sub>4</sub> (tiende a activar las superficies de los minerales de cobre parcialmente oxidados) Xantato amílico de potasio(para menor recuperación)	0.005-0.01	Alimentación en las celdas depuradoras	Tiempo de flotación de 40 a 60 min

Fuente: Biswas- Davenport

## **5.2 Biolixiviación de cobre**

### **5.2.1 Definición de Biolixiviación**

La Biolixiviación es un proceso en el cual se emplean microorganismos para disolver los minerales, liberando un metal de valor presente en el mineral o en un concentrado, que con métodos convencionales sería muy difícil de extraer. La biolixiviación es un proceso convencional de lixiviación, catalizado biológicamente pero aplicado a los minerales sulfurados, ante la necesidad de aumentar la cinética de su disolución. De esta manera la biolixiviación es un proceso químico, mediado por el agua y oxígeno atmosférico y un proceso biológico, mediado por microorganismos.

La biolixiviación generalmente se refiere a la tecnología de biominería aplicado a metales base. Los metales bases son los metales relativamente fáciles de oxidar o corroer y en el área industrial se refiere a los metales no-ferrosos, que incluye prácticamente a todos los metales a excepción del mismo hierro y su aleación, el acero.

A escala comercial la biolixiviación es aplicada para la recuperación de cobre y uranio por lixiviación y de oro mediante un pretratamiento de minerales refractarios, que recibe el nombre de biolixiviación. La tecnología de biolixiviación también ha sido probada en laboratorios para sulfurados de cobalto, galio, molibdeno, níquel, zinc y plomo [Brierley J.A., 2001]

### 5.2.2 Características de los microorganismos utilizados

Las bacterias que intervienen en los procesos de lixiviación son generalmente autótrofas, aeróbicas y quimiosintéticas. Esta última característica, las hace capaces de oxidar minerales para producir el ion férrico y ácidos sulfúricos, necesarios para las reacciones de biolixiviación. El ion férrico, es un agente fuertemente oxidante, que permite oxidar los minerales de sulfuro de cobre a sulfato de cobre que es soluble. Debido a esto, también se les llama microorganismos sulfo y ferro-oxidantes.

Su capacidad autótrofa les permite sintetizar sus componentes celulares a partir de compuestos inorgánicos, como la fijación del CO<sub>2</sub> de la atmósfera. Se alimentan de los minerales de los que obtienen energía y realizan esta tarea como parte de sus procesos metabólicos. También se caracterizan por ser organismos que viven en condiciones extremas (extremófilos), en este caso, las normales de los minerales: pH ácido y altas concentraciones de metales.

Todas estas características le confieren la clasificación de bacterias quimilitoautotróficas ferro-sulfo oxidante. Uno de sus principales exponentes es la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans*, aislada por primera vez desde las aguas de una mina de carbón, cuyo descubrimiento se dio a conocer en 1947 [Colmer, A.R. y Hinkle, M.E, 1947]. Así fue como se encontró la primera bacteria identificada capaz de lixiviar el cobre; su nombre indica varias cosas: "Acidithiobacillus" es acidófilo porque crece en pH ácido, es "thio" porque es capaz de oxidar compuestos de azufre, es un "bacillus" porque tiene forma de bastón y

“ferrooxidans” porque además de oxidar son organismos biológicos que se alimentan principalmente de dos impurezas que hay que extraer del mineral para producir el cobre: el azufre, que las bacterias pueden oxidar y convertir en ácido sulfúrico y el hierro, el cual es precipitado sobre el mineral de descarte, lo que permite lograr una disolución más barata y simple.



**Figura № 4.**

Bacteria Acidithiobacillus

Fuente propia

La Acidithiobacillus ferrooxidans, ha sido la bacteria más estudiada para biolixiviación y por consiguiente de la que existe mayor información, sin embargo existen otros microorganismos identificados que solubilizan minerales sulfurados, como los que se muestra en la cuadro numero 18, donde se presenta una lista de microorganismos reconocidos con importancia comercial en operaciones biohidrometalúrgicas como también aquellas que únicamente pueden ser exploradas en pruebas de laboratorio pero que parecen ser prometedoras a futuro.

El efecto de condiciones ambientales sobre el desarrollo y crecimiento de las bacterias juega un papel importante dentro del proceso de lixiviación bacteriana.

### **5.2.3 Diversidad de microorganismos en un sistema de Biolixiviación.**

En los ambientes naturales asociados a la minería, es posible encontrar una variedad de microorganismos como bacterias y arqueas, pero en su mayoría bacterias, cuya población se encuentra fuertemente influenciada por la temperatura a la que están expuestas, así como por los nutrientes presentes. La temperatura en los sistemas industriales no supera los 45°C y en esta situación es posible encontrar bacterias de las especies *Acidithiobacillus ferrooxidans* (A.f), *Acidithiobacillus thiooxidans* (A.t) y *Leptobacillus ferrooxidans* (L.f) que están en mayor abundancia. Respecto a los nutrientes en un medio con ión ferroso es común encontrar A.f, y en su ausencia predomina la A.t y la L.f. La presencia de determinadas especies de bacterias dependerá del mineral biolixiviado, por lo que las condiciones óptimas de operación podrían no ser exactamente las mismas para todos los recursos mineros, para ello es importante conocer su composición mineralógica [Vásquez, L.M., 1997].

Cada especie de bacterias tiene distintos requerimientos de nutrientes como fuente energética, por lo que una mezcla de bacterias podría resultar más beneficiosa que una especie pura, en la biolixiviación de un mineral. Así por ejemplo los compuestos que no son oxidados por una

especie, pueden ser oxidados por otra, evitando una acumulación que podría resultar tóxica.

#### **5.2.4 Cultivo de microorganismos**

El remanente de la explotación del mineral de mayor ley y los relaves de flotación quedan cerca de los yacimientos, expuestos a las condiciones ambientales, lo que crea un ambiente propicio para el desarrollo de microorganismo. De los drenajes ácidos que se generan naturalmente, se puede aislar microorganismos para su cultivo en el laboratorio ya sea una especie en particular o una comunidad.

Sin embargo, existe consenso en que los métodos que utilizan cultivo son inadecuados para estudiar la composición microbiana de una comunidad, pues solo permiten observar una pequeña fracción de los microorganismos que crecen en el sistema natural. El cambio de medio distinto al original, hace que los cultivos sean selectivos y con ello se subestime el número y variedad de microorganismos de una muestra [Vásquez, L.M., 1997].

Para estudiar los microorganismos presentes en el medio natural, últimamente se ha optado por el análisis de ADN extraído directamente del sistema, lo que es independiente de la facultad del microorganismo para crecer en un medio de cultivo [Vásquez, L.M., 1997]. Tarea que se ve facilitada por la existencia y disponibilidad del secuenciamiento del código genético de las especies bacterianas lixiviantes.

### **5.2.5 Factores que afectan el desarrollo bacteriano.**

El papel que juegan los factores ambientales, biológicos y fisicoquímicos, sobre el crecimiento y desarrollo de las bacterias es fundamental en el rendimiento de la extracción de metales por biolixiviación. El control de estos factores es muy importante para asegurar las condiciones óptimas de pH, humedad, temperatura, nutrientes, fuentes de energía que deben existir junto con la ausencia de inhibidores, que permitan obtener el máximo rendimiento de cobre.

Los factores que influyen en la respuesta de los microorganismos encargados de la biolixiviación según Pradhan et al. [2008] y el ITGE [1991] son: pH, Oxígeno y dióxido de carbono, Nutrientes.

#### **pH**

Son bacterias acidófilas, es decir crecen en medios ácidos, siendo incapaces de desarrollarse a un pH mayor de pH mayor de 3.0. El pH define que especie de bacterias se desarrollan en el medio.

#### **Oxígeno y dióxido de carbono**

Como la mayoría de las bacterias lixiviantes en la naturaleza son aeróbicas, necesitan un ambiente con oxígeno para sobrevivir. El aire aporta el oxígeno ( $O_2$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ) necesarios para la lixiviación, por lo que es importante asegurarla aireación independiente de la tecnología utilizada. El oxígeno es utilizado como oxidante por los microorganismos en ambientes de lixiviación. El dióxido de carbono es utilizado como fuente de carbono para la fabricación de su arquitectura celular o generación de biomasa.

### **Nutrientes:**

Como todos los seres vivos estos microorganismos requieren de fuentes nutricionales para su óptimo desarrollo, que pueden obtener del mismo mineral, como amonio, fosfato, azufre, iones metálicos (como  $Mg^+$ ), etc. El magnesio, es necesario para la fijación de  $CO_2$  y el fósforo es requerido para el metabolismo energético.

- **Fuente de Energía:** Los microorganismos utilizan como fuente primaria de energía el ion ferroso y el azufre inorgánico. En la lixiviación de mineral el ión ferroso ( $Fe^{+2}$ ) es producido biológicamente, por ello no es necesario añadirlo.
- **Luz:** La luz visible y la no filtrada tiene un efecto inhibitorio sobre algunas especies de bacterias, pero el hierro ofrece alguna protección a los rayos visibles.
- **Temperatura:** Los microorganismos se clasifican según el rango de temperatura en el cual pueden sobrevivir. Así las mesófitas sobreviven en un rango óptimo de 30 – 40°C, las moderadamente termófilas a una temperatura cercana a los 50°C, y las extremadamente termófilas sobre los 65°C. Si la temperatura del medio en que se encuentren los microorganismos es menor a 5°C, se vuelven inactivos volviendo a cumplir su función si aumenta la temperatura, pero si la temperatura de medio sobrepasa el óptimo, los microorganismos se mueren. Es importante considerar que la reacción de oxidación de los minerales sulfurados es exotérmica, es decir libera calor al medio lo que produce el aumento de la temperatura. La posibilidad de controlar la temperatura dependerá del diseño de la tecnología de

biolixiviación ocupada, por ejemplo sería más difícil el control en una pila que un tanque agitado.

- **Presencia de inhibidores:** durante el proceso de biolixiviación, se van acumulando metales pesados como zinc, arsénico y hierro en la solución de lixiviación, y en ciertas concentraciones resultan tóxicas para los microorganismos. Estas concentraciones tóxicas se pueden disminuir a la solución lixivante.
- **Potencial redox (Eh):** La oxidación de las especies reducidas depende del movimiento o transferencia de electrones, por lo tanto influye en el metabolismo de la bacteria. De esta manera la medida de la potencia es un indicador de la actividad microbiana, mientras mayor sea el potencial medido, mayor será la actividad microbiana. El potencial óptimo es de 600 a 800 mV (mili Volt).
- **Tamaño de partícula:** a menor tamaño de la partícula de mineral, mayor es el área de contacto que tiene el microorganismo, haciendo más efectiva la lixiviación.

### 5.2.6 Tecnologías de Biolixiviación

Las diferencias entre las tecnologías de biolixiviación dependen de lugar de aplicación, la metodología usada, la ley de cobre y el tamaño de partícula del mineral, principalmente. Una categorización amplia según Brierley (2008), es la separación de las tecnologías según el método en que se basan para hacer la lixiviación. En este como los procesos de lixiviación basados en el riego y los basados en la agitación.

### **5.2.7 Procesos basados en el riego**

Los principales son: Biolixiviación de botaderos, Biolixiviación en pilas, Biolixiviación in situ.

#### **Biolixiviación en pilas**

Esta tecnología se puede procesar materia recién extraída de la mina y mineral chancada, minerales de ley intermedia, sulfuros secundarios y primarios. La extracción de cobre desde minerales secundarios de cobre, como la calcopirita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) y la covelina ( $\text{CuS}$ ), por biolixiviación en pila es ampliamente practicada en todo el mundo.

Generalmente las pilas se construyen con material previamente chancado de 19mm o menos, que es llevado por correas transportadoras al área o patio de acopio, lugar donde se forma la pila. En el trayecto el mineral es curado, irrigado con una solución de ácido sulfúrico concentrado o puede ser previamente aglomerado en tambores rotativos con agua acidificada para acondicionar el mineral a los microorganismos y también para fijar las partículas finas a las partículas más grandes de mineral.

Luego el mineral es apilado en las áreas o canchas de acopio que están especialmente diseñadas. Los patios son revestidos con polietileno de alta densidad (HDPE) y se instala sistema de drenaje con tuberías de plástico perforadas, que permiten capturar la solución lixiviada desde la base. También se instala una red de líneas de aire de plástico perforado median la cual el aire es forzado por ventiladores extremos a la pila, lo que se asegura la disponibilidad de aire a los microorganismos.

Una vez preparada la base, el mineral se apila ordenadamente con apiladores automatizados, formando un terraplén o pila de 6-8 m de altura. Las pilas pueden ser dinámicas si después de la lixiviación, el mineral se remueve para enviarlo al botadero y la base de la pila se reutiliza; o pilas permanentes si las nuevas pilas se cargan sobre las anteriores. El sistema de pilas permanentes permite no trasladar el material ya lixiviado a un botadero final, ya que el área de lixiviación se convierte en botadero al terminar los ciclos de riego.

Sobre la pila se instala un sistema de riego por goteo o aspersores los que riegan la pila con una solución de ácido sulfúrico, agua y microorganismos. Los microorganismos crecen naturalmente en la pila pero a objeto de mejorar el rendimiento de la operación, es que en una etapa previa de laboratorio se aíslan los microorganismos más adecuadas a las condiciones existentes en la pila se hacen crecer para luego introducirlos en el mineral o inocula, sembrándolos mediante aspersores.

La solución acida que se infiltra a través de la pila va disolviendo el cobre contenido en los minerales sulfurados, formando una solución de sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ) que es recogida por el sistema de drenaje y llevada fuera del sector de las pilas en canaletas impermeabilizadas hasta la planta de extracción por solvente. Aquí se recupera el cobre de la solución para luego formar los cátodos en la etapa de electroobtención, y el acudo es refinado y recirculado para el riego de las pilas.

Se estima que para lograr un máximo de recuperación de cobre de 80 - 90% se requieren de 250 - 350 días de biolixiviación. Las principales ventajas de la biolixiviación en la pila son el bajo capital y costos de operación, la ausencia de emisoras tóxicas y la minimización o la completa eliminación de cualquier descarga de agua porque se reciclan todas las soluciones.

### **Biolixiviación de botaderos**

Con esta tecnología se procesa lastes (minerales de baja ley de cobre, menor a 0.5%), mineral recién extraídos de la mina, sulfuros secundarios y primarios. Como el contenido de cobre en estos minerales es tan mínimo como para cubrir los costos de la flotación y fundición, los grandes fragmentos de mineral son arrojados a los botaderos. Estos tienen una base impermeable desde la que puede capturar los lixiviados.

En la superficie del botadero se aplica a solución de ácido sulfúrico y agua. Los microorganismos crecen naturalmente dado que se dan las condiciones óptimas para su crecimiento.

En la superficie del botadero se aplica la solución de ácido sulfúrico y agua. Los microorganismos crecen naturalmente dado que se dan las condiciones óptimas para su crecimiento.

Debido al gran tamaño de las partículas de mineral, el área de contacto entre microorganismo - mineral disminuye, y sumado a una baja aireación, pues no se instalan líneas de aire, la acción microbiana disminuye afectando la eficiencia del proceso. Es por ello que la biolixiviación de cobre en los botaderos se mide en

décadas, debido a la baja tecnología aquí aplicada. Sin embargo, por esto último es un método muy económico.

Los minerales son lixiviados donde fueron colocados para su eliminación, y desde la base la solución de lixiviación es dirigida a los procesos de extracción con solvente y electroobtención para la posterior producción de cátodos de cobre. Al igual que la Biolixiviación en pilas, el ácido también es refinado y recirculado a la parte superior del botadero.

#### **Biolixiviación in situ**

La Biolixiviación in situ, trata el mineral en la mina, previa fractura de estas por tronadura permitiendo a la solución libremente.

Este método se aplica a minas abandonadas y minas subterráneas, donde los depósitos de mineral no pueden ser extraídos por los métodos convencionales, por ser minerales de baja ley o de pequeños depósitos o ambos, siendo no rentable su extracción.

Por las implicancias ambientales que conlleva la utilización de soluciones ácidas en un área de suelo no impermeabilizada, es que su aplicación es mínima.

#### **5.2.8 Procesos basados en la agitación**

El principal es la Biolixiviación en tanques agitados.

##### **Biolixiviación en tanques agitados**

Se utiliza para minerales de ley intermedia a alta y concentrados de mineral, que generalmente es calcopirita, debido al capital y costos de operación asociados con esta tecnología.

Los minerales son depositados en un tanque de acero inoxidable de gran tamaño equipado con agitadores mecanizados y con la introducción de aire por

ventiladores, lo que asegura la disponibilidad de oxígeno y dióxido de carbono para los microorganismos.

Es necesario inocular estos reactores con los microorganismos, para lograr la biolixiviación que opera en un proceso continuo.

### **5.2.9 Ventajas y desventajas de su aplicación**

El uso de estas especies de bacterias a nivel industrial está asociado directamente a su capacidad de crecimiento en medio ácido (carácter acidófilo), a los escasos requerimientos de nutrientes e infraestructura necesarios, debido a que no requieren fuentes orgánicas de energía ni mantenimiento de temperaturas elevadas. Otras ventajas de la tecnología microbiana sobre los métodos convencionales son:

- Requiere poca inversión capital ya que las bacterias pueden ser aisladas a partir de aguas acididad de minas.
- Presenta bajos costos en las operaciones bio-hidrometalúrgicas, en comparación con los procesos convencionales.
- No se emiten gases ni polvo, lo que produce un impacto ambiental varias veces inferior a la tecnología clásica de piro metalurgia, que genera emisiones con altos contenidos de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y arsénico (As), por el tratamiento de sulfuros en fundiciones.
- Permite ahorrar en tecnologías de abatimiento, como sistemas o chimeneas de alto costo, al bajar los índices de azufre y arsénico asociados a hornos de fundición.
- Permite el tratamiento de los recursos y reservas crecientes de minerales con baja ley de cobre que no

pueden ser económicamente procesadas por los métodos tradicionales.

- Se puede tratar concentrados que contengan altos niveles de metales con efectos negativos para la fundición de cobre como zinc.
- La acción de las bacterias permite lixiviar los minerales sulfurados a temperatura y presión ambiente en la presencia de oxígeno, obtenido del aire.
- Durante el proceso genera parte del ácido y el calor requeridos en la lixiviación.
- El ácido genera como producto de las reacciones de oxidación y el calor se libera por la oxidación de la pirita, a veces presente en la matriz de mineral, lo que aumenta cerca de 7°C la temperatura en el medio.
- Los microorganismos crecen y se reproducen sin la necesidad de adicionar una fuente de carbono, pues la obtiene del dióxido de carbono del aire.

Entre las desventajas propias de la tecnología aplicada son los impactos ambientales que esto genera reflejada en la alta producción de ácido por parte de las bacterias (en particular contaminando fuentes de aguas subterráneas. Este hecho junto con la búsqueda por hacer más eficientes los procesos de biolixiviación, ha impulsado la búsqueda de soluciones a nivel genético de la bacteria.

A bajas temperaturas la acción de las bacterias disminuye y con ello la recuperación de cobre. Sería necesario invertir en un sistema que pueda aumentar la

temperatura en la matriz de mineral, para garantizar recuperaciones mayores de cobre.

Los tiempos para una recuperación significativa de cobre, son más largos para metodologías menos controladas, como la biolixiviación en botaderos.

Es importante controlar variables como la temperatura, aireación, pH, tamaño de las partículas, para asegurar difícil en metodologías de mayor envergadura como los botaderos y las pilas.

#### 5.2.10 Mecanismo de Biolixiviación bacteriana

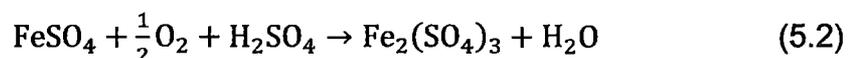
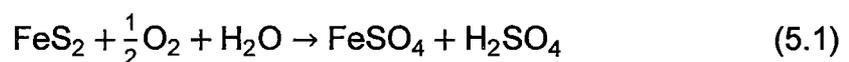
Los principales son la lixiviación directa e indirecta:

##### Lixiviación indirecta:

Este tipo de lixiviación se realiza con  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  en ausencia de oxígeno o de bacterias, es responsable de la disolución o lixiviación de varios minerales sulfurados de importancia económica.

Dentro de este mecanismo, son importantes las siguientes reacciones:

Pirita



Calcopirita



Calcocita



El mecanismo de lixiviación indirecta depende de la regeneración biológica del sulfato férrico (reacción 2), El azufre ( $S^0$ ) generado en las reacciones 3 y 4 puede ser convertido en ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) por *T. ferrooxidans* según:



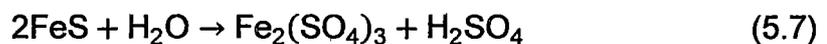
Este ácido sulfúrico mantiene el pH del sistema a niveles favorables para el desarrollo de la bacteria.

### **Lixiviación directa**

Las bacterias ferrooxidantes también pueden lixiviar sulfuros metálicos directamente, sin la participación del sulfato férrico producido biológicamente. El proceso se describe en la siguiente reacción, donde M representa un metal bivalente.



Bacteria:



Bacteria :



Dado que el hierro siempre está presente en ambientes de lixiviación natural, es posible que tanto la lixiviación indirecta como la directa ocurran de manera simultánea.

