

Recibido: 07 / 08 / 2009, aceptado en versión final: 30 / 09 / 2009

# Comportamiento de los iones metálicos lixiviados en la cementación del cobre

Behavior of the Leached Metal Ions in Copper Cementation

**Daniel Lovera<sup>1</sup>, Angel Bustamante<sup>2</sup>, Janet Quiñones<sup>3</sup>, Vladimir Arias<sup>1</sup>, Luis Puente<sup>1</sup>, Meylin Terrel<sup>1</sup>, Ronald Valencia<sup>1</sup>, Ricardo Soto<sup>1</sup>, Rosa Coronado<sup>1</sup>, Diego Carvajal<sup>1</sup>, Lia Concepción<sup>1</sup>, Anselmo Sánchez<sup>1</sup>, Jasmin Sánchez<sup>1</sup>**

## RESUMEN

El presente artículo trata de describir la cementación de soluciones lixiviadas de minerales sulfurados de cobre sin tostar y tostados, obteniéndose resultados favorables lo que nos dan la pauta para la factibilidad de pasar de la clásica tecnología de concentración a la tecnología de cementación de minerales sulfurados de cobre con buenos tenores de plata y oro. Se ha procedido a realizar simulaciones del proceso considerando las variables involucradas en el proceso, tales como tiempo, agitación, concentración de soluciones, pH entre otros.

El Modelo Cinético de Cementación del Cobre a partir de soluciones PLS purificadas por Extracción por Solventes (SX) encontrado tiene la siguiente configuración:

$$C = 6,08 \exp(-0,03t)$$

Se han obtenido recuperaciones mayores del 90% de cobre, lo cual nos indica la posibilidad de mejorar los costos de los minerales y concentrados nacionales y abrir un escenario favorable para otros proyectos metalúrgicos nacionales.

**Palabras clave:** Cementos de Cobre, Cementación, Lixiviación-Cementación, Cinética de Cementación.

## ABSTRACT

This article describes the cementation process of leached solutions from copper sulphide ores being and without being toasted. With favorable results in this study, we get the pattern for the feasibility of moving from the classical technology of concentration to the technology of cementation of copper sulfide minerals containing silver and gold. Simulation steps have been performed considering the different variables involved in the process such as time, agitation, solution concentration, pH and others. A kinetic model of copper cementation from PLS solutions purified by Solvent Extraction (SX) has been developed and it has the following form:

$$C = 6.08 \exp(-0.03 t)$$

Recoveries were obtained greater than 90% copper, which gives the possibility to improve the costs of national ores and concentrates, as well as to open a favorable scenario for new national metallurgical projects.

**Keywords:** Copper cements, cementation, leaching-cementation, kinetics of cementation.

1 Instituto de Investigación (IGEO). Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica - UNMSM.  
E-mail: dloverad@unmsm.edu.pe

2 Instituto de Investigación de la Facultad de Ciencias Físicas - UNMSM.  
E-mail:

**I. INTRODUCCIÓN**

La minería peruana posee liderazgo en el contexto mundial en la producción minera mundial: Cobre (2°), Oro (5°), Zinc (3°), Plata (2°), Plomo (4°), Estaño (3°), Hierro (17°) y molibdeno (4°), entre otros metales base. Además, entrarán en operación esta segunda década que comienza proyectos importantes como: La Granja, Minas Conga, Michiquillay, Bayovar, Toromocho, Cerro Lindo, Marcota, Quellaveco, Las Bambas, Antapacay, entre otros. (MEM, 2008)

Los minerales peruanos se caracterizan por ser polimetálicos y complejos, por lo que es importante realizar investigaciones metalúrgicas para encontrar procesos de recuperación metálica conveniente. Además, es preciso desarrollar modernas tecnologías para la lixiviación de minerales y concentrados sulfurados, cementación de iones metálicos, extracción por solventes de PLS ricos y electro wining de soluciones cargadas de iones cobre para la obtención de cátodos de cobre de mejor calidad.

**I.1. Antecedentes**

De la revisión de patentes internacionales, se puede resaltar la patente 3,282,675 de la Inspiration Consolidated Copper Company Maine-Arizona, la cual muestra la importancia de obtener altas calidades de cemento de cobre a partir de cementos pobres, para así aumentar notoriamente los precios de venta haciendo rentable desde el punto de vista de producto. (Parker, 1966)

La Patente 3,288,599 de Harmon Keyes muestra la recuperación de cobre a partir de sus minerales, para obtener una máxima recuperación como cemento de cobre, llamándolo así al producto obtenido por la precipitación de cobre metálico a partir de soluciones acidificadas de cobre; al reemplazar un metal al cobre de la solución, en ausencia de impurezas en

la solución podemos obtener cobre de alta pureza. (Keyes,1966)

La Patente 3,490,899 de Krivsky produce cementos de cobre, los cuales son apropiados para el refinado a fuego directo, con los consiguientes beneficios económicos evidentes. Un paso en el logro de este resultado es la separación magnética. (Krivsky, 1966). Ver Figura 1.