**Tabla Nº 20.** Condiciones óptimas de bacterias asociadas a la lixiviación de minerales.

<b>Microorganismos</b>	<b>Fuentes energéticas</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
Thiobacillus ferroxidans	Fe <sup>+2</sup> , U <sup>+4</sup> , S <sup>0</sup>	1.5	25 – 35
Thiobacillus thiooxidans	S <sup>0</sup>	2.0	25 – 35
Leptospirillum ferroxidans	Fe <sup>+2</sup>	1.5	25 – 35
Sulfolobus	S <sup>0</sup> , Fe <sup>+2</sup> , C orgánico	2.0	> a 60
Acidiphilium cryotum	C orgánico	2.0	25 – 35
Th. Intermedius	S <sup>0</sup> , S <sup>-2</sup> , C orgánico	2.5	30
Th. Napolitanas	S <sup>0</sup> , S <sup>-2</sup>	2.8	30
Th. Acidophilus	S <sup>0</sup> , S <sup>-2</sup>	3.0	-
Th. Thioparus	S <sup>0</sup> , S <sup>-2</sup>	3.5	-
Thiobacillus TH2 y TH3	Fe <sup>+2</sup> , S <sup>-2</sup>	6.0	50
Metallogenium sp.	Fe <sup>+2</sup>	4.5	-
Heterótrofos	C orgánicos		25 – 40

Fuente: CODELCO

## **CAPITULO VI**

### **PRUEBAS EXPERIMENTALES**

En las siguientes pruebas se describe el efecto del ácido sulfúrico en la lixiviación de minerales, así como las diversas mineralogías del forma de cobre y su efecto en la recuperación del mismo.

Para este tipo de pruebas se trabajó con un mineral representativo que poseía las siguientes características:

Se analizaron 5 muestras (con las siguientes granulometrías, + 65 de malla, malla + 100, +200 mallas,+ 325 y -325 de malla, para el Análisis de Liberación Mineral (MLA), se identificaron los minerales de cobre , el tamaño, la asociación mineral, y la liberación se determinó también .

#### **Tratamiento de muestras**

Las muestras se secaron inicialmente durante la noche a 100°C para la eliminación de aguas residuales. A continuación, se montaron las muestras, pulidas y recubiertas de carbono para el análisis de MLA. Tras el análisis, se identificaron los minerales junto con los minerales de cobre que contiene. A partir de los datos, el cobre que contiene los minerales fueron evaluados por la liberación y la asociación mineral.

Para la identificación de minerales, se utiliza el siguiente esquema de color (figura 5) para determinar los minerales en general. A partir de los datos se pudo identificar las principales formas de cobre ( Cuprita y Crisocola).

**Muestra malla +65**

Para las muestras de malla +65, se realizó el análisis de liberación mineral (MLA). Según los resultados, la muestra contiene 91.19% de silicatos en su mayoría de tres fases, cuarzo, plagioclasa y Albita. Otras fases de silicato incluyen feldespato potásico, epidota, biotita, clorita y titanita. Sulfuros miden 0,15% con pirita como el principal contribuyente. Óxidos miden 3,65% con óxidos de hierro como la fase principal. Sulfatos, en forma de jarosita, miden 0,04%, mientras que los carbonatos, como la dolomita, miden 4,97%. Dos fases de cobre que contiene, crisocola al 0,65% y al 0,64% cuprita. También fueron identificados. Los resultados se muestran en la Tabla Nº 20.

**Muestra malla +100**

Para las muestras de malla +100, se realizó el análisis de liberación mineral (MLA). Según los datos, la muestra contiene 86.30% de silicatos en su mayoría de tres fases, cuarzo, plagioclasa, y Albita. Otras fases de silicato incluyen feldespato potásico, epidota, biotita, clorita, titanita y enstatita. Sulfuros miden 0,19% con pirita como el principal contribuyente. Óxidos miden 6,39% con óxidos de hierro como la fase principal. Sulfatos, en forma de jarosita, miden 0,19%, mientras que los carbonatos, como la dolomita, miden 6,93%. Dos fases de cobre que contiene, crisocola al 0,65% y al 0,64 % cuprita, también fueron identificadas. Los resultados se muestran en la Tabla Nº 22.

A partir de datos de MLA, el cobre seleccionado contiene partículas que fueron evaluados por la liberación y la asociación mineral. Según los datos, la mayor parte de las partículas de crisocola (figura 6) parecen ser liberados en aproximadamente 250 micras de tamaño. Para cuprita (figura 7), las partículas parecen estar encapsulado con albita, cuarzo y crisocola.

■	Pyrite
■	Chalcopyrite
□	Biotite
□	Magnetite
□	Quartz
■	Microcline
■	Chalcocite
■	Epidote
■	Arsenopyrite
■	Tetrahedrite
■	Jarosite
□	Sphalerite with lof
▒	Plagioclase
□	Albite
■	Chlorite
□	Dolomite
■	Galena
■	Molybdenite
■	Titanite
■	Chrysocolla
▒	Cuprite
□	Diopside
□	Enstatite

**Figura Nº 5** Combinación de colores MLA Usado en el Proyecto

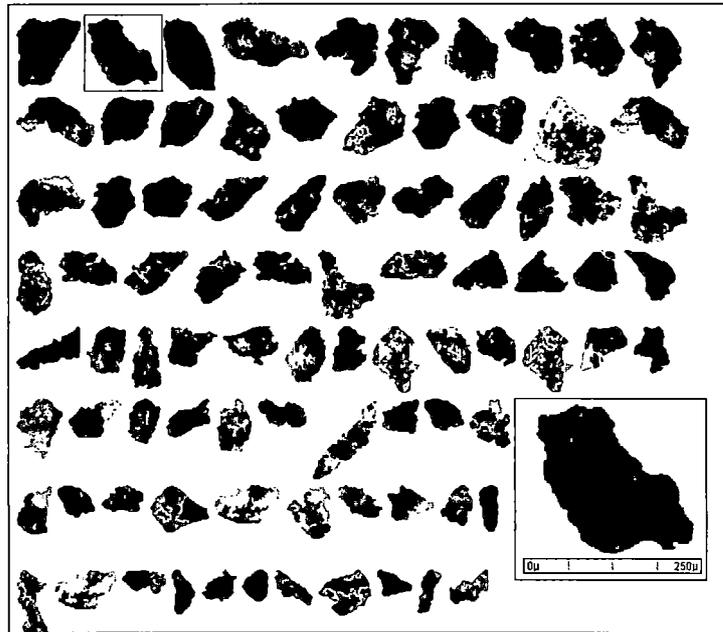
Fuente: Thompson Creek Mine

**Tabla No 21. Resultados del Análisis de Liberación de Minerales (MLA)  
para muestra malla +65**

<b>Mineral</b>	<b>Química</b>	<b>Abundancia</b>
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	44.43
Plagioclasa	(Na,Ca)AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	16.54
Albita	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	15.66
K_feldespato	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	6.23
Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	4.97
Epidota	Ca <sub>2</sub> FeAl <sub>2</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>11</sub> )O(OH)	3.04
Óxidos de hierro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> * Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	2.36
Diopside	CaMgSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	1.85
Biotita	K (Mg,Fe) <sub>3</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	1.76
Clorito	(Mg,Al,Fe) <sub>6</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	1.03
Crisocola	(Cu,Al) <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	0.65
Cuprita	Cu <sub>2</sub> O	0.64
Titanita	CaTiSiO <sub>5</sub>	0.38
Enstatita	(Mg,Fe)SiO <sub>3</sub>	0.27
Pirita	FeS <sub>2</sub>	0.12
Jarosita	K (Fe) <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	0.04
Arsenopirita	FeAsS	0.02
Molibdenita	MoS <sub>2</sub>	0.01

**Tabla No 22. Resultados del análisis de Liberación de Minerales (MLA)**  
Resultados para 100 mallas.

<b>Mineral</b>	<b>Química</b>	<b>Abundancia</b>
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	42.96
Plagioclasa	(Na,Ca)AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	13.31
Albita	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	13.31
K Feldespato	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	7.49
Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	6.93
Óxidos de Hierro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> * Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	4.15
Epidota	Ca <sub>2</sub> FeAl <sub>2</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>11</sub> )O(OH)	3.34
Clorito	(Mg,Al,Fe) <sub>6</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	2.21
Diopside	CaMgSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	1.46
Crisocola	(Cu,Al) <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	1.37
Biotita	K (Mg,Fe) <sub>3</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	1.3
Cuprita	Cu <sub>2</sub> O	0.87
Titanita	CaTiSiO <sub>5</sub>	0.5
Enstatita	(Mg,Fe)SiO <sub>3</sub>	0.42
Jarosita	K (Fe) <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	0.19
Pirita	FeS <sub>2</sub>	0.08
Arsenopirita	FeAsS	0.08
Molibdenita	MoS <sub>2</sub>	0.03



**Figura № 6.** Crisocola partícula de muestra malla +100.

Fuente: Thompson Creek Mine



**Figura № 7** Cuprita Partículas de muestra malla +100.

Fuente: Thompson Creek Mine

### **Muestra malla +200**

Para las muestras de malla 200, se realizó el análisis de liberación mineral (MLA). Según los datos, la muestra contiene 86.67 % de silicatos en su mayoría de tres fases, cuarzo, plagioclasa, y Albita. Otras fases de silicato incluyen feldespato potásico, epidota, biotita, clorita, titanita y enstantite. Sulfuros miden 0,40 % con pirita como el principal contribuyente. Óxidos miden 5,93 % con óxidos de hierro como la fase principal. Sulfatos, en forma de jarosita, miden 0,28 %, mientras que los carbonatos, como la dolomita, miden 6,72%. Dos fases de cobre que contiene, crisocola al 1,06 % y al 0,43 % cuprita, también fueron identificadas. Los resultados se muestran en la Tabla № 23.

A partir de datos de MLA, el cobre seleccionado contiene partículas que fueron evaluados por la liberación y la asociación mineral. Según los datos, las partículas crisocola (figura 8) parecen ser liberados en aproximadamente 200 micras de tamaño. Para cuprita (figura 9), algunas partículas parecen ser liberado y algunas de las partículas parecen estar encapsulado con albita y cuarzo.

### **Muestra malla +325**

Para las muestras de malla 325, se realizó el análisis de liberación mineral (MLA). De acuerdo con los datos, la muestra contiene 83,78 % silicatos en su mayoría tres fases, cuarzo, feldespato potásico, y albita. Otras fases de silicato incluyen plagioclasa, epidota, biotita, clorita, titanita y enstantite. Sulfuros miden 0,35 % con pirita como el principal contribuyente. Óxidos midieron 6,26 % con óxidos de hierro como la fase principal. Sulfatos, en forma de jarosita, miden 0,15 %, mientras que los carbonatos, como la dolomita, miden 9,33%. Dos fases de cobre que contiene, crisocola al 0,98 % y al 0,72 % cuprita, también fueron identificadas. Los resultados se muestran en la Tabla № 24.

A partir de datos de MLA, el cobre seleccionado contiene partículas que fueron evaluados por la liberación y la asociación mineral. Según los datos, las partículas crisocola (figura 10) aparecen para ser liberado en aproximadamente 100 micras de tamaño. Para cuprita (figura 11), la mayoría de las partículas de Cuprita parecen estar liberado en aproximadamente 75 micras con encapsulación menor con crisocola.

### **Muestra malla -325**

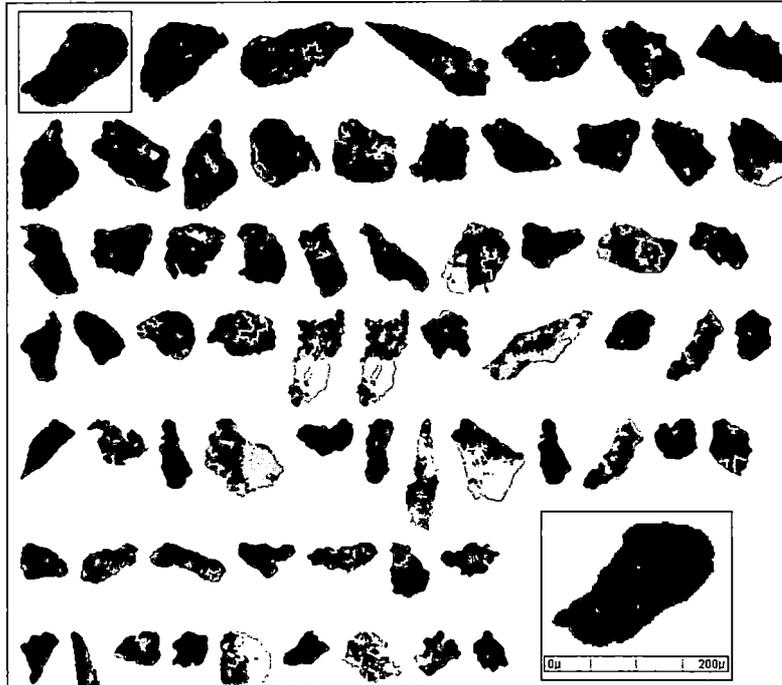
Para las muestras de malla -325, se realizó el análisis de liberación mineral (MLA). Según los datos, la muestra contiene 89.49 % de silicatos en su mayoría de tres fases, cuarzo, plagioclasa, y Albita. Otras fases de silicato incluyen epidota, biotita, clorita, titanita y enstantite. Sulfuros miden 0,32 % con pirita como el principal contribuyente. Óxidos midieron 6,26 % con óxidos de hierro como la fase principal. Sulfatos, en forma de jarosita, miden 0,11 %, mientras que los carbonatos, como la dolomita, miden 3,82%. Dos fases de cobre que contiene, crisocola al 2,69% y al 0,23% cuprita, también fueron identificadas. Los resultados se muestran en la Tabla № 25.

### **Liberación**

A partir de resultados del Análisis de Liberación de Minerales (MLA), los principales minerales de cobre: cuprita tuvieron una máxima liberación para el tamaño de malla de + 325. Para cuprita, las partículas fueron liberadas el 55% mientras que la crisocola fue del 65% liberado. Los resultados se muestran en la figura 12.

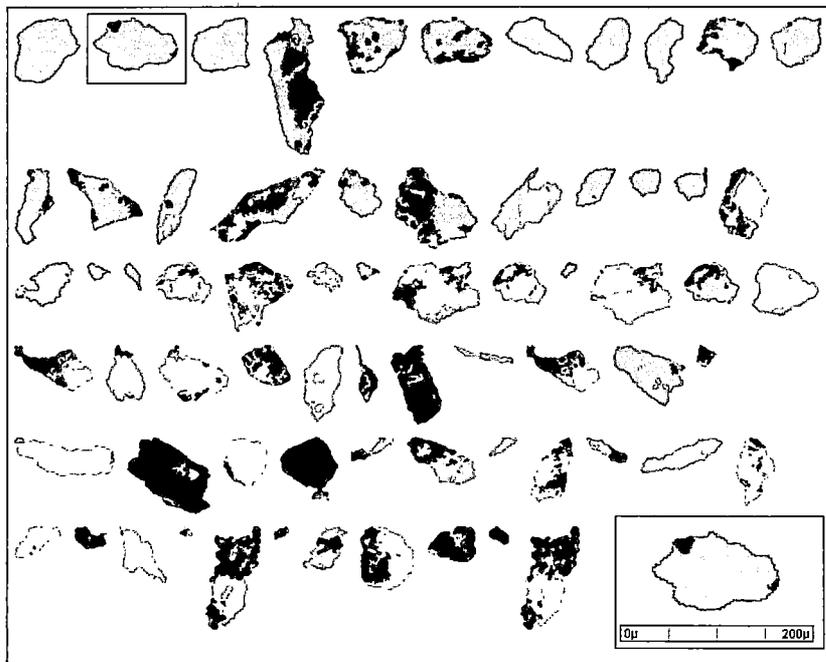
**Tabla No 23.** Análisis de Liberación de Minerales (MLA) - Resultados para muestra malla +200.

<b>Mineral</b>	<b>Química</b>	<b>Abundancia</b>
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	44.8
Albita	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	13.77
Plagioclasa	(Na,Ca)AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	11.09
K_feldespato	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	8.78
Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	6.72
Óxidos de hierro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> * Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	4.15
Epidota	Ca <sub>2</sub> FeAl <sub>2</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>11</sub> )O(OH)	2.66
Clorita	(Mg,Al,Fe) <sub>6</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	1.95
Diopside	CaMgSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	1.51
Biotita	K (Mg,Fe) <sub>3</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	1.32
Crisocola	(Cu,Al) <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	1.06
Cuprita	Cu <sub>2</sub> O	0.72
Titanita	CaTiSiO <sub>5</sub>	0.43
Enstantite	(Mg,Fe)SiO <sub>3</sub>	0.36
Jarosita	K (Fe) <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	0.28
Pirita	FeS <sub>2</sub>	0.17
Arseno pirita	FeAsS	0.19
Molibdenita	MoS <sub>2</sub>	0.04



**Figura № 8.** Crisocola partículas de +200 mallas de muestra

Fuente: Thompson Creek Mine

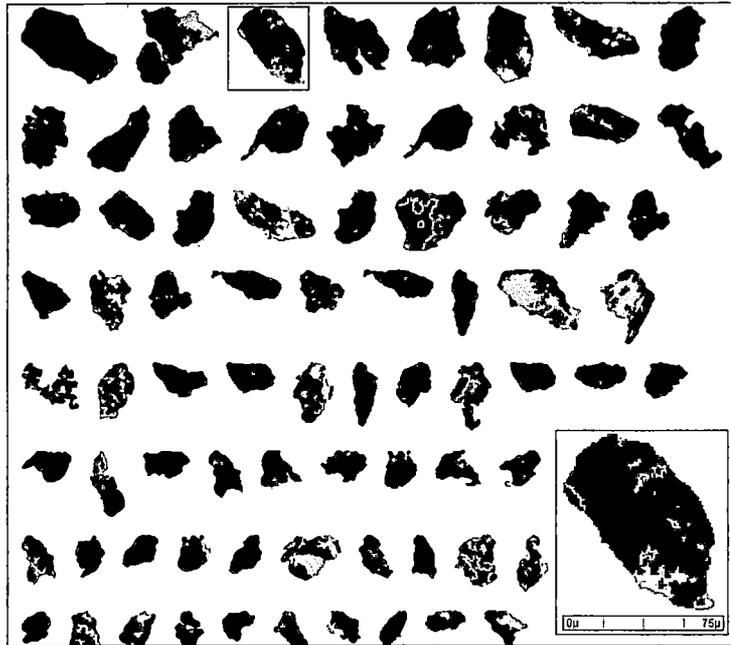


**Figura № 9.** Cuprita Partículas de 200 mallas Muestra.

Fuente: Thompson Creek Mine

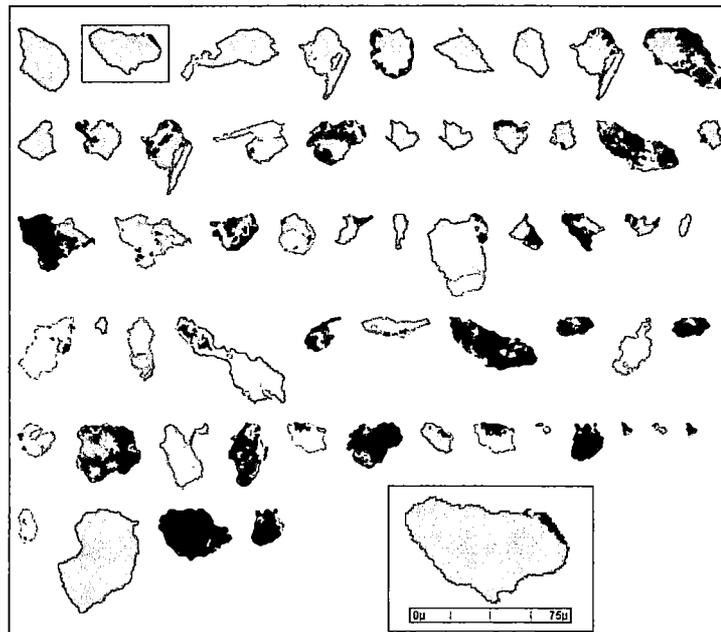
**Tabla No 24.** Análisis de Liberación de Minerales (MLA) - Resultados para 325 mallas

<b>Mineral</b>	<b>Química</b>	<b>Abundancia</b>
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	41.91
Albita	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	13.3
K_feldespato	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	10.72
Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	9.33
Plagiocasa	(Na,Ca)AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	9.15
Oxidos de Hierro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> * Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	4.69
Epidota	Ca <sub>2</sub> FeAl <sub>2</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>11</sub> )O(OH)	3.16
Clorito	(Mg,Al,Fe) <sub>6</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	1.86
Biotita	K (Mg,Fe) <sub>3</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	1.66
Diopside	CaMgSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	1.12
Crisocola	(Cu,Al) <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	0.98
Cuprita	Cu <sub>2</sub> O	0.72
Titanita	CaTiSiO <sub>5</sub>	0.52
Enstantite	(Mg,Fe)SiO <sub>3</sub>	0.38
Pirita	FeS <sub>2</sub>	0.2
Jaosita	K (Fe) <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	0.15
Arseno pirita	FeAsS	0.14
Molibdenita	MoS <sub>2</sub>	0.01



**Figura № 10. Crisocola Partículas de 100 mallas Muestra**

Fuente: Thompson Creek Mine

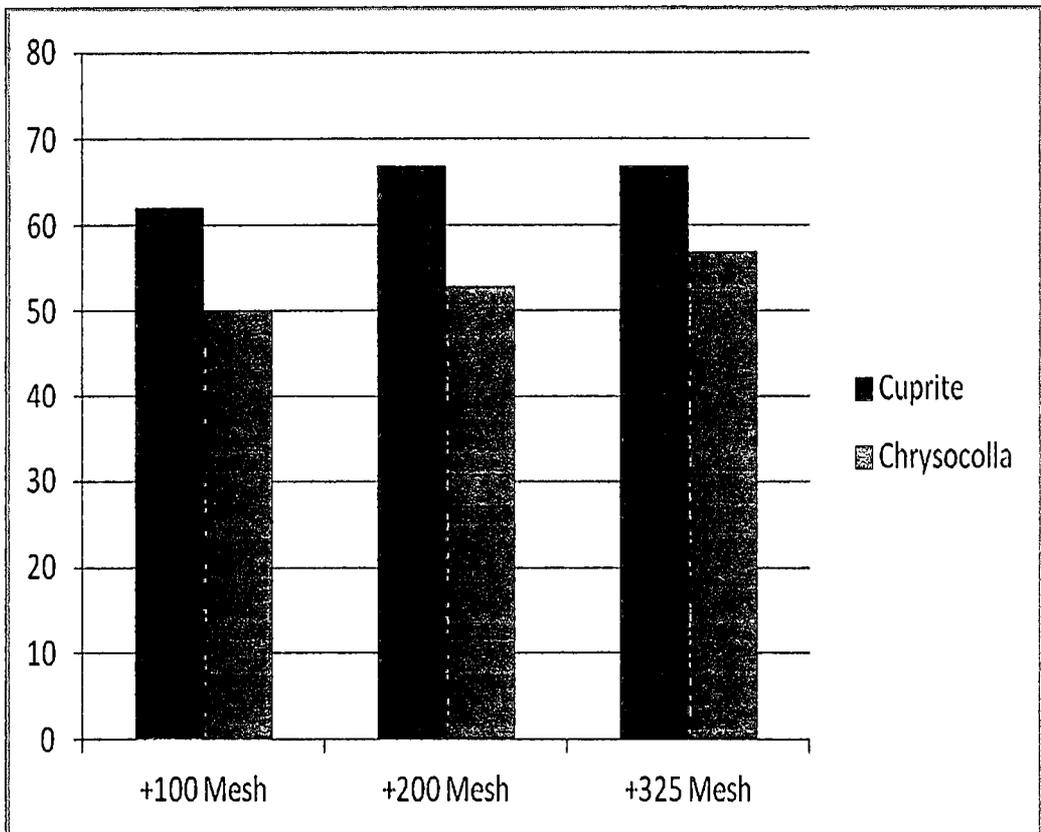


**Figura № 11. Cuprita Partículas de 100 malla Muestra**

Fuente: Thompson Creek Mine

**Tabla Nº 25. Resultados del Analisis de Liberación de Minerales (MLA)****- Resultados para -325 mallas de mineral**

<b>Mineral</b>	<b>Química</b>	<b>Abundancia</b>
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	29.23
Albita	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	21.53
Plagioclasa	(Na,Ca)AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	17.07
K_feldespato	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	7.95
Epidota	Ca <sub>2</sub> FeAl <sub>2</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>11</sub> )O(OH)	6.11
Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	3.82
Oxidos de hierro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> * Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	3.34
Diopside	CaMgSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	2.76
Crisocola	(Cu,Al) <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	2.69
Biotita	K (Mg,Fe) <sub>3</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	2.44
Clorito	(Mg,Al,Fe) <sub>6</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	1.89
Enstantite	(Mg,Fe)SiO <sub>3</sub>	0.31
Cuprita	Cu <sub>2</sub> O	0.23
Titanita	CaTiSiO <sub>5</sub>	0.2
Pirita	FeS <sub>2</sub>	0.16
Arsenopirita	FeAsS	0.13
Jarosita	K (Fe) <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	0.11
Molibdenita	MoS <sub>2</sub>	0.03



**Figura No 12.** Liberación de cobre que contienen minerales

Fuente: propia

### 6.1 PRUEBA BANCO

En este tipo de pruebas se trabajaron con muestras representativas de peso aproximado de 1 kg, en total fueron 8 pruebas de las cuales la granulometría de 4 son de 100% -10 Mallas y las 4 restantes de 80% -200 Mallas, estas pruebas se hacen con la finalidad de ver las condiciones de máxima recuperación de cobre y también para poder tener una estimación de la dosis de Ácido Sulfúrico necesaria para poder llevar a cabo estas condiciones.

## PRUEBA DE LIXIVIACIÓN EN BOTELLA 1

La prueba de botella consiste en hacer corridas experimentales con 1 kg de muestra que es llevada en un medio de lixiviación con ácido sulfúrico, luego se hacen controles de cobre cada cierto tiempo; todas estas pruebas se hacen usando como recipiente unas botellas de 6 L.

Las Tablas Nº 26, 27 y 28 detallan los resultados de esta prueba.

**Tabla Nº 26. Condiciones de Operación**

<b>Condición</b>	<b>Valor</b>
Granulometría	100 % -10 mallas
Concentración de Acido	10 gpl
Peso Inicial de la Muestra	1031 g
Peso Final de la Muestra	964 g
% de sólidos	33
Volumen de la Solución	2093 ml

**Tabla No 27. Resultados del análisis del residuo**

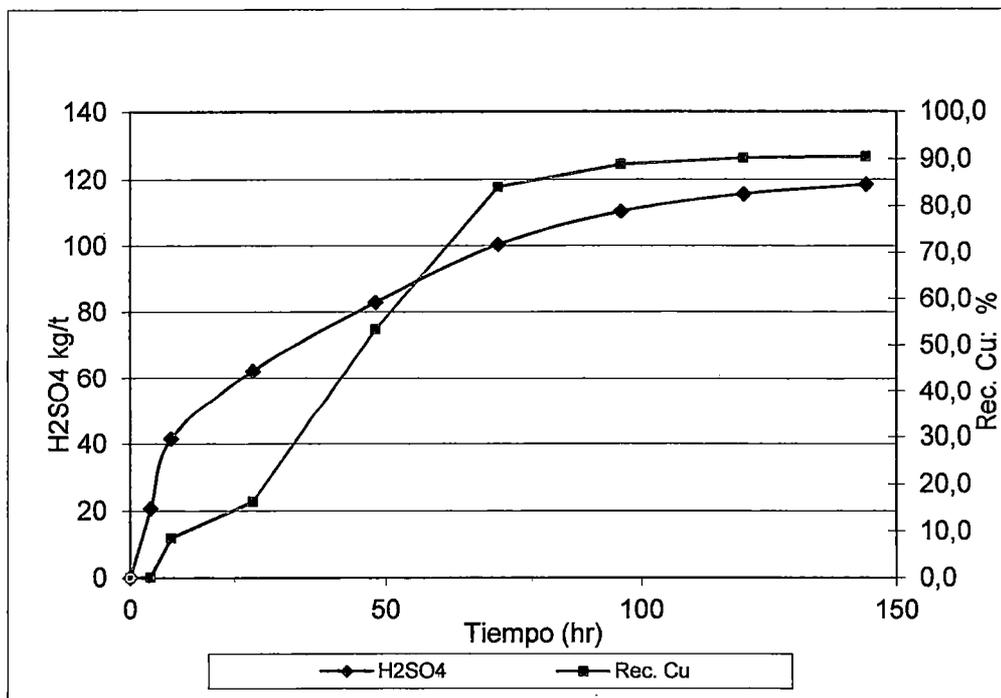
<b>Producto</b>	<b>Cu %</b>	<b>Recuperación</b>	<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	<b>GAC</b>
		<b>Cu(%)</b>	<b>kg/t</b>	<b>kg/t</b>
Residuo	0.08	90.5	118.5	108.1
Cabeza				
Calculada	0.74			
Cabeza				
Ensayada	0.78			

GAC = Consumo de Acido de la ganga

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> =Acido Total Consumido

**Tabla Nº 28. Resultados del análisis del Comportamiento del Cobre durante la prueba**

Tiempo (hrs)	pH	Acido Total Adicionado				Cu	
		g	Acumulado g	kg/t	g/l	Acumulado g	Extracción
0							
4	1.41	21.4	-	0	0.0	0.0	0.0
8	6.72	21.4	21.4	20.7	0.00	0.0	0.1
24	5.39	21.4	42.7	41.4	0.31	0.6	8.5
48	5.27	21.4	64.1	62.2	0.60	1.2	16.2
72	4.52	21.4	85.4	82.9	1.98	4.1	53.4
96	1.88	17.9	106.8	100.4	3.13	6.4	84.2
120	1.54	10.0	124.7	110.5	3.31	6.8	89.0
144	1.31	5.2	134.7	115.8	3.36	6.9	90.3
	0.97		139.9	118.5	3.37	6.9	90.5



**Figura No 13.** Consumo de Acido, Recuperación de Cobre en Función del Tiempo

Fuente: Propia

## PRUEBA DE LIXIVIACIÓN DE BOTELLA 2

Los resultados obtenidos en esta prueba son presentados en las Tablas No 29, 30 y 31.

**Tabla No 29.** Condiciones de Operación

Condición	Valor
Granulometría	100 % -10 mallas
Concentración de Acido	5 gpl
Peso Inicial de la Muestra	1031 g
Peso Final de la Muestra	979 g
% de sólidos	33 %
Volumen de la Solución	2093 ml

**Tabla Nº 30. Resultados del análisis del residuo**

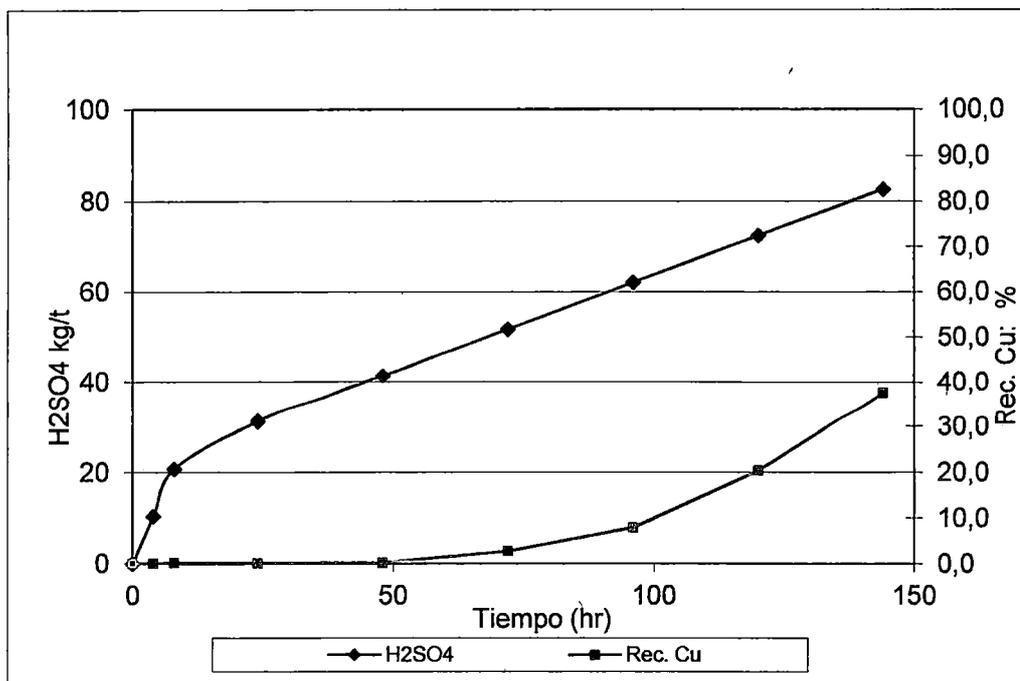
Producto	Ensayes	Recuperación	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	GAC
	Cu %	Cu %	kg/t	kg/t
Residuo	0.51	37.6	82.8	78.3
Cabeza Calculada	0.77			
Cabeza Ensayada	0.78			

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> =Acido Total Consumido

GAC = Consumo de Acido de la ganga

**Tabla Nº 31. Análisis del Comportamiento del Cobre durante la prueba**

Tiempo (hrs)	pH	Acido Total Adicionado				Cu	
		g	Acumulado g	kg/t	g/l	Acumulado	Extracción
						g	%
0	1.55	10.7	-	0	0.0	0.0	0.0
4	6.76	10.7	10.7	10.4	0.00	0.0	0.0
8	6.22	10.7	21.4	20.7	0.01	0.0	0.1
24	6.73	10.7	32.0	31.1	0.00	0.0	0.1
48	6.46	10.7	42.7	41.4	0.01	0.0	0.2
72	5.82	10.7	53.4	51.8	0.11	0.2	2.8
96	5.33	10.7	64.1	62.2	0.31	0.6	8.0
120	4.84	10.7	74.8	72.5	0.80	1.6	20.4
144	4.15		85.4	82.8	1.48	3.0	37.6



**Figura Nº 14.** Consumo de Acido, Recuperación de Cobre en Función del Tiempo

Fuente: Propia

### PRUEBA DE LIXIVIACION DE BOTELLA 3

Los resultados obtenidos en esta prueba son presentados en las Tablas Nº 32, 33 y 34.

**Tabla Nº 32.** Condiciones de Operación

Condición	Valor
Granulometría	100 % -10 mallas
Concentración de Acido	5 gpl
Concentración de Fe <sup>+3</sup>	2 gpl
Peso Inicial de la Muestra	1025 g
Peso Final de la Muestra	983 g
% de sólidos	33
Volumen de la Solución	2081 ml

**Tabla Nº 33. Resultados del análisis del residuo**

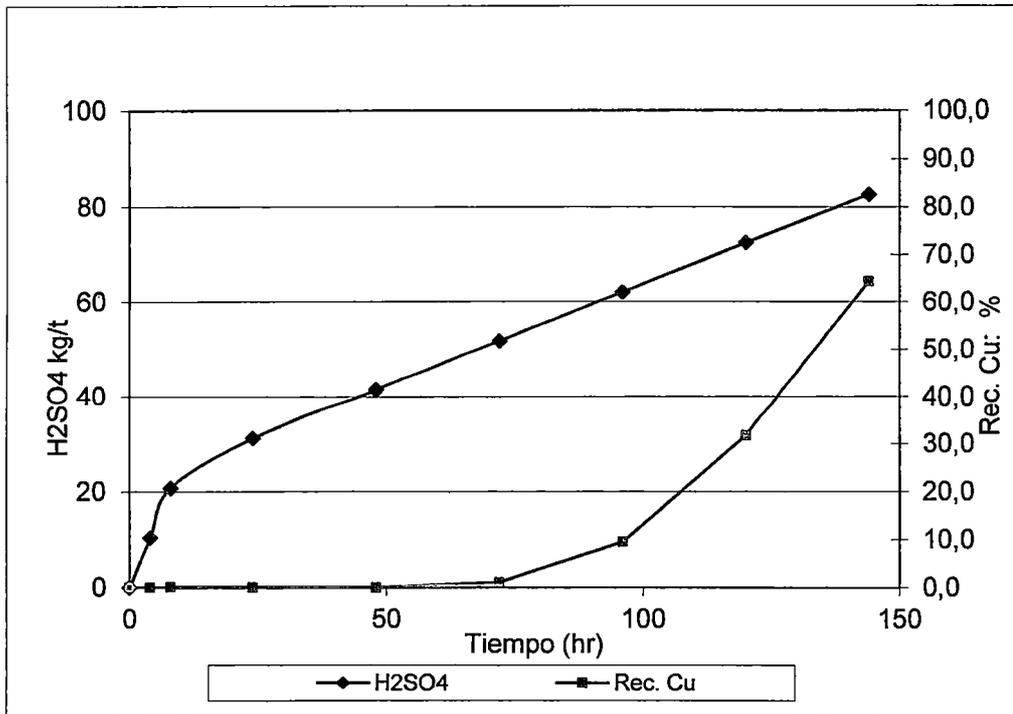
Producto	Ensayes	Recuperación	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	GAC
		Cu %	kg/t	kg/t
Residuo		64.3	82.7	75.4
	0.27			
Cabeza				
Calculada	0.73			
Cabeza				
Ensayada	0.78			

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> =Acido Total Consumido

GAC = Consumo de Acido de la ganga

**Tabla Nº 34. Resultados análisis del Comportamiento del Cobre durante la prueba**

Tiempo (hrs)	pH	Acido Total Adicionado				Cu	
		g	Acumulado g	kg/t	g/l	Extracción	
						Acumulado g	%
0	1.52	10.6	-	0	0.0	0.0	0.0
4	6.67	10.6	10.6	10.4	0.00	0.0	0.0
8	6.15	10.6	21.2	20.7	0.00	0.0	0.1
24	6.77	10.6	31.9	31.1	0.00	0.0	0.0
48	6.67	10.6	42.5	41.4	0.00	0.0	0.0
72	5.94	10.6	53.1	51.8	0.04	0.1	1.1
96	5.17	10.6	63.7	62.2	0.35	0.7	9.6
120	4.35	10.6	74.3	72.5	1.18	2.4	31.8
144	2.80		85.0	82.7	2.39	4.8	64.3



**Figura Nº 15.** Consumo de Acido, Recuperación de Cobre en Función del Tiempo

Fuente: Propia

#### PRUEBA DE LIXIVIACION DE BOTELLA 4

Los resultados obtenidos en esta prueba son presentados en las Tablas Nº 35, 36 y 37.

**Tabla Nº 35.** Condiciones de Operación

Condición	Valor
Granulometría	100 % -10 mallas
Concentración de Acido	10 gpl
Concentración de Fe <sup>+3</sup>	5 gpl
Peso Inicial de la Muestra	1025 g
Peso Final de la Muestra	941 g
% de sólidos	33
Volumen de la Solución	2081 ml

**Tabla Nº 36. Resultados del análisis del residuo**

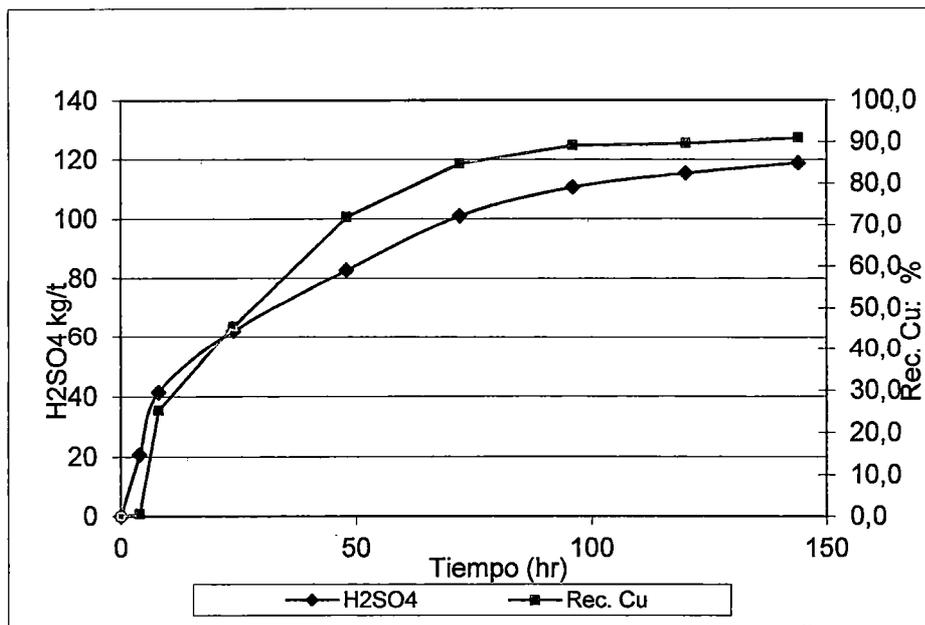
Producto	Ensayes	Recuperación	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	GAC
	Cu %	Cu %	kg/t	kg/t
Residuo		91.0	119.0	108.2
	0.07			
Cabeza				
Calculada	0.76			
Cabeza				
Ensayada	0.78			

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> =Acido Total Consumido

GAC = Consumo de Acido de la ganga

**Tabla Nº 35. Resultados del análisis del Comportamiento del Cobre durante la prueba**

Tiempo (hrs)	pH	Acido Total Adicionado				Cu	
		Acumulado		Acumulado		g	Extracción
		g	g	kg/t	g/l		
0	1.39	21.2	-	0	0.0	0.0	0.0
4	5.50	21.2	21.2	20.7	0.02	0.0	0.6
8	4.02	21.2	42.4	41.4	0.95	2.0	25.2
24	3.99	21.2	63.6	62.0	1.71	3.5	45.5
48	2.70	21.2	84.8	82.7	2.71	5.6	71.9
72	1.80	18.6	106.0	101.0	3.20	6.6	84.7
96	1.51	9.6	124.6	110.8	3.37	6.9	89.2
120	1.23	4.5	134.2	115.4	3.39	7.0	89.7
144	0.90		138.7	119.0	3.44	7.1	91.0



**Figura № 16.** Consumo de Acido, Recuperación de Cobre en Función del Tiempo

Fuente: Propia

### PRUEBA DE LIXIVIACION DE BOTELLA 5

Los resultados obtenidos en esta prueba son presentados en las Tablas № 38, 39 y 40.