La Patente 3,874,940 de Molina et al. hace una descripción de la cementación del cobre a partir de soluciones salinas bajo condiciones de concentración, tiempo, agitación, los tamaños de distribución de tamaño, la calidad del hierro. (Molina,1971)

La patente 3,630,722 de Frank Chew muestra un proceso integrado de minada, lixiviación, cementación, refinación clorurante y la obtención de un cemento de cobre intermedio, para luego obtener metales preciosos, cátodos de cobre, productos cobre fundidos e impurezas de metal haluros. (Chew, 1971)

La patente 3,684,492 de Ariano Colombini et al. muestra la obtención de un cemento de cobre libre de arsénico a partir de soluciones acidificadas de iones arsénico, obtenidos a partir de arsenopiritas. Ver Figura 2. El Proceso consiste en tres etapas:

1. Soluciones obtenidas de partida con concentraciones altas de Fe(+2), con bajas concentraciones de Cu(+2).
2. Las soluciones se trabajan a pH de 3 a 3.5 con temperaturas de 20 a 80 °C, neutralizadas y filtradas.
3. La solución filtrada es cementada con exceso de metal de hierro a una temperatura que va de 20 a 40 °C, para así obtener un cemento de cobre libre de arsénico, con una solución de desecho también libre de arsénico. (Colombini, 1969)

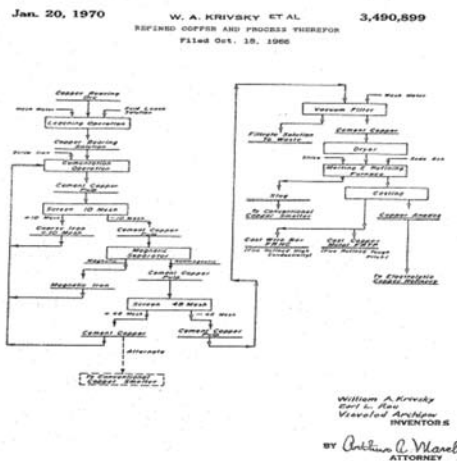


Figura 1. Diagrama de Flujo de Cementación de Cobre - W.A. Krivsky.

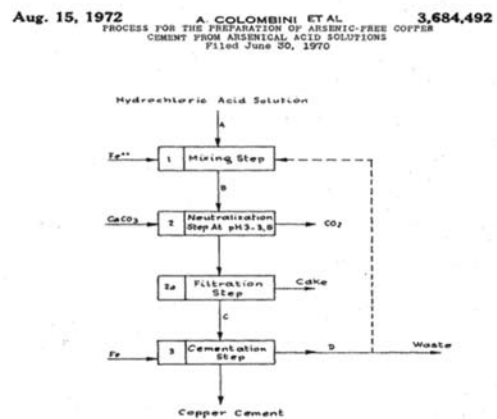


Figura 2. Diagrama de Flujo de Cementación de Cobre - A. Colombini.

A nivel nacional, se han realizado muchas experiencias de cementación de cobre, ejemplo de las aguas acidificadas del Túnel King Mill en Morococho, las que se efectuaron en la época de Cerro de Pasco y Centromín Perú, entre otros. (Lovera, 2005)

En las operaciones hidrometalurgias, principalmente en lixiviación de minerales polimetálicos, se generan efluentes que contienen valores recuperables de cobre y plata, dependiendo de la mineralogía del mineral. (Pérez, 2008)

Las alternativas de proceso técnico a considerarse pueden involucrar operaciones de extracción por solventes, adsorción mediante resinas de intercambio iónico y operaciones como el intercambio metálico o cementación del metal en solución mediante otro metal más activo.

Como la composición de las soluciones a tratar provienen de minerales polimetálicos, generalmente se recircula o se trata con agentes precipitante para todos los componentes indiscriminadamente

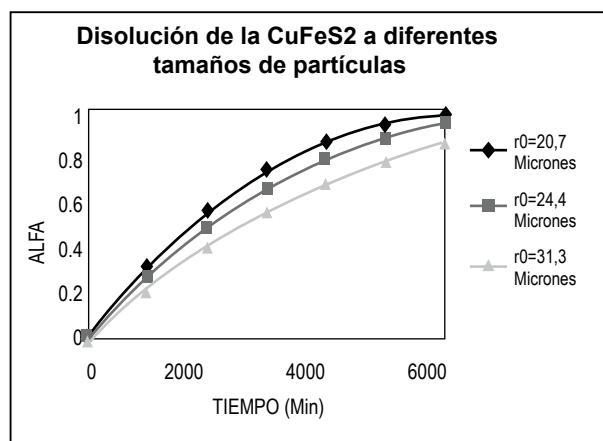


Figura 3. Curvas de Disolución de la Calcopirita a diferentes tamaños de partícula