**Tabla № 38.** Condiciones de Operación

Condición	Valor
Granulometría	80% -200M
Concentración de Acido	10 gpl
Peso Inicial de la Muestra	959 g
Peso Final de la Muestra	911 g
% de sólidos	33
Volumen de la Solución	1947 ml

**Tabla Nº 39. Resultados del análisis del residuo**

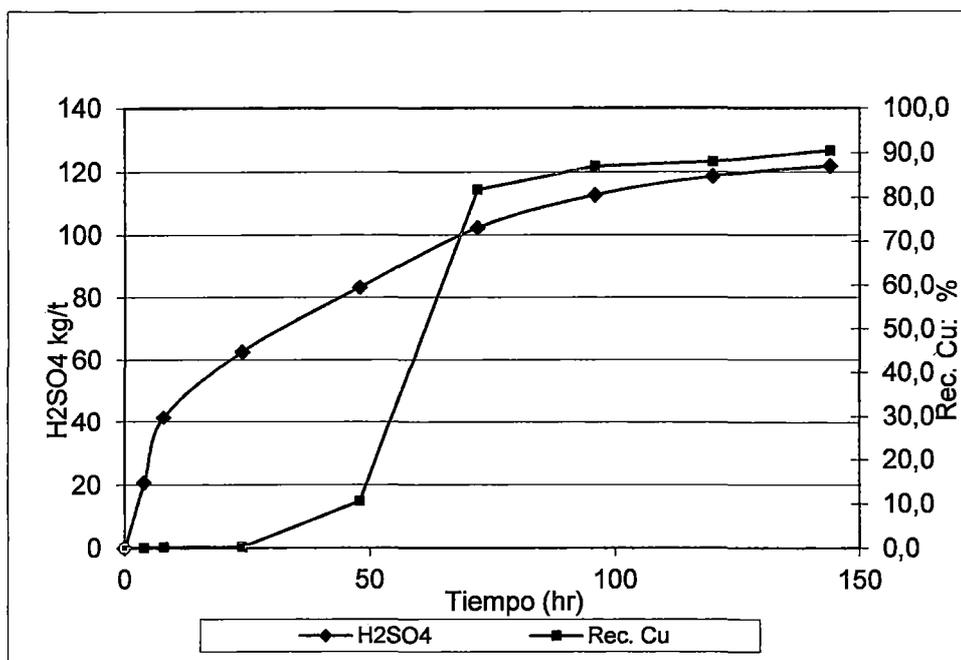
<b>Producto</b>	<b>Ensayes</b>	<b>Recuperación</b>	<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	<b>GAC</b>
	<b>Cu %</b>	<b>Cu %</b>	<b>kg/t</b>	<b>kg/t</b>
Residuo		90.6	122.0	111.0
	0.08			
Cabeza				
Calculada	0.78			
Cabeza				
Ensayada	0.78			

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> =Acido Total Consumido

GAC = Consumo de Acido de la ganga

**Tabla Nº 40. Resultados del análisis del Comportamiento del Cobre durante la prueba**

<b>Tiempo (hrs)</b>	<b>pH</b>	<b>Acido Total Adicionado</b>				<b>Cu</b>	
		<b>Acumulado</b>		<b>Acumulado</b>		<b>Extracción</b>	
		<b>g</b>	<b>g</b>	<b>kg/t</b>	<b>g/l</b>	<b>g</b>	<b>%</b>
0	1.43	19.9	-	0	0.0	0.0	0.0
4	7.23	19.9	19.9	20.7	0.00	0.0	0.1
8	6.55	20.3	39.7	41.4	0.01	0.0	0.2
24	5.98	19.9	60.0	62.6	0.01	0.0	0.2
48	5.00	19.9	79.9	83.3	0.42	0.8	10.6
72	2.10	18.2	99.8	102.4	3.22	6.1	81.8
96	1.24	9.7	118.0	112.9	3.43	6.5	87.1
120	0.99	5.4	127.6	118.8	3.47	6.6	88.1
144	1.02		133.0	122.0	3.57	6.8	90.6



**Figura Nº 17.** Consumo de Acido, Recuperación de Cobre en Función del Tiempo

Fuente: Propia

### PRUEBA DE LIXIVIACION DE BOTELLA 6

Los resultados obtenidos en esta prueba son presentados en las Tablas Nº 41, 42 y 43.

**Tabla Nº 41.** Condiciones de Operación

Condición	Valor
Granulometría	80% -200 mallas
Concentración de Acido	5 gpl
Peso Inicial de la Muestra	953 g
Peso Final de la Muestra	902 g
% de sólidos	33
Volumen de la Solución	1935 ml

**Tabla Nº 42. Resultados del análisis del residuo**

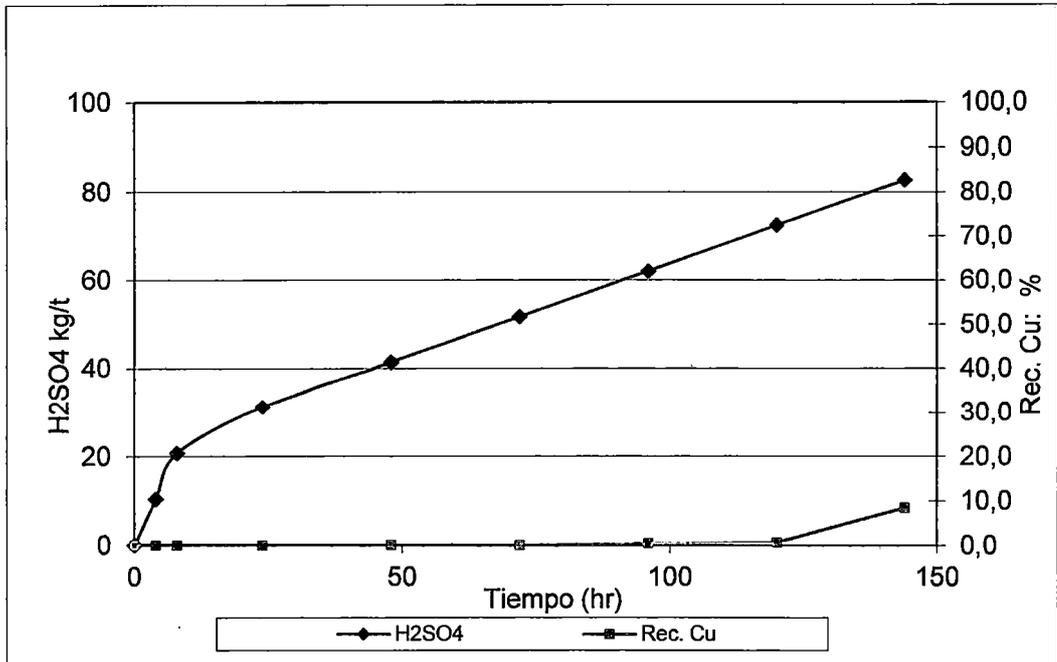
Producto	Ensayes	Recuperación	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	GAC
	Cu %	Cu %	kg/t	kg/t
Residuo		8.5	82.7	81.7
	0.76			
Cabeza				
Calculada	0.78			
Cabeza				
Ensayada	0.78			

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> =Acido Total Consumido

GAC = Consumo de Acido de la ganga

**Tabla Nº 43. Resultados del análisis del Comportamiento del Cobre durante la prueba**

Tiempo (hrs)	pH	Acido Total Adicionado				Cu	
		g	Acumulado g	kg/t	g/l	Acumulado g	Extracción %
	0	1.56	9.9	-	0	0.0	0.0
4	7.39	9.9	9.9	10.4	0.00	0.0	0.0
8	7.03	9.9	19.7	20.7	0.00	0.0	0.0
24	6.49	9.9	29.6	31.1	0.00	0.0	0.0
48	6.20	9.9	39.5	41.4	0.00	0.0	0.0
72	6.97	9.9	49.4	51.8	0.00	0.0	0.0
96	5.67	9.9	59.2	62.1	0.02	0.0	0.6
120	5.59	9.9	69.1	72.5	0.03	0.1	0.7
144	5.05		79.0	82.7	0.34	0.6	8.5



**Figura Nº 18.** Consumo de Acido, Recuperación de Cobre en Función del Tiempo

Fuente: Propia

### PRUEBA DE LIXIVIACION DE BOTELLA 7

Los resultados obtenidos en esta prueba son presentados en las Tablas Nº 44, 45 y 46.

**Tabla Nº 44.** Condiciones de Operación

Condición	Valor
Granulometría	80 % -200 mallas
Concentración de Acido	5 gpl
Concentración de Fe <sup>+3</sup>	2 gpl
Peso Inicial de la Muestra	882 g
Peso Final de la Muestra	837g
% de sólidos	33
Volumen de la Solución	1791 ml

**Tabla Nº 45. Resultados del análisis del residuo**

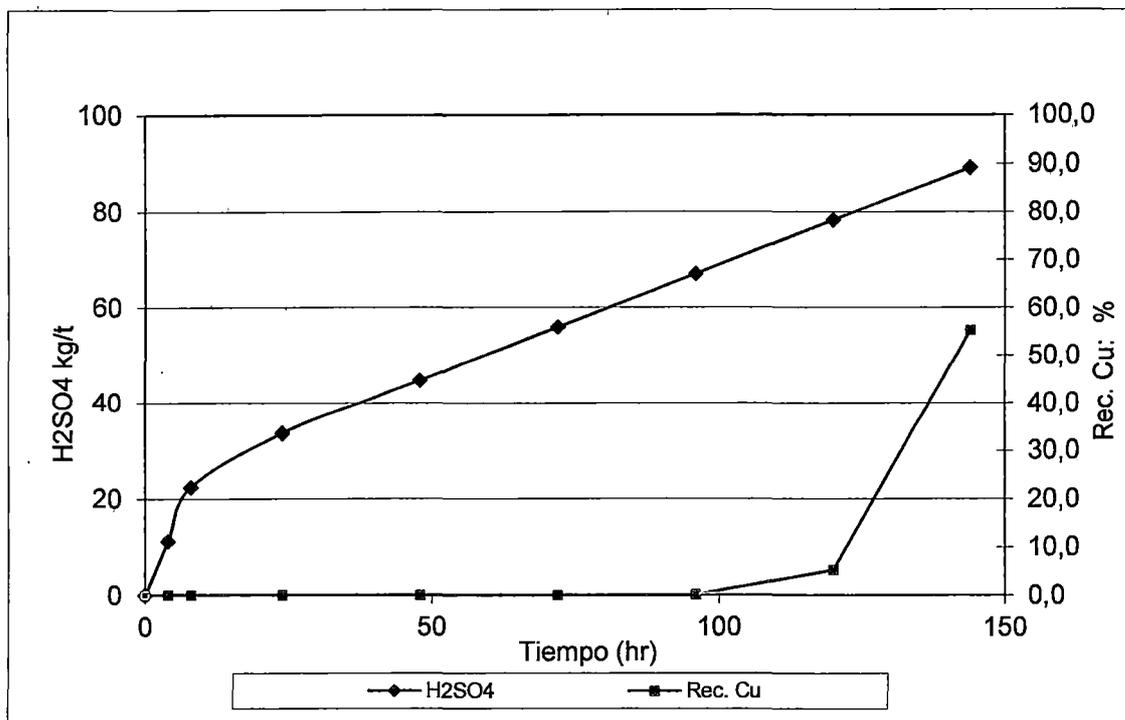
Producto	Ensayes	Recuperación	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	GAC
	Cu %	Cu %	kg/t	kg/t
Residuo		55.3	89.3	82.7
	0.36			
Cabeza				
Calculada	0.76			
Cabeza				
Ensayada	0.78			

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> =Acido Total Consumido

GAC = Consumo de Acido de la ganga

**Tabla Nº 46. Resultados del análisis del Comportamiento del Cobre durante la prueba**

Tiempo (hrs)	pH	Acido Total Adicionado				Cu	
		g	Acumulado g	kg/t	g/l	Acumulado g	Extracción %
0	1.55	9.9	-	0	0.0	0.0	0.0
4	7.39	9.9	9.9	11.2	0.00	0.0	0.0
8	7.03	9.9	19.7	22.4	0.00	0.0	0.0
24	6.49	9.9	29.6	33.6	0.00	0.0	0.0
48	6.20	9.9	39.5	44.8	0.00	0.0	0.0
72	6.97	9.9	49.4	56.0	0.00	0.0	0.0
96	5.67	9.9	59.2	67.1	0.01	0.0	0.2
120	5.59	9.9	69.1	78.3	0.21	0.4	5.3
144	5.05		79.0	89.3	2.18	3.7	55.3



**Figura No 19.** Consumo de Acido, Recuperación de Cobre en Función del Tiempo

Fuente: Propia

### PRUEBA DE LIXIVIACION DE BOTELLA 8

Los resultados obtenidos en esta prueba son presentados en las Tablas No 47, 48 y 49.

**Tabla No 47.** Condiciones de Operación

Condición	Valor
Granulometría	80 % -200 mallas
Concentración de Acido	10 gpl
Concentración de Fe <sup>+3</sup>	5 gpl
Peso Inicial de la Muestra	979 g
Peso Final de la Muestra	925 g
% de sólidos	33
Volumen de la Solución	1988 ml

**Tabla Nº 48. Resultados del análisis del residuo**

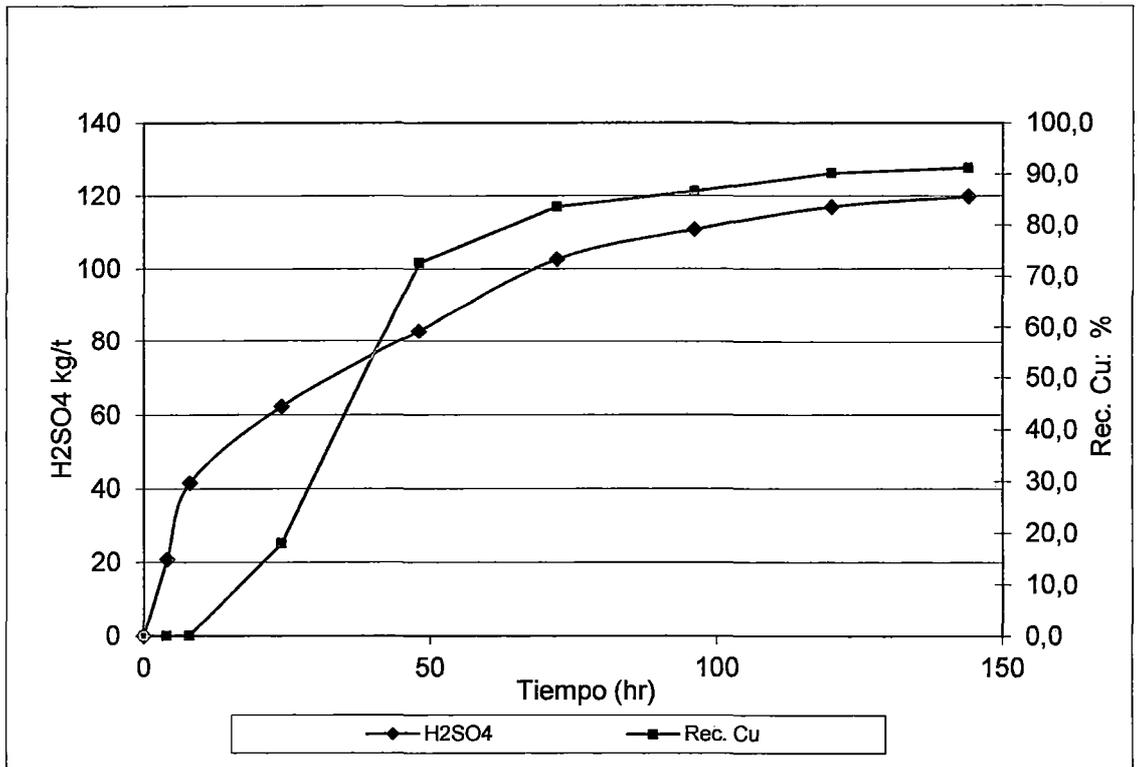
Producto	Ensayes	Recuperación	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	GAC
	Cu %	Cu %	kg/t	kg/t
Residuo		91.2	119.9	108.9
	0.07			
Cabeza				
Calculada	0.77			
Cabeza				
Ensayada	0.78			

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> =Acido Total Consumido

GAC = Consumo de Acido de la ganga

**Tabla Nº 49. Resultados del análisis del Comportamiento del Cobre durante la prueba**

Tiempo (hrs)	pH	Acido Total Adicionado				Cu	
	Final	g	Acumulado g	kg/t	g/l	Acumulado	Extracción
						g	%
0	1.45	20.3	-	0	0.0	0.0	0.0
4	7.18	20.3	20.3	20.7	0.00	0.0	0.0
8	6.34	20.3	40.6	41.5	0.00	0.0	0.1
24	4.52	20.3	60.9	62.2	0.69	1.4	17.9
48	2.20	20.3	81.2	82.9	2.81	5.5	72.6
72	1.59	19.2	101.5	102.6	3.24	6.3	83.6
96	1.16	7.5	120.7	110.9	3.36	6.6	86.6
120	0.92	5.9	128.2	117.1	3.50	6.8	90.2
144	1.01		134.1	119.9	3.54	6.9	91.2



**Figura Nº 20.** Consumo de Acido, Recuperación de Cobre en Función del Tiempo

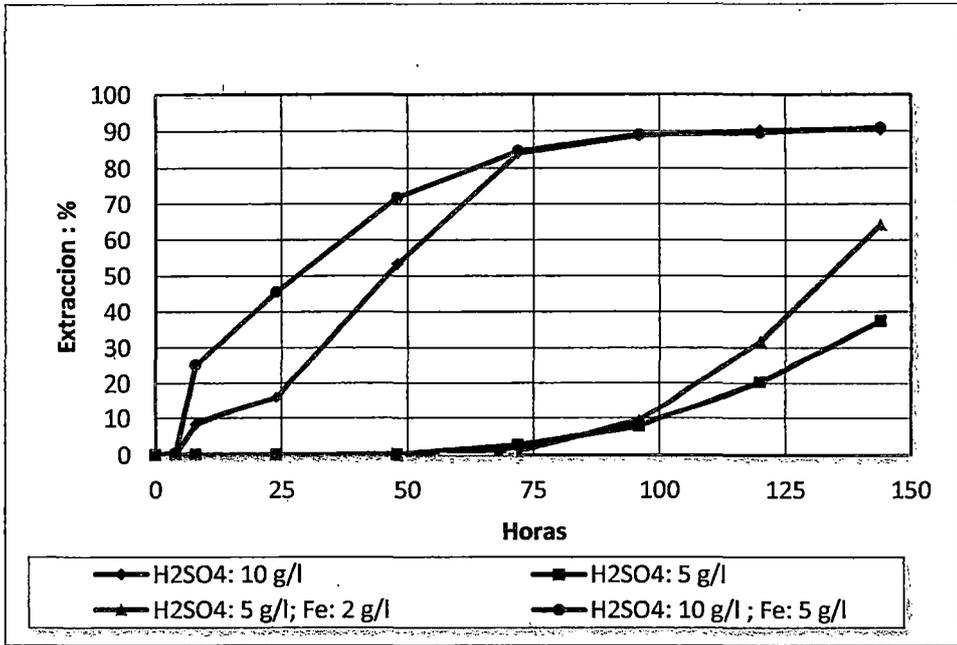
Fuente: Propia

## RESUMEN DE LA PRUEBA DE BOTELLAS

### CABEZA COMUN 100 % -10 MALLAS

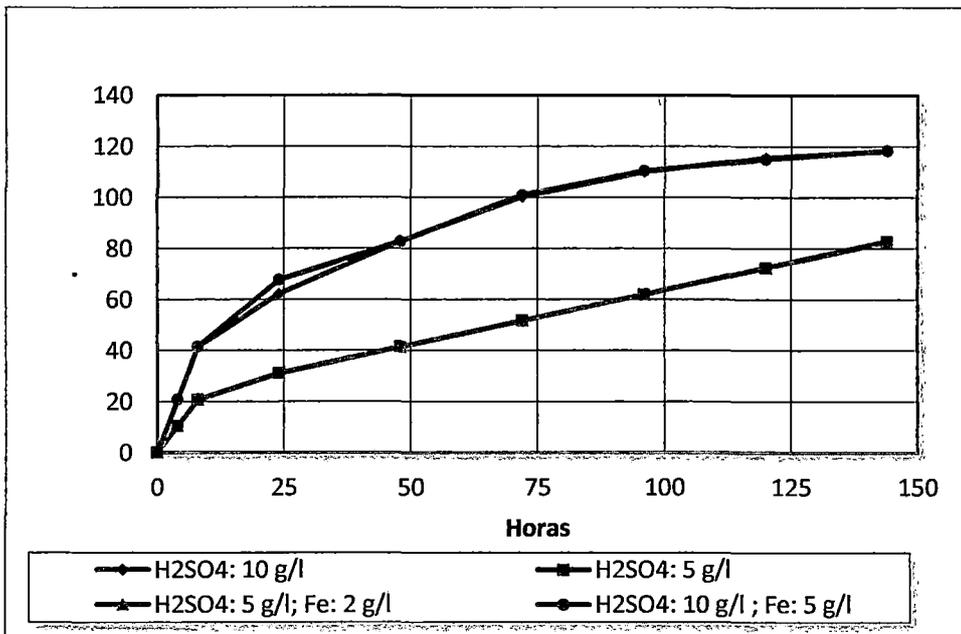
Tabla Nº 50. Resumen de la Prueba a -10 Mallas

Condiciones g/l	Cabeza	*cabeza	Residuo	Extracción	H2SO4	Tiempo
H2SO4	Fe	Ens. %	%	%	kg/t	horas
10	—	0.78	0.74	0.08	90.5	144
5	—	0.78	0.77	0.51	37.6	144
5	2	0.78	0.73	0.27	64.3	144
10	5	0.78	0.76	0.07	91.0	144



**Figura No 21. % Extracción vs Tiempo**

Fuente: Propia



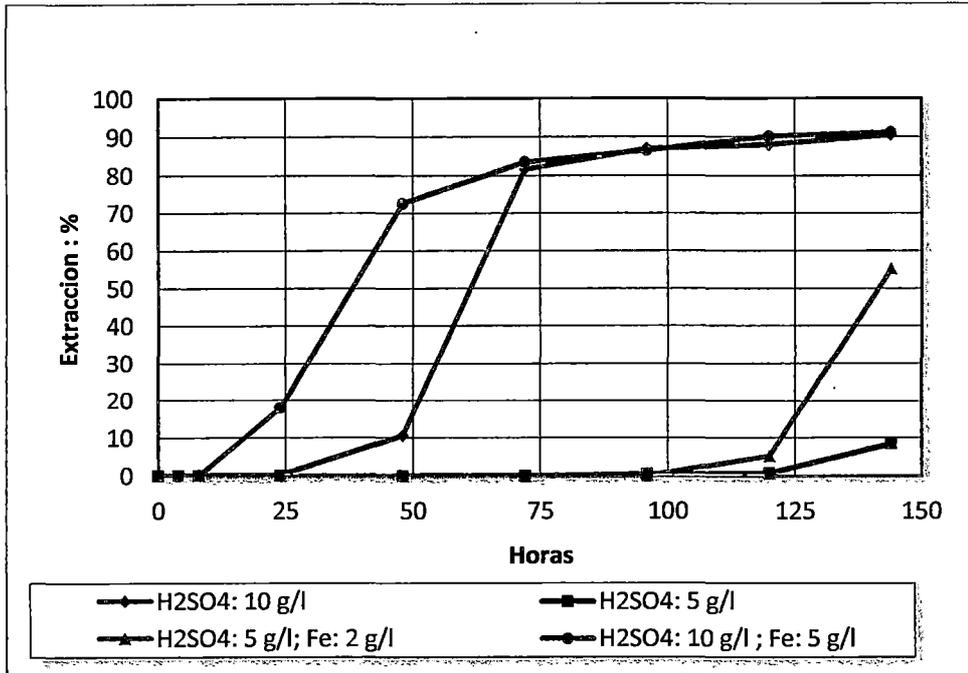
**Figura No 22. Consumo de Acido sulfúrico (kg/ton) vs Tiempo**

Fuente: Propia

**CABEZA COMUN 80 % -200 MALLAS**

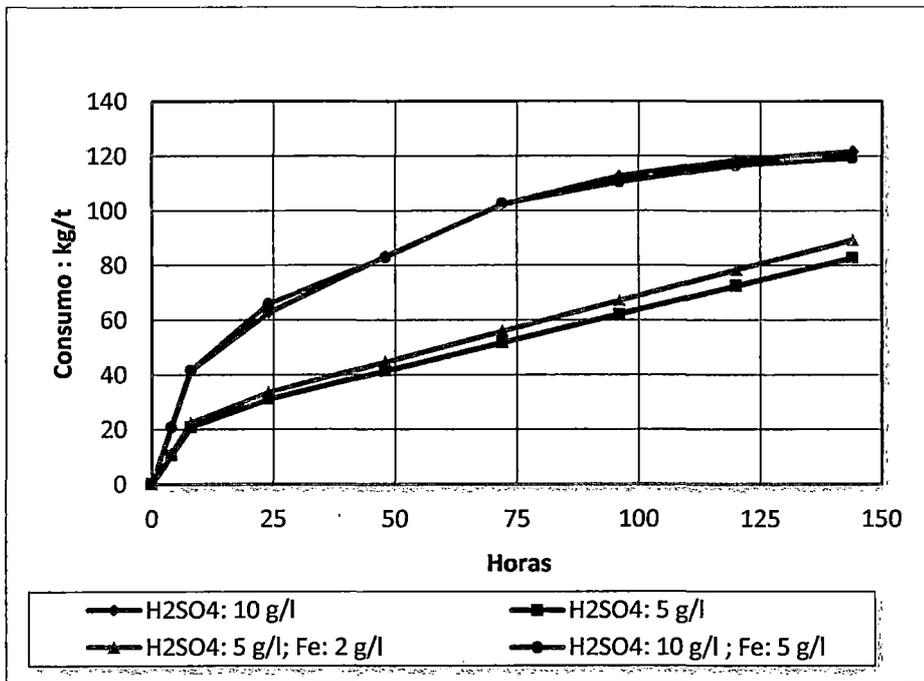
**Tabla Nº 51. Resumen de la Prueba a -200 Mallas**

Condiciones g/l		Cab. Ens. %	*cabeza %	Residuo %	Extraccion %	H2SO4 kg/t	Tiempo horas
H2SO4	Fe+++						
10	–	0.78	0.78	0.08	90.6	121.7	144
5	–	0.78	0.78	0.76	8.5	82.7	144
5	2	0.78	0.76	0.36	55.3	89.2	144
10	5	0.78	0.77	0.07	91.2	119.2	144



**Figura № 23.** % de Extracción vs tiempo

Fuente: Propia



**Figura № 24.** Consumo de Acido sulfúrico (kg/ton) vs Tiempo

Fuente: Propia

## **6.2 PRUEBA PILOTO**

Para la siguiente prueba se realizaron 3 pruebas de lixiviación en columnas, las cuales son pruebas que trabajan con muestras que pesaban mucho más de 1 kg con la finalidad de simular el comportamiento de las Pilas de lixiviación a un nivel más real.

### **6.2.1 Datos experimentales y resultados**

En las siguientes tablas se muestran los resultados de un análisis granulométrico valorado determinando el cobre presente en cada tamaño de mineral.

**Tabla Nº 52. Análisis Granulométrico Valorado de la Muestra**

Fracciones	Peso		Ensayes			
	g	%	Cu T %	Cu Sac %	Cu SCN %	Cu res %
3/4 "	6.45	26.9	0.740	0.67	0.02	0.05
1/2 "	5.10	21.3	0.739	0.65	0.02	0.05
3/8 "	3.21	13.4	0.686	0.60	0.02	0.05
1/4 "	2.43	10.1	0.801	0.70	0.02	0.06
+10M	3.48	14.5	0.832	0.74	0.02	0.06
50M	1.81	7.5	1.150	1.04	0.02	0.06
100M	0.35	1.5	1.170	1.04	0.01	0.06
200M	0.29	1.2	1.059	0.94	0.02	0.07
-200M	0.88	3.7	1.070	0.94	0.02	0.07
Cabeza			0.805	0.715	0.020	0.054
Calculada						
Cabeza	24.00	100.0	0.777	0.727	0.020	0.051
Común						
Ensayada						

## PRUEBA DE COLUMNA Nº 1

\*Todos los ensayos analizados durante los 33 días que duro la prueba se pueden apreciar en el Anexo 1

Se tiene los datos de la cabeza calculada a continuación:

**Tabla Nº 53.** Cálculos de cabeza calculada

Producto	Peso	Volumen	Ensaye Cu		Recuperación
	kg	L	%	g/L	%
PLS	---	130.92	---	1.14	74.6
Residuo	24.90	---	0.204	---	25.4
Cab. Calc.	25.00		0.801		100.0
Perdida peso	0.10				

En el análisis del mineral se tiene los siguientes resultados de los ensayos para observar el cobre secuencial al inicio y al final

**Tabla Nº 54.** Resultados de la Muestra

<b>Elementos analizados</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>A.S. Cu</b>	<b>CN.S. Cu</b>	<b>Res. Cu</b>
Ensayes de cabeza (%)	0.80	3.02	0.73	0.02	0.05
Ensayes de residuos (%)	0.20	2.92			

- A.S. Cu: Cobre soluble en Acido
- CN.S. Cu: Cobre soluble en Cianuro
- Res. Cu: Cobre residual

Las condiciones de trabajo son las siguientes:

**Tabla Nº 55.** Condiciones de Operación de la Columna 1

Tamaño columna	16 cm. de diámetro x 3 m Alto
Granulometría	100 % - 1/2 "
Solución de lixiviación	10 gpl H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Dosage curado	25.00 kg de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /tonelada de Mineral
Tiempo de curado	3 días
Días de lixiviación	28
Flujo	10 l/hr-m <sup>2</sup>

**Tabla Nº 56.** Resultados del análisis de residuos de la Columna 1

<b>Mallas</b>	<b>Peso kg</b>	<b>Peso %</b>	<b>Cu %</b>	<b>Fe %</b>
+1/2"	11.1	44.6	0.23	2.29
+1/4"	6.40	25.7	0.23	3.00
+10M	4.40	17.7	0.16	3.31
-10M	3.00	12.0	0.11	4.49
Cabeza Calculada	24.90	100.0	0.20	2.92

Resultados Obtenidos:

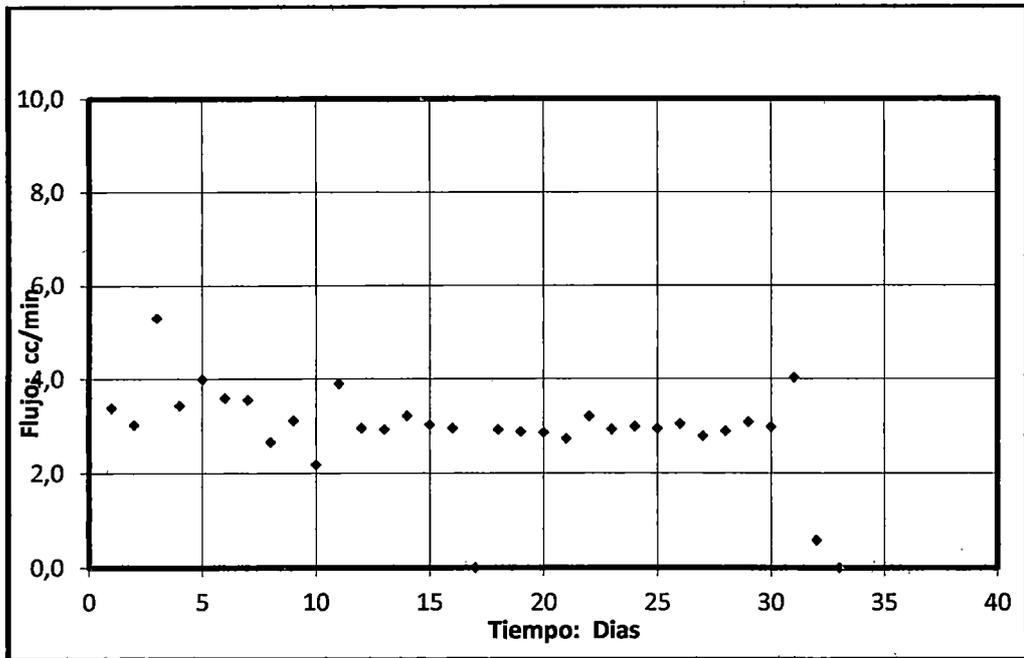


Figura № 25. Flujo de Alimentación vs el tiempo

Fuente: Propia

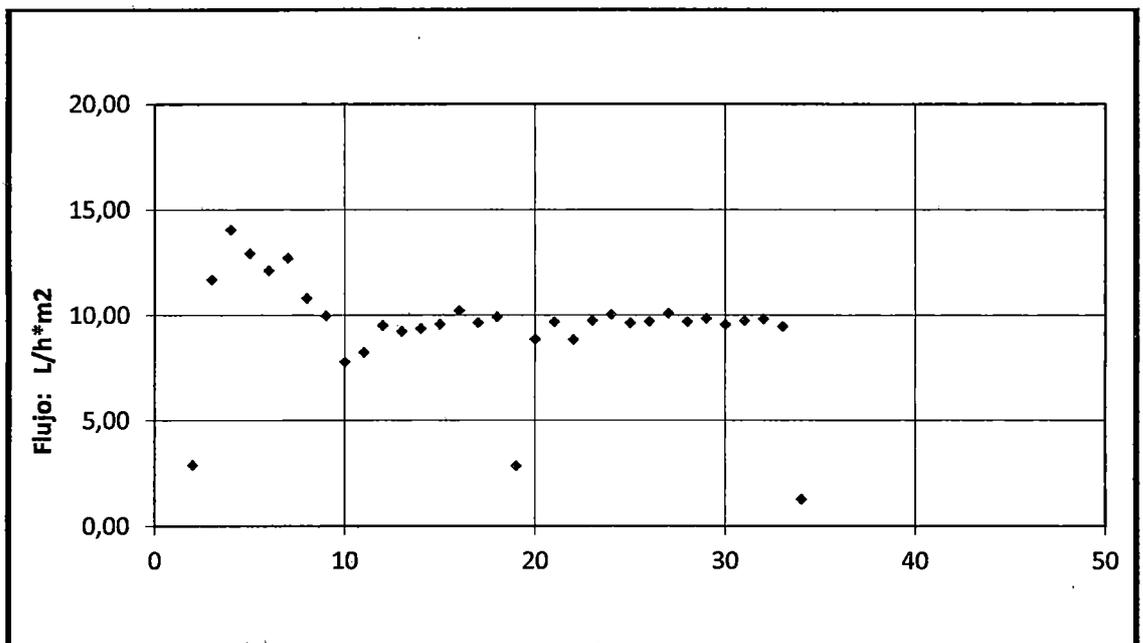
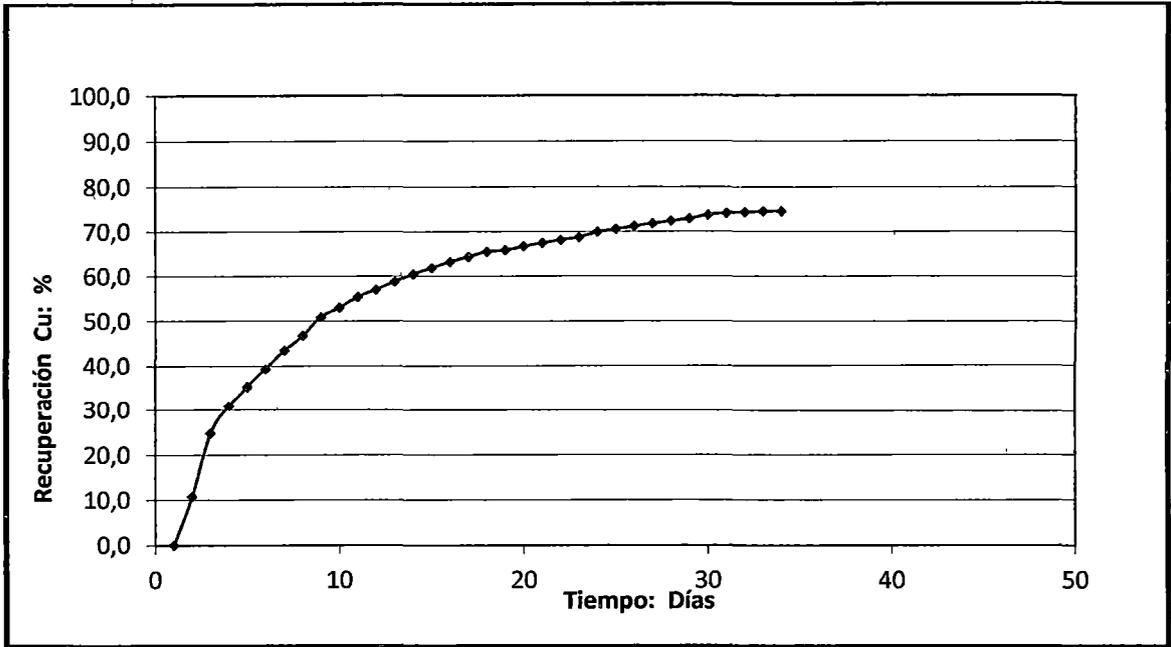


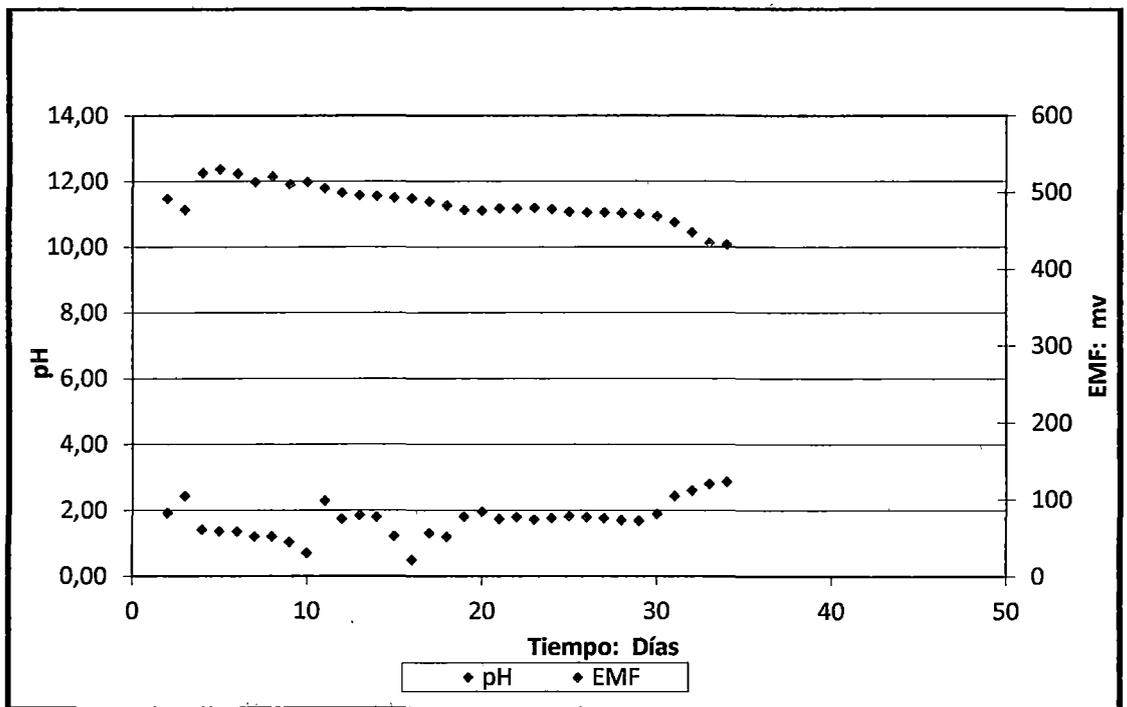
Figura № 26. Flujo del PLS (Pregnant Leached Solution) vs Tiempo

Fuente: Propia



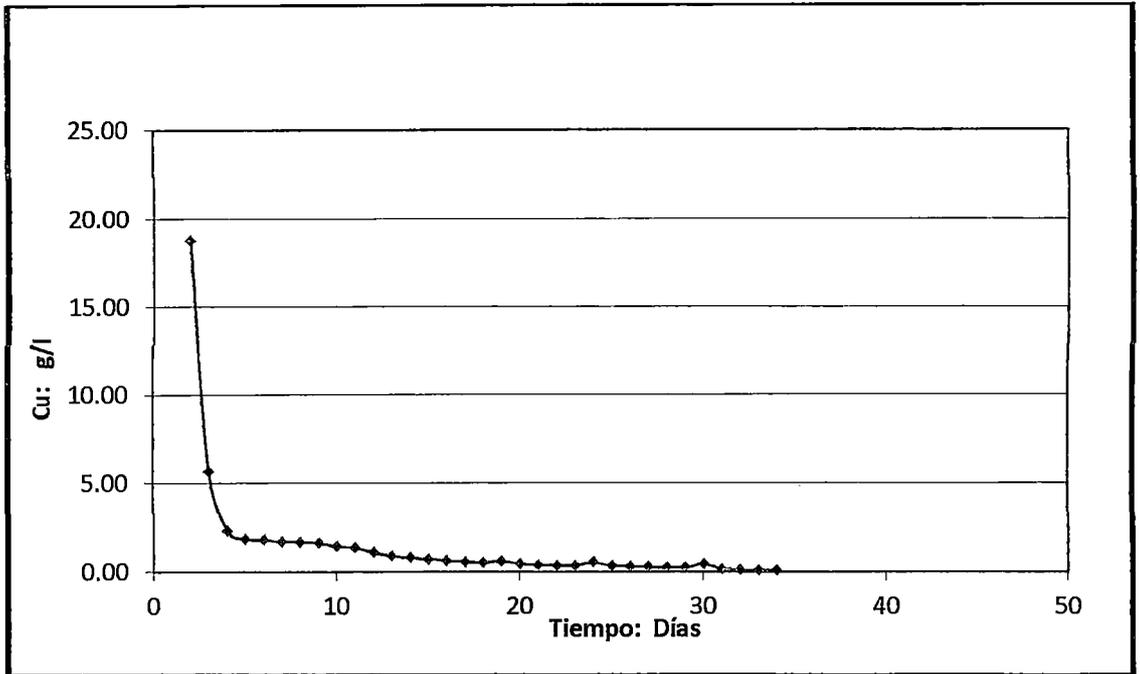
**Figura No 27.** % de Recuperación del Cobre en función del tiempo

Fuente: Propia



**Figura No 28.** pH y Fuerza Electromotriz en función del tiempo

Fuente: Propia



**Figura No 29.** Variación de la recuperación de Cobre en el PLS

Fuente: Propia

### PRUEBA DE COLUMNA No 2

Se tiene los resultados del análisis a la cabeza calculada a continuación:

**Tabla No 57.** Datos de la cabeza calculada

Producto	Peso kg	Volumen L	Resultados Cu %	g/L	Recuperación %
PLS	---	154.62	---	0.89	68.9
Residuo	24.90	---	0.250	---	31.1
Cab. Calc.	25.00		0.801		100.0
Perdida peso	0.10				

En el análisis del mineral se tiene los siguientes resultados de los ensayos para ver el cobre secuencial al inicio y al final

**Tabla Nº 58.** Resultados del análisis de la Muestra

Elementos analizados	Ensayes del cobre secuencial				
	Cu	Fe	A.s. cu	Cn.s. cu	Res. Cu
Ensayes de cabeza (%)	0.80	3.02	0.73	0.02	0.05
Ensayes de residuos (%)	0.25	2.98			

- A.S. Cu: Cobre soluble en Acido
- CN.S. Cu: Cobre soluble en Cianuro
- Res. Cu: Cobre residual

Las condiciones de trabajo son las siguientes:

**Tabla Nº 59.** Condiciones de Operación de la Columna 2

Tamaño columna	6" de diámetro x 3 m alto
Granulometría	100 % - 1/2 "
Solución de lixiviación	5 gpl $\text{h}_2\text{so}_4$ 15
Dosage curado	Kg de $\text{h}_2\text{so}_4$ /tonelada de mineral
Tiempo de curado	3 días
Días de lixiviación	35
Flujo	10 l/hr-m <sup>2</sup>

**Tabla Nº 60.** resultados del análisis de los residuos de la columna 2

<b>Mallas</b>	<b>Peso Kg</b>	<b>Peso %</b>	<b>Ensayes</b>	
			<b>Cu %</b>	<b>Fe %</b>
+1/2"	9.80	39.4	0.37	2.44
+3/8"	4.55	18.3	0.21	3.01
+1/4"	3.10	12.4	0.23	3.04
+10M	4.40	17.7	0.15	3.31
-10M	3.05	12.2	0.10	4.16
Cabeza				
Calculada	24.90	100.0	0.25	2.98

Resultados Obtenidos:

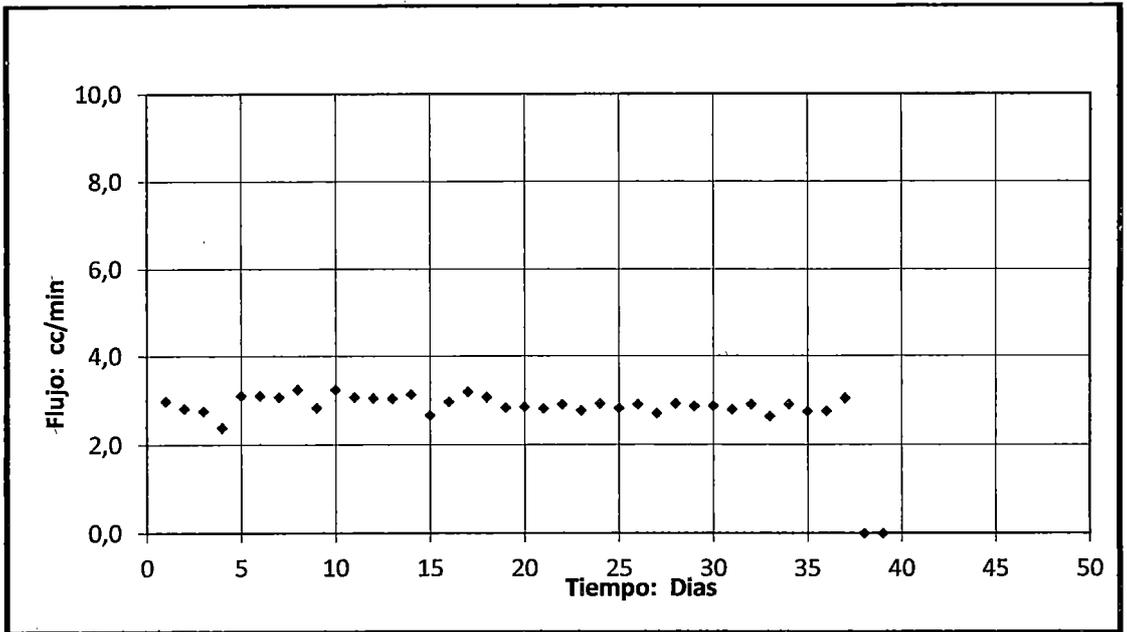


Figura № 30. Flujo de alimentación en función del tiempo

Fuente: Propia

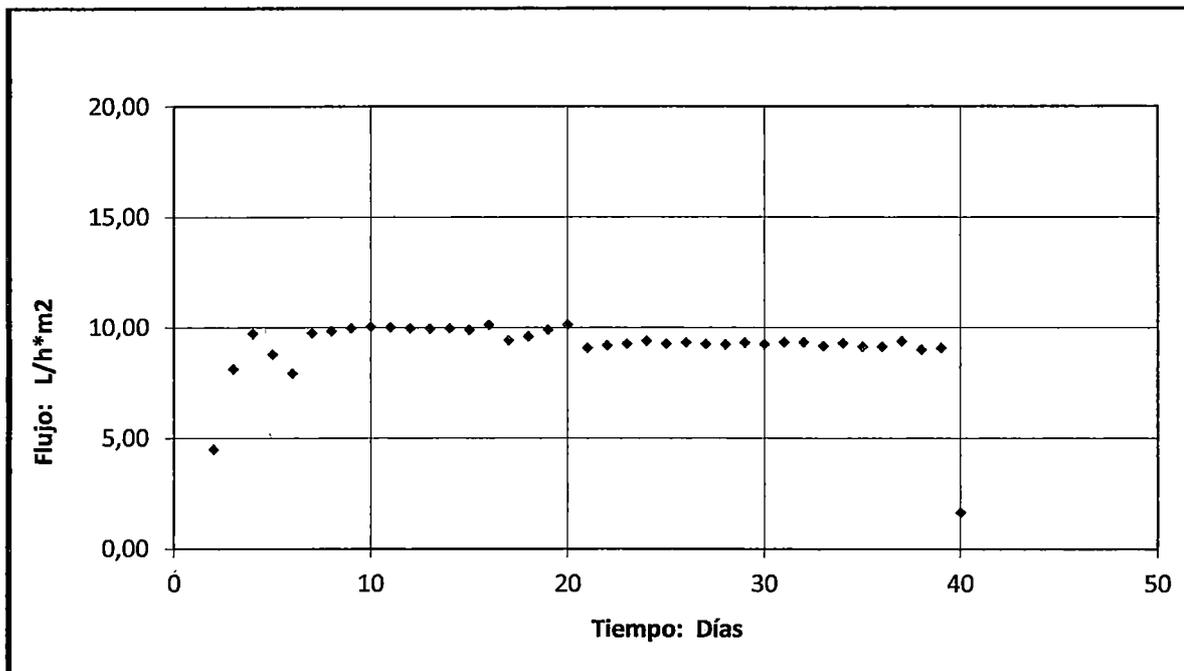
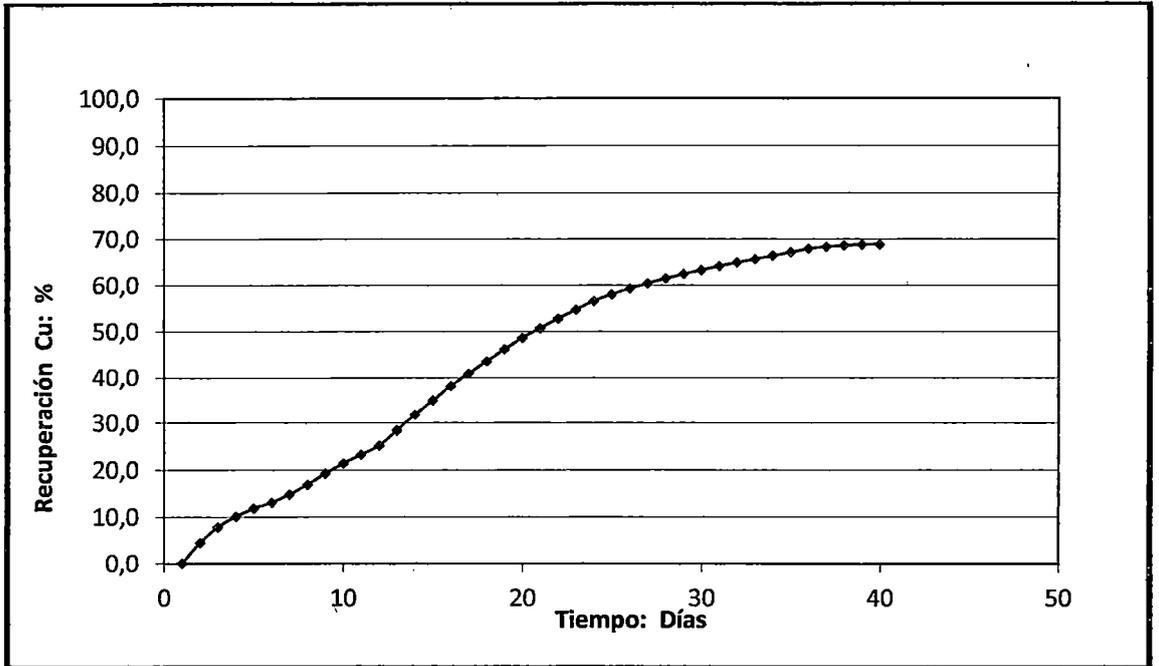


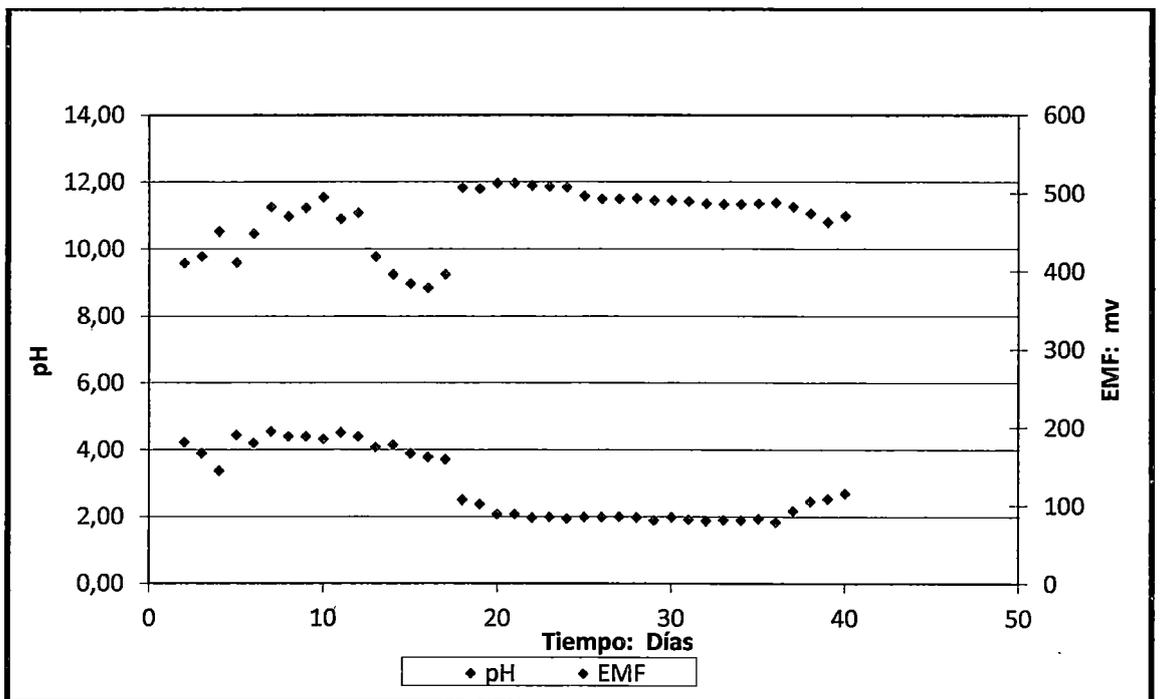
Figura № 31. Flujo del PLS (Pregnant Leached Solution) vs Tiempo

Fuente: Propia



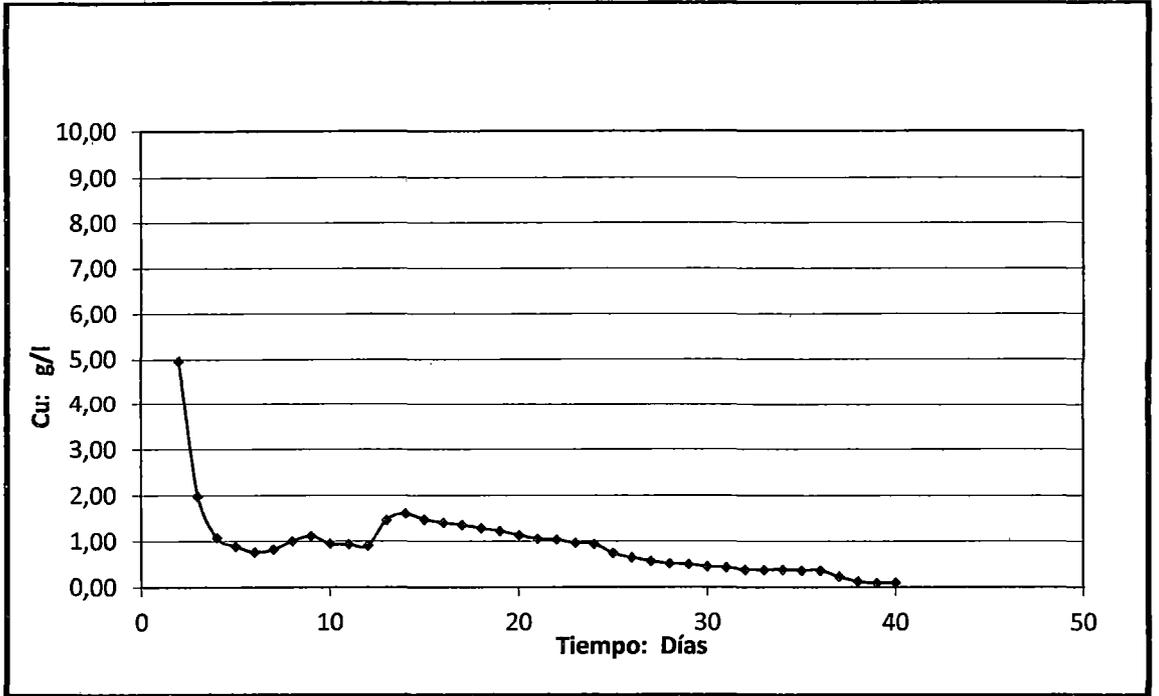
**Figura № 32.** % de recuperación de Cobre en función el tiempo

Fuente: Propia



**Figura № 33.** pH y EMF vs Tiempo en función del tiempo

Fuente: Propia



**Figura Nº 34** Cobre en el PLS en función del tiempo

Fuente: Propia

**PRUEBA DE COLUMNA Nº 3**

Se puede apreciar los resultados en las siguientes tablas

**Tabla Nº 61.** Cálculos de cabeza calculada

Producto	Peso	Volumen	Ensaye Cu		Recuperación
	kg		L	%	g/L
PLS	---	416.73	---	0.42	88.8
Residuo	24.55	---	0.091	---	11.2
Cab. Calc.	25.00		0.793		100.0
Perdida peso	0.45				

En el análisis del mineral se tiene los siguientes resultados de los ensayos para ver el cobre secuencial al inicio y al final

**Tabla Nº 62.** Resultados del análisis de la Muestra

Elementos analizados	Ensayes del cobre secuencial				
	Cu	Fe	A.s. cu	Cn.s. cu	Res. Cu
Ensayes de cabeza (%)	0.79	3.02	0.73	0.02	0.05
Ensayes de residuos (%)	0.09	2.61			

**Tabla Nº 63.** Condiciones de trabajo de la columna de lixiviación 3

Tamaño columna	16 cm. de diámetro x 3 m Alto
Granulometría	100 % - 1/2 "
Solución de lixiviación	2 gpl H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 25.00
Dosaje curado	kg de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /tonelada de Mineral
Tiempo de curado	3 días
Días de lixiviación	99
Flujo	10 l/hr-m2

**Tabla Nº 64.** Resultado del análisis de los residuos de la columna de lixiviación 3

Mallas	Peso Kg	Peso %	Ensayes	
			Cu %	Fe %
+3/4"	3.50	14.3	0.16	2.11
+1/2"	4.95	20.2	0.07	2.72
+3/8"	5.10	20.8	0.08	1.93
+1/4"	3.65	14.9	0.10	2.55
+10M	4.40	17.9	0.07	2.95
-10M	2.95	12.0	0.08	3.77
Cabeza Calculada	24.55	100.0	0.09	2.61

Resultados Obtenidos:

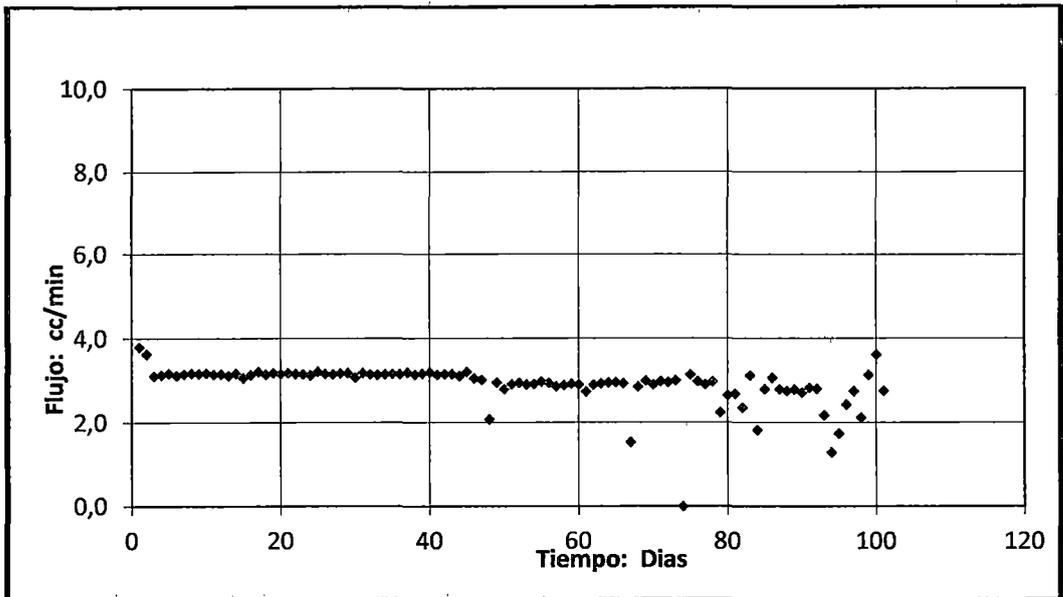


Figura No 35. Flujo de alimentación en función del tiempo

Fuente: Propia

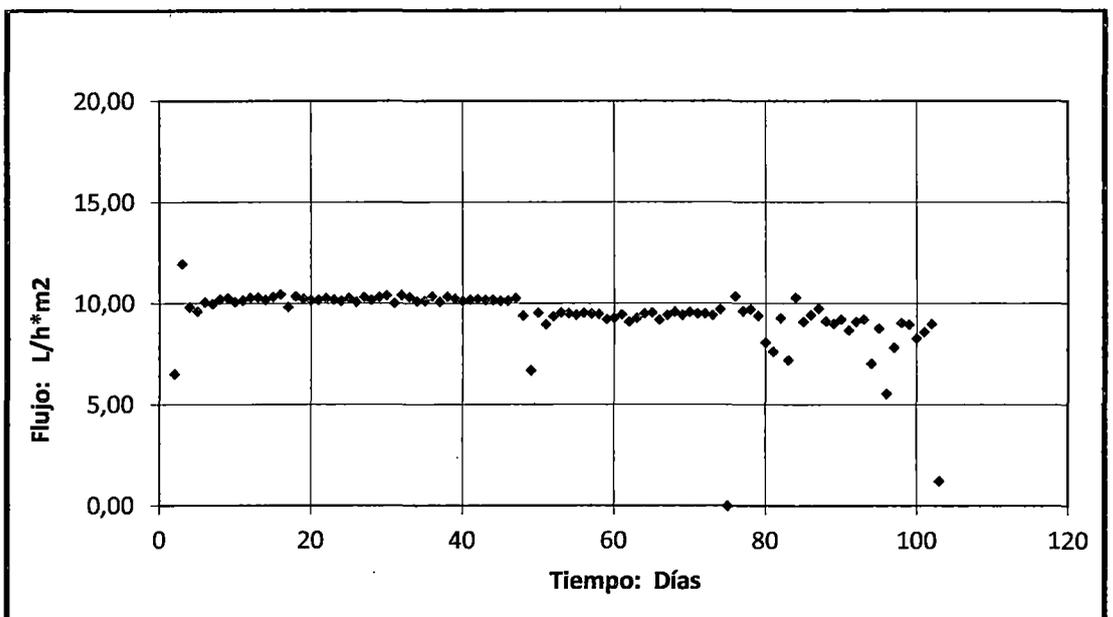
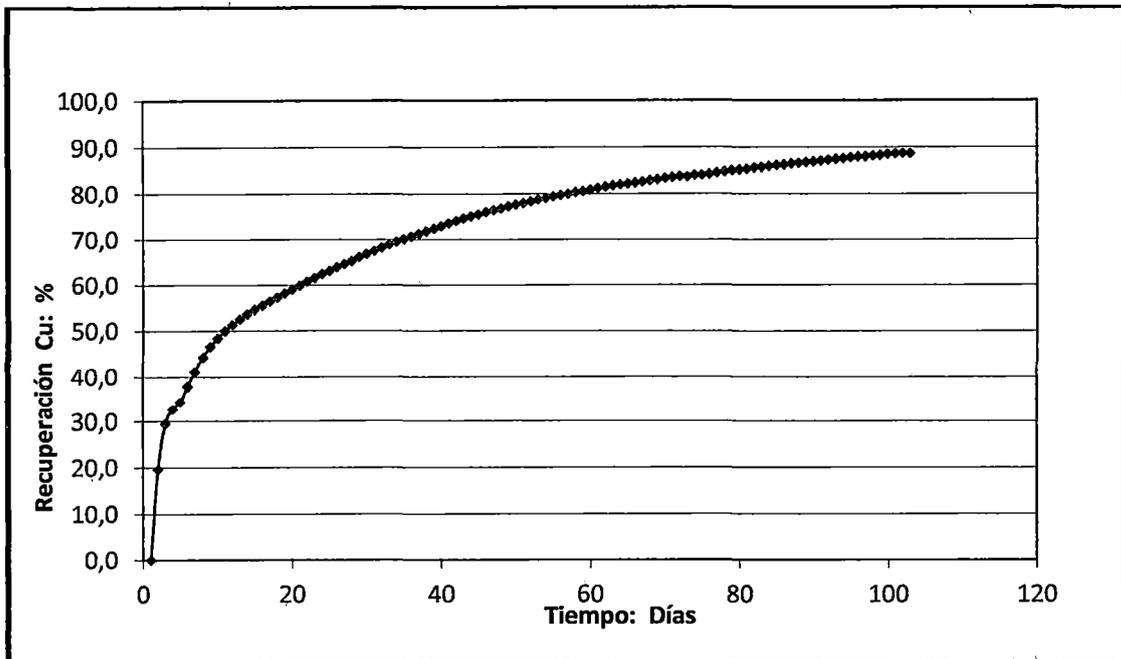


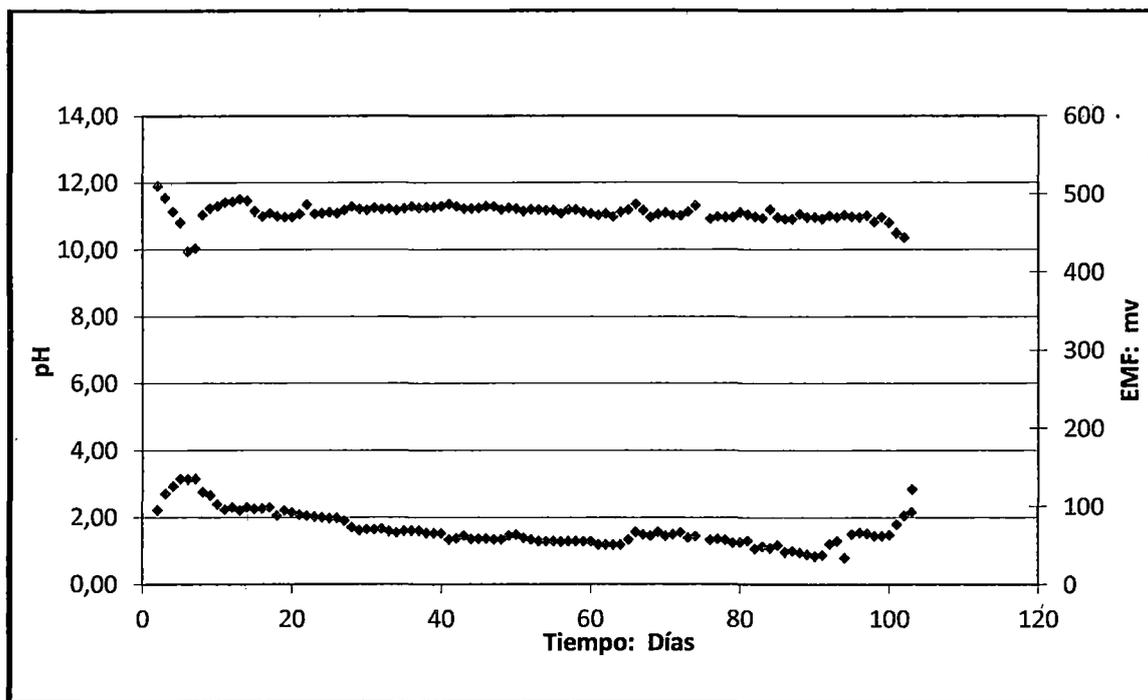
Figura No 36. Flujo de PLS en función del tiempo

Fuente: Propia



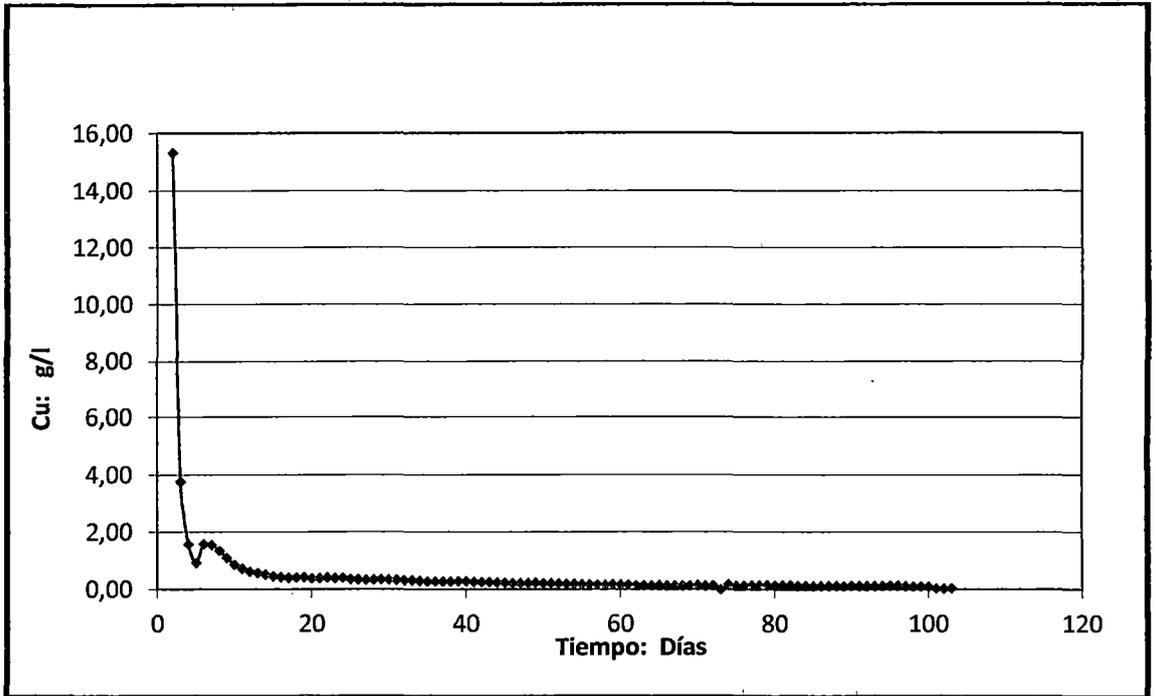
**Figura № 37.** Recuperación de Cobre en función del tiempo

Fuente: Propia



**Figura № 38.** pH y EMF vs Tiempo en función del tiempo

Fuente: Propia



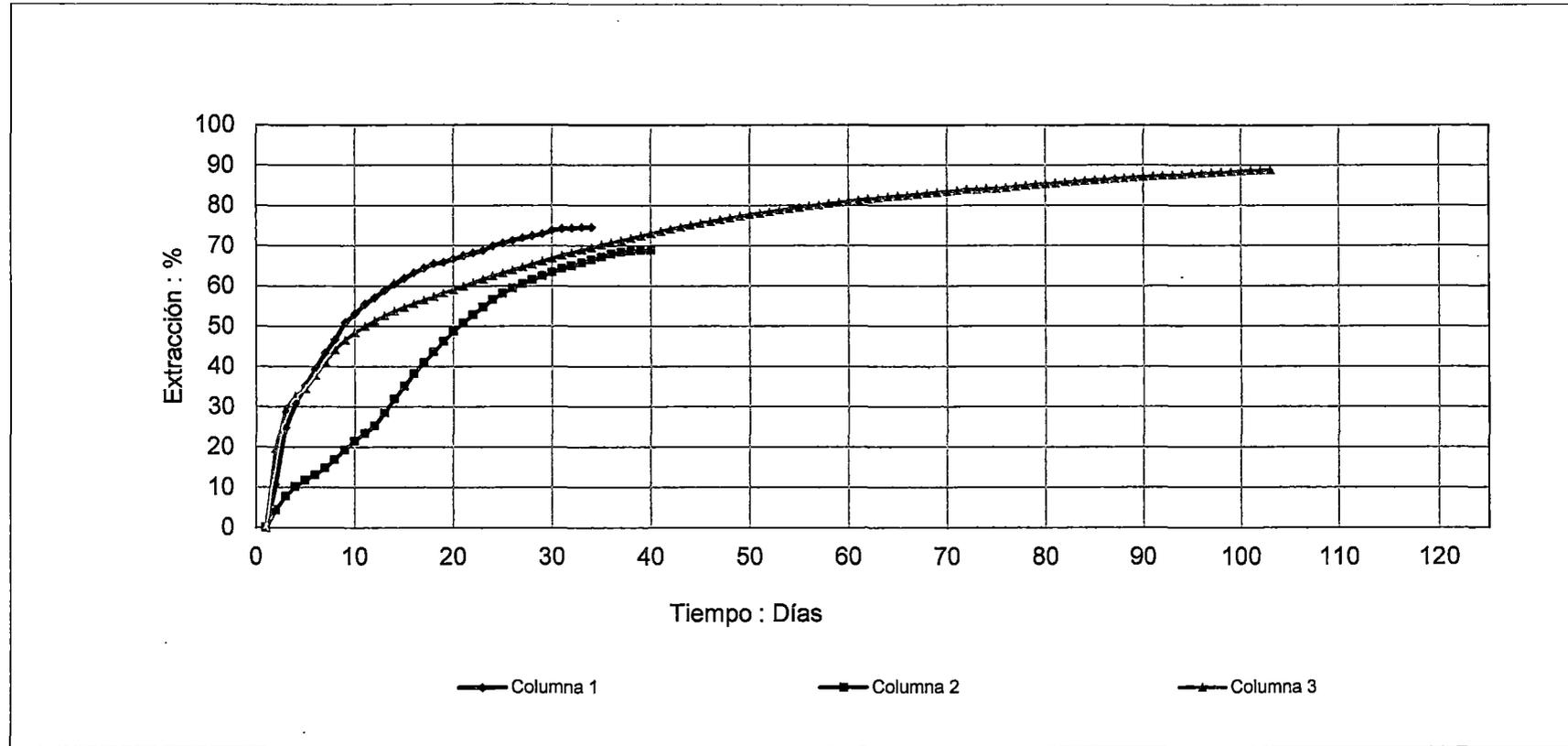
**Figura Nº 39.** Cobre en el PLS en función del tiempo

Fuente: Propia

## RESUMEN DE LAS PRUEBAS DE COLUMNA

**Tabla Nº 65.** Resumen de las Pruebas de lixiviación en Columnas

Columna	Condiciones				Resultados				
	Curado	Conc.	Flujo	Días	Cabeza	Extracción Cu	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		de			Neto		
	kg/t	g/L	L/h-m <sup>2</sup>	lixiviación	Calculada %	%	Kg/T	Final	
1	25	10	10	28	0.80	74.61	31.33	1.72	
2	15	5	10	35	0.80	68.91	32.11	1.93	
3	25	2	10	99	0.79	88.78	26.54	1.45	



**Figura Nº 40.** % de extracción de Cobre de las 3 Columnas de lixiviación en función del Tiempo

Fuente: Propia

## CAPITULO VII

### ANALISIS ECONOMICO

En este capítulo se presenta una evaluación económica preliminar para una planta con capacidad de producción de 130000 Ton de Cobre anuales, y un periodo de 10 años de producción.

Para este efecto se han hecho estimados de los ingresos y los costos utilizando diversas fuentes de información.

Para los ingresos se ha obtenido el precio del cobre durante los años 2004 al 2014, los que se presentan en la Tabla Nº 67. Con estos datos se ha estimado los precios del cobre en los años 2015 al 2023, que se presentan en la Tabla Nº 68.

Para la estimación de los costos, se han obtenido los siguientes datos de operación acerca de la producción del cobre a partir del mineral:

**Tabla Nº 66.** Parámetros de Operación

Producción de cobre (cátodos)	130000 ton /año
Pureza de los cátodos	99.97%
Recuperación de cobre en el PLS	90%
Recuperación del cobre en la lixiviación	74.61%
Ley del mineral	0.80%
Capacidad de Explotación (mineral)	24207175.78 ton /año

Para una ingeniería básica se asumirá un capital de trabajo constante y los costos del cobre para los 10 años de funcionamiento de la planta han sido estimados a partir de la bibliografía "Metalurgia Extractiva del Cobre – Biswas ", los que han sido actualizados al año 2013 usando los índices de costos correspondientes.

los índices de costos correspondientes. Los resultados obtenidos son presentados en la Tabla N° 64

**Tabla N° 67.** Evolución del precio del Cobre (\$/ton)

<b>Mes y Año</b>	<b>Costo del cobre (\$/ton)</b>
Enero del 2004	2957.286
Enero del 2005	3221.526
Enero del 2006	4923.672
Enero del 2007	5687.766
Enero del 2008	7242.378
Enero del 2009	3214.92
Enero del 2010	6711.696
Enero del 2011	7372.296
Enero del 2012	8341.176
Enero del 2013	8200.248
Enero del 2014	7332.296

Fuente: *Investing.com*

**Tabla N° 68.** Estimación del precio del Cobre (\$/ton)

<b>Mes y Año</b>	<b>Costo del cobre (\$/ton)</b>
Enero del 2015 *	8151.804
Enero del 2016 *	8259.702
Enero del 2017 *	8308.146
Enero del 2018 *	8294.934
Enero del 2019 *	8222.268
Enero del 2020 *	8090.148
Enero del 2021 *	7896.372
Enero del 2022 *	7643.142
Enero del 2023 *	7328.256

En la Tabla Nº 69 se presenta el estimado de la Inversión determinada

**Tabla Nº 69.** Inversión total de la planta (costos actualizados al año 2013)

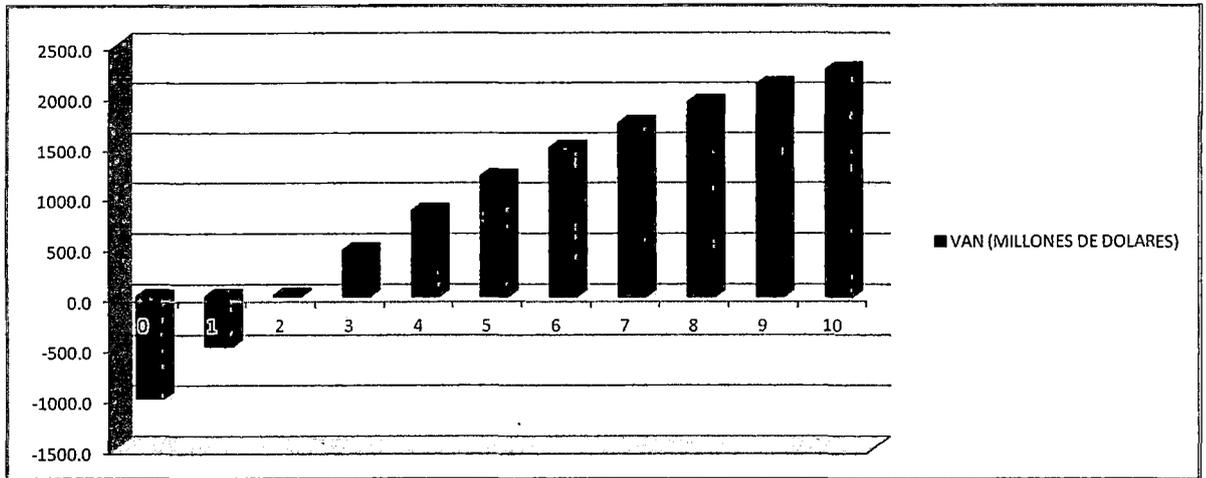
<b>Etapas del proceso</b>	<b>Inversión total (Millones de dólares)</b>
Mina a tajo abierto	403.684211
Chancado y Clasificación	80.7368421
Instalación de lixiviación en montones (construcción de pilas, distribución de la solución de lixiviación y sistema de colección)	40.3684211
planta de extracción con disolventes( mezclador - sedimentador - sistema de distribución acuoso y orgánico)	282.578947
planta de separación por electrolisis (celdas, transformadores, rectificadores y sistema de distribución eléctrico)	181.657895
Instalación de fundición y vaciado	20.1842105
<b>Inversión Total</b>	<b>1009.21053</b>

Fuente: Biswas - Davenport

**Tabla No 70.** Estado de ganancias y pérdidas del proyecto (en millones de dólares) para un periodo de 10 años

<b>Años</b>	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Año 3</b>	<b>Año 4</b>	<b>Año 5</b>	<b>Año 6</b>	<b>Año 7</b>	<b>Año 8</b>	<b>Año 9</b>	<b>Año 10</b>
Ingresos	953.2	1059.7	1073.8	1080.1	1078.3	1068.9	1051.7	1026.5	993.6	952.7
Egresos										
Gastos de producción (Materia prima , costos fijos y variables)	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0
Utilidad bruta	836.2	942.7	956.8	963.1	961.3	951.9	934.7	909.5	876.6	835.7
G. Administrativos	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5
G. Ventas	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0
Utilidad de operación	803.7	910.2	924.3	930.6	928.8	919.4	902.2	877.0	844.1	803.2
Depreciación	100.9	100.9	100.9	100.9	100.9	100.9	100.9	100.9	100.9	100.9
Renta neta	702.8	809.3	823.3	829.6	827.9	818.5	801.3	776.1	743.2	702.3
Impuesto a la renta	210.8	242.8	247.0	248.9	248.4	245.5	240.4	232.8	223.0	210.7
Utilidad neta	491.9	566.5	576.3	580.7	579.5	572.9	560.9	543.3	520.2	491.6





**Figura Nº 40.** Valor Actual Neto (VAN) vs tiempo (periodo de 10 años)

Fuente: propia

Como se puede apreciar en la figura numero 40 el proyecto es muy rentable ya que se puede obtener recuperaciones en la inversión a partir del primer año.

## CAPITULO VIII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1 Conclusiones

- las pruebas banco (botella) a nivel de 100 % -10 mallas tienen una extracción máxima de recuperación de cobre de 91.0 % usando Oxidante Ion  $Fe^{3+}$  y 10 gpl de  $H_2SO_4$ .
- para las pruebas de botella a 80% -200 mallas se tiene un comportamiento similar ya que la extracción máxima alcanzada es de 91.2 % usando Oxidante Ion  $Fe^{3+}$  y 10 gpl de  $H_2SO_4$ .
- se logra una mayor recuperación de cobre con un tamaño de partícula de 80% -200 mallas que es aproximadamente 0.2 % de diferencia de la recuperación de Cobre.
- Para la prueba piloto se puede apreciar que el curado (intimo contacto entre el  $H_2SO_4$  y el mineral ) está en función directa con el porcentaje de extracción de cobre.
- La máxima extracción a nivel piloto es de 88.78 % para la columna Nº 3, esta extracción es muy buena con respecto a la demás, pero implica un mayor tiempo de lixiviación (99 días).
- La extracción máxima se tiene a nivel banco poseen una extracción máxima de 91.2 % de cobre a partir de las pilas de lixiviación con respecto a las recuperaciones de la prueba piloto de columna (la recuperación máxima fue de 88.78 %), ya que esas recuperaciones están en función del grado de liberación del mineral y de la dosis de  $H_2SO_4$ .
- El valor proyecto es viable ya que posee un Valor Actual Neto (VAN) positivo y la inversión se puede recuperar a partir del primer año como se aprecia en la figura numero 40.

## 7.1 Recomendaciones

- para las pruebas de botella 100 % -10 mallas se podría evitar el uso de oxidante  $\text{Fe}^{3+}$ , ya que como se pudo ver en los experimentos su uso no genera gran diferencia con respecto a la extracción.
- También se podría Obviar para las pruebas de botella de 80 % - 200 mallas el uso de oxidante  $\text{Fe}^{3+}$ , ya que como se pudo ver en los experimentos su uso no genera gran diferencia con respecto a la extracción que viene a ser una diferencia de 0.6 %.
- Se podría omitir reducir el tamaño de la partícula desde 100 % -10 mallas hasta 80 % -200 mallas, ya que la diferencia de extracción es mínima (0.2% para las mejores condiciones), ya que esto implica grandes costos de trituración y molienda que son un gran ahorro para la planta.
- Se podría hacer pruebas con diversas dosis de curado con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  que sean superior a 25 kg de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  / Ton de Mineral para poder evaluar posibles mejoras en el grado de extracción de ácido sulfúrico.
- Se podría lixiviar con 10 gpl de Acido para obtener una recuperación similar a la máxima extracción de las columnas (columna № 3 88.78%) ahorrando en costos de operación, ya que solo tomaría 28 días (Columna № 1) de lixiviación en comparación con los 99 días de la columna №3.
- Como posible opción de aumentar el grado de recuperación de cobre en las pilas de lixiviación se puede evaluar hacer la lixiviación con tamaños menores a 1", que pueden ser  $\frac{1}{2}$ " o  $\frac{1}{4}$ ".

## BIBLIOGRAFIA

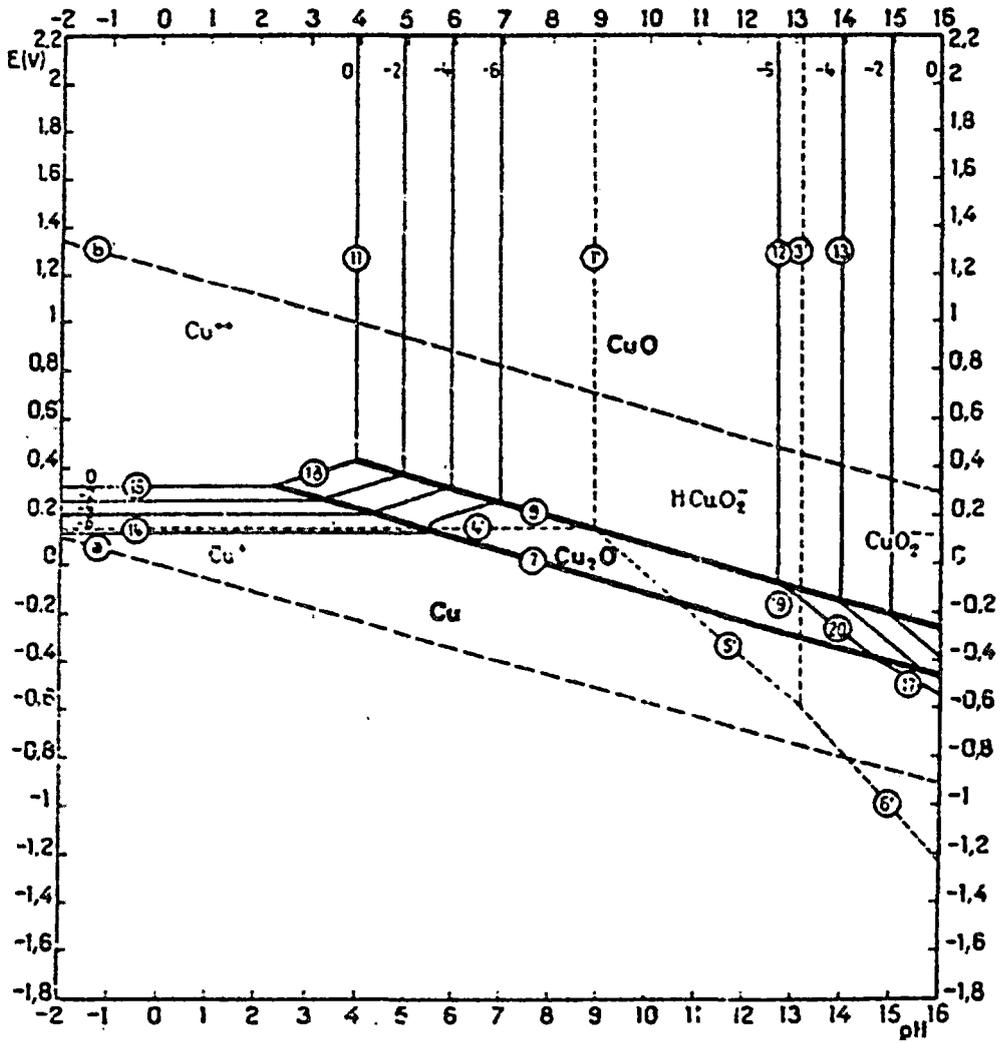
- 1) Beregovski, V;1974; "Metalurgia del Cobre y Niquel", Rusia
- 2) Biswas – Davenport; 1993; "El Cobre Metalurgia Extractiva", Segunda Edición. México.
- 3) Camac Condor, Teodoro,1987, Tema para Optar el grado de Ingeniero Metalurgista "Separación del cobre por flotación del concentrado bulk plomo-cobre" – UNI, Lima
- 4) CIMM (2005). "Biolixiviación: La Nueva Minería". Web Centro de Investigación Minera y Metalurgia. [http://www.infoindustriaperu.com/articulos\\_pdf/mineria/008.pdf](http://www.infoindustriaperu.com/articulos_pdf/mineria/008.pdf)
- 5) Codelco (2002). Alianza Codelco-BHP Billiton: Lidera biolixiviación de cobre. Informe sustentable 20, Junio de 2002. Web corporación Nacional del cobre.
- 6) Dómic, Esteban; 2001; "Hidrometalurgia, Fundamentos, procesos y Aplicaciones", Santiago de Chile.
- 7) Haung – Twidwel – Miller, hidrometalurgia Tomo I y II. Impreso en Perú.
- 8) Pradhan, N., Nathsarma, K.C., Srinivasarao, K., Sukla, L.B., Mishra, B.K., 2008, "Heap Bioleaching of chalcopyrite: a review". Minerals Engineering 21:355-365.
- 9) Shefel J.L., White, M.L. y Caenepeel, C.L.;1979; "Application of the shrinking core model fore copper oxide leaching". Min Eng. Vol 32, pp. 165 – 171 .
- 10) Vázquez Pérez, Luz; 1997, "Diversidad de los microorganismos quimiolitotrofos presentes en sistemas de biolixiviación". Tesis (Doctor en ciencias con mención en Biología). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias, 1997. 1 – 21.
- 11) Venancio Astucuri; 1994; "Introducción a la Flotación de Minerales", Lima .

## ANEXOS

### Anexo Nº 1 Condiciones óptimas de bacterias asociadas a la lixiviación de minerales.

Microorganismos	Fuentes energéticas	pH	Temperatura (°C)
Thiobacillus ferroxidans	Fe <sup>+2</sup> , U <sup>+4</sup> , S <sup>0</sup>	1.5	25 – 35
Thiobacillus thiooxidans	S <sup>0</sup>	2.0	25 – 35
Leptospirillum ferrooxidans	Fe <sup>+2</sup>	1.5	25 – 35
Sulfolobus	S <sup>0</sup> , Fe <sup>+2</sup> , C orgánico	2.0	> a 60
Acidiphilium cryotum	C orgánico	2.0	25 – 35
Th. Intermedius	S <sup>0</sup> , S <sup>+2</sup> , C orgánico	2.5	30
Th. Napolitanas	S <sup>0</sup> , S <sup>+2</sup>	2.8	30
Th. Acidophilus	S <sup>0</sup> , S <sup>+2</sup>	3.0	
Th. Thioparus	S <sup>0</sup> , S <sup>+2</sup>	3.5	
Thiobacillus TH2 y TH3	Fe <sup>+2</sup> , S <sup>+2</sup>	6.0	50
Metallogenium sp.	Fe <sup>+2</sup>	4.5	
Heterótrofos	C orgánicos		25 – 40

Anexo Nº 2. Diagrama Eh-pH para el sistema Cu-H<sub>2</sub>O a 25 °C



Fuente: Esteban Domic

**Anexo № 3. Valores de pH de equilibrio y las energías libres estándar de formación para las reacciones a 25°C**

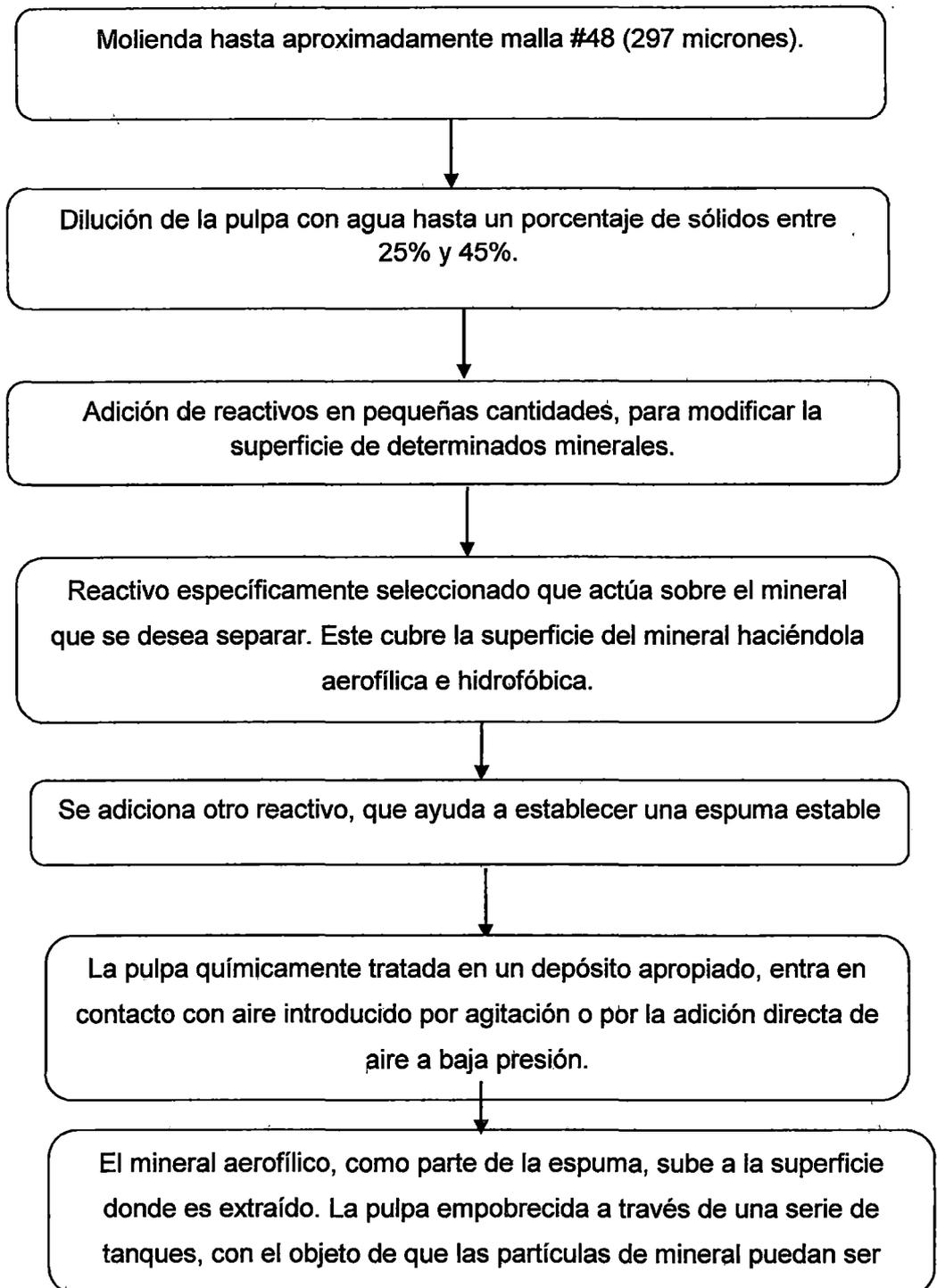
<b>Mineral</b>	<b>pH</b>	<b><math>\Delta G^\circ 25(C^\circ)</math></b>
Azurita	3.2	-26.46
Malaquita	3.2	-17.72
Atacamita	2.5	-20.72
Crisocola	2.8	-7.56
Antlerita	2.2	-12.02
Brochantita	2.5	-20.69
Tenorita	3.8	-10.42

Fuente: Esteban Domic

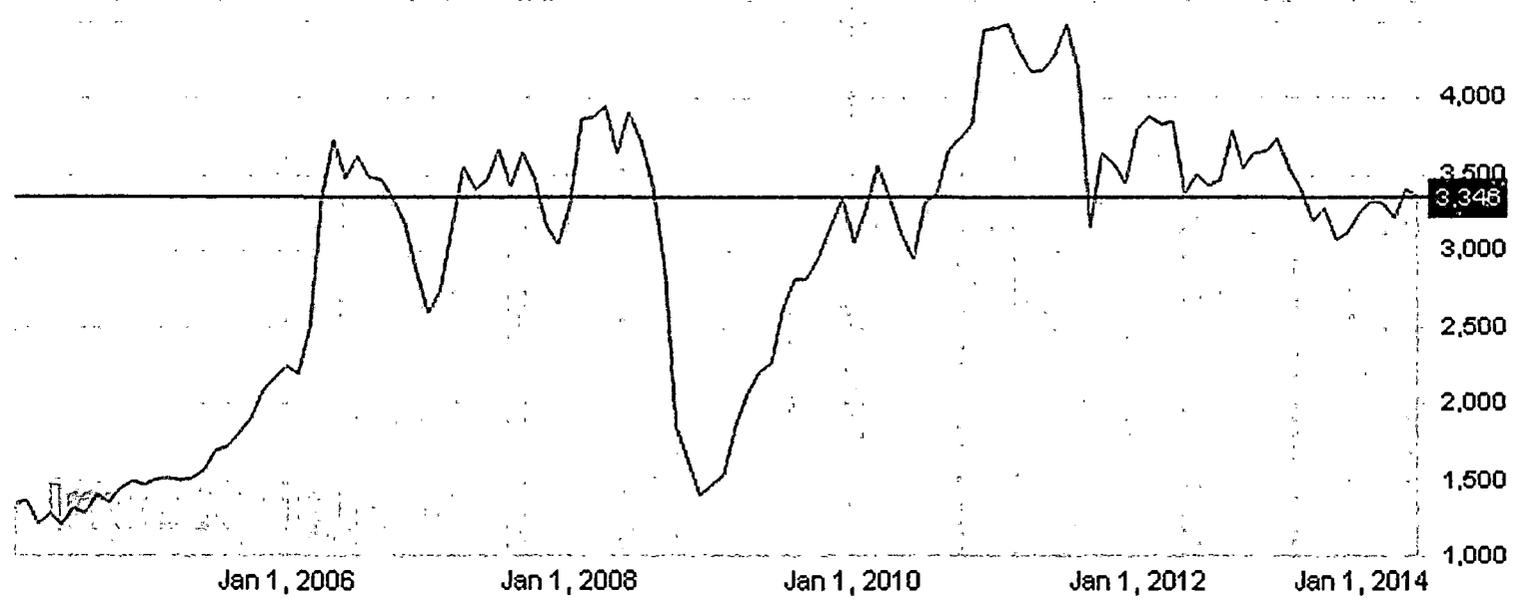
**Anexo № 4. Solubilidad de sulfuros en H<sub>2</sub>O en g/l (Verhoogen, 1938)**

<b>Sulfuro</b>	<b>25°C</b>	<b>100°C</b>	<b>200°C</b>	<b>300°C</b>	<b>400°C</b>
<b>Ag<sub>2</sub>S</b>	1*10 <sup>-12</sup>	5*10 <sup>-12</sup>	2*10 <sup>-11</sup>	3*10 <sup>-11</sup>	5*10 <sup>-11</sup>
<b>CoS</b>	2*10 <sup>-6</sup>	1*10 <sup>-5</sup>	5*10 <sup>-5</sup>	1*10 <sup>-4</sup>	4*10 <sup>-4</sup>
<b>CuS</b>	2*10 <sup>-13</sup>	7*10 <sup>-13</sup>	3*10 <sup>-12</sup>	8*10 <sup>-12</sup>	1*10 <sup>-11</sup>
<b>Cu<sub>2</sub>S</b>	1*10 <sup>-12</sup>	5*10 <sup>-11</sup>	---	---	---
<b>FeS<sub>2</sub></b>	2*10 <sup>-8</sup>	2*10 <sup>-7</sup>	2*10 <sup>-6</sup>	8*10 <sup>-6</sup>	2*10 <sup>-5</sup>
<b>HgS</b>	1*10 <sup>-17</sup>	7*10 <sup>-17</sup>	4*10 <sup>-16</sup>	1*10 <sup>-15</sup>	3*10 <sup>-15</sup>
<b>PbS</b>	3*10 <sup>-9</sup>	5*10 <sup>-8</sup>	6*10 <sup>-7</sup>	3*10 <sup>-6</sup>	8*10 <sup>-6</sup>
<b>ZnS</b>	3*10 <sup>-5</sup>	2*10 <sup>-3</sup>	0.1	1.2	7.0

**Anexo № 5. Esquema convencional del proceso de flotación para minerales sulfurados de cobre**



**Anexo Nº 6. Variación del Costo del cobre desde el año 2006 al presente (Costo en \$/ Libra de Cobre)**  
Actualizado el día 12-01-2014



Fuente : Investing.com

## Anexo № 7. Ensayes diarios de la Columna Numero 1

				PLS						Feed Solution							
Control				Acido				Ensayes		Acido				Ácido		Ensayes	
		Día	Volumen	Libre	pH	ORP	Cu	Fe	Fe <sup>++</sup>	Volumen	Libre	pH	ORP	Adicionado	Cu	Fe	Fe <sup>++</sup>
Tiempo	Fecha	Lixiviación	(ml)	(gpl)		(mV)	(gpl)	(gpl)	(gpl)	(ml)	(gpl)		(mV)	(grams)	(gpl)	(gpl)	(gpl)
08:00 a. m.	15/12/2010	Curado									91.7			0			
05:00 p. m.	17/09/2012	Leach 1	0							4460	10.0	0.31	546	0	0.0	0.0	0.0
03:00 p. m.	18/09/2012		2	1150	0.00	1.91	491	18.80	2.71	0.20	4460	10.0	0.33	546	45	0.0	0.0
02:30 p. m.	19/09/2012		3	4980	0.07	2.42	477	5.65	0.33	0.05	4260	12.0	0.33	546	51	0.0	0.0
02:00 p. m.	20/09/2012		4	5330	1.08	1.40	525	2.29	0.73	0.05	6650	10.0	0.5	530	67	0.0	0.7
	21/09/2012		5	4900	1.90	1.35	530	1.82	1.02	0.05	4300	9.9	0.5	534	43	0.0	0.7
	22/09/2012		6	4600	1.90	1.34	524	1.78	1.12	0.05	5000	9.9	0.4	540	50	0.0	0.8
	23/09/2012		7	4820	1.84	1.20	513	1.69	1.25	0.05	4500	9.9	0.5	525	45	0.0	0.8
11:30 a. m.	24/09/2012		8	4100	1.84	1.20	520	1.64	1.30	0.05	4460	9.9	0.5	520	44	0.0	1.0
05:00 p. m.	25/09/2012		9	5335	1.81	1.03	510	1.59	1.34	0.10	4700	9.5	0.5	526	44	0.0	1.0
02:40 p. m.	26/09/2012		10	3060	1.74	0.70	513	1.42	1.60	0.05	4050	6.1	0.2	512	25	0.0	1.2
02:55 p. m.	27/09/2012		11	3640	1.60	2.28	505	1.34	1.38	0.05	3180	6.1	0.2	512	19	0.0	1.2
09:10 a. m.	28/09/2012		12	3150	1.65	1.75	499	1.08	1.27	0.10	4270	6.9	1.1	505	30	0.0	1.2
08:30 a. m.	29/09/2012		13	4080	1.72	1.85	496	0.90	1.20	0.15	4320	6.9	1.1	505	30	0.0	1.2
08:40 a. m.	30/09/2012		14	4110	1.60	1.80	495	0.79	1.10	0.15	4250	5.6	0.8	500	24	0.0	0.9
08:10 a. m.	01/10/2012		15	4080	1.67	1.22	493	0.72	1.05	0.15	4540	5.6	0.81	500	26	0.0	0.9
08:20 a. m.	02/10/2012		16	4480	1.60	0.50	492	0.62	1.11	0.15	4390	6.3	0.3	495	28	0.0	0.9
08:30 a. m.	03/10/2012		17	4230	1.61	1.30	488	0.56	1.08	0.15	4290	6.3	0.3	495	27	0.0	0.9

Control			PLS							Feed Solution							
Tiempo	Fecha	Día Lixiviación	Volumen (ml)	Acido Libre (gpl)	pH	ORP (mV)	Ensayes			Volumen (ml)	Acido Libre (gpl)	pH	ORP (mV)	Ácido Adicionado (grams)	Ensayes		
							Cu (gpl)	Fe (gpl)	Fe <sup>++</sup> (gpl)						Cu (gpl)	Fe (gpl)	Fe <sup>++</sup> (gpl)
08:30 a. m.	04/10/2012	18	4320	1.56	1.20	483	0.52	1.06	0.20	0	6.4	0.6	489	0	0.0	0.8	0.2
08:30 a. m.	05/10/2012	19	1250	1.26	1.81	477	0.59	1.00	0.20	4220	6.4	0.6	489	27	0.0	0.8	0.2
08:40 a. m.	06/10/2012	20	3890	0.85	1.96	476	0.45	0.80	0.20	4190	6.4	0.6	489	27	0.0	0.8	0.2
08:25 a. m.	07/10/2012	21	4180	1.36	1.75	479	0.38	0.92	0.20	4090	6.4	0.6	489	26	0.0	0.8	0.2
09:20 a. m.	08/10/2012	22	4000	1.50	1.80	479	0.34	0.93	0.20	4100	5.2	1.27	481	21	0.0	0.8	0.2
08:20 a. m.	09/10/2012	23	4070	2.19	1.73	480	0.34	0.94	0.15	4440	5.2	1.27	481	23	0.0	0.8	0.2
08:35 a. m.	10/10/2012	24	4420	1.60	1.77	478	0.54	1.12	0.15	4280	5.1	1.29	481	22	0.0	0.8	0.2
08:40 a. m.	11/10/2012	25	4220	1.59	1.83	475	0.33	1.02	0.15	4330	5.1	1.38	480	22	0.0	0.9	0.2
08:35 a. m.	12/10/2012	26	4220	1.54	1.80	474	0.32	0.96	0.15	4240	5.3	1.38	480	22	0.0	0.9	0.2
08:25 a. m.	13/10/2012	27	4370	1.61	1.77	474	0.29	0.97	0.15	4380	5.3	1.37	474	23	0.0	0.9	0.2
08:45 a. m.	14/10/2012	28	4290	1.62	1.72	473	0.27	0.98	0.20	4090	5.0	1.37	474	20	0.0	0.9	0.2
08:50 a. m.	15/10/2012	29	4310	1.78	1.70	472	0.25	0.99	0.25	4200	5.0	1.37	474	21	0.0	0.9	0.2
08:15 a. m.	16/10/2012	30	4070	1.43	1.90	469	0.43	0.82	0.20	4350					0.0	0.0	
08:15 a. m.	17/10/2012	31	4250	0.45	2.44	461	0.17	0.21	0.10	4300					0.0	0.0	
08:15 a. m.	18/10/2012	32	4280	0.20	2.61	448	0.10	0.08	0.10	5800					0.0	0.0	
08:30 a. m.	19/10/2012	33	4170	0.14	2.80	434	0.08	0.04	0.10	850					0.0	0.0	
08:30 a. m.	20/10/2012	34	560	0.18	2.87	432	0.09	0.04	0.10	0					0.0	0.0	