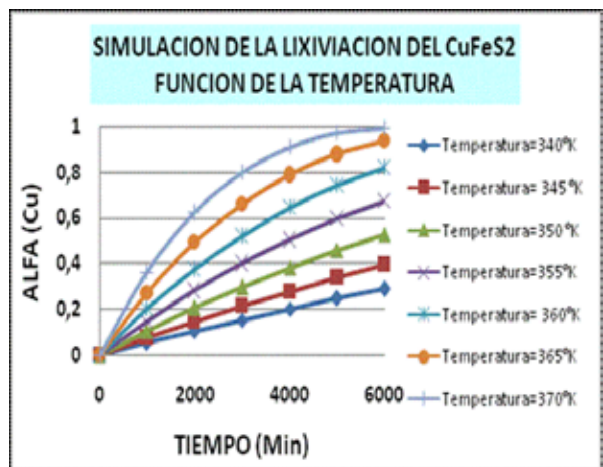


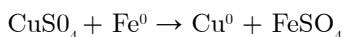
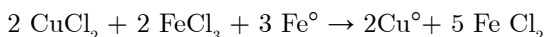
Figura 4. Curvas de Simulación de la lixiviación Disolución de la Calcopirita a diferentes temperaturas.

obteniendo, para nuestro caso, ricos cementos de cobre y plata.

La Lixiviación de minerales sulfurados con FeCl<sub>3</sub> con agente oxidante, el O<sub>2</sub> nos muestra buenas recuperaciones de iones cobre en función de variables de proceso (Tamaño de partícula, temperatura, entre otros). Ver figuras 3 y 4.

**1.2. Reacciones de cementación**

Las investigaciones desarrolladas en la cementación del cobre nos muestran las siguientes reacciones de cementación en los sistemas clorurante y sulfatante:



- a) El cemento de cobre de alta calidad tiene la ventaja de oxidarse rápidamente, mediante la formación de una película de óxido de cobre en la superficie, lo que favorece su disolución.
- b) La presencia de iones Fe<sup>++</sup> y aire producen iones Fe<sup>+++</sup> que ayudan a disolver el cobre metálico.
- c) La cinética de lixiviación de Cu<sup>0</sup> es incrementada sustancialmente con el aumento de la temperatura.

**II. METODOLOGÍA DE TRABAJO**

Para desarrollar la investigación presente, estaremos siguiendo lineamientos de investigación científica – tecnológica; en este caso, estuvimos aplicando al proyecto la metodología PMI, en la cual se tomaba en cuenta el Ciclo de vida del Proyecto (Procesos de iniciación, Procesos de Planificación, Procesos de Seguimiento y Control y Procesos de Cierre) y las áreas de Acción (Integración, Alcance, Tiempos, Costos, Calidad, Comunicación, Adquisición, Riesgos y Recursos Humanos). En la figura 5, podemos apreciar el ciclo de vida del proyecto y sus áreas de acción. La figura 6 nos muestra la secuencia de pruebas desarrolladas desde lixiviación hasta cementación. La figura 7 nos muestra la solución lixiviada con iones cobre, zinc, plata, hierro, entre otros.

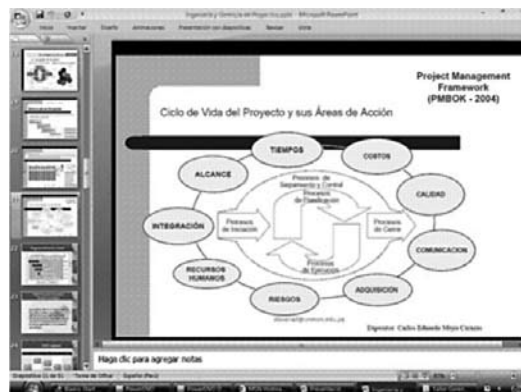


Figura 5. Ciclo de vida del proyecto y sus áreas de acción.



Figura 6. Secuencia de las pruebas desarrolladas, desde Lixiviación hasta Cementación.



Figura 7. Cementación de la solución cargada de iones cobre, zinc, plata, hierro.

### III. PRUEBAS EXPERIMENTALES

Las pruebas experimentales de desarrollaron siguiendo el diagrama de flujo propuesto por Fathi Habashi. Con equipos y reactivos del Laboratorio de Piro metalurgia de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica se efectuaron las corridas experimentales. Ver figuras 8 y 9.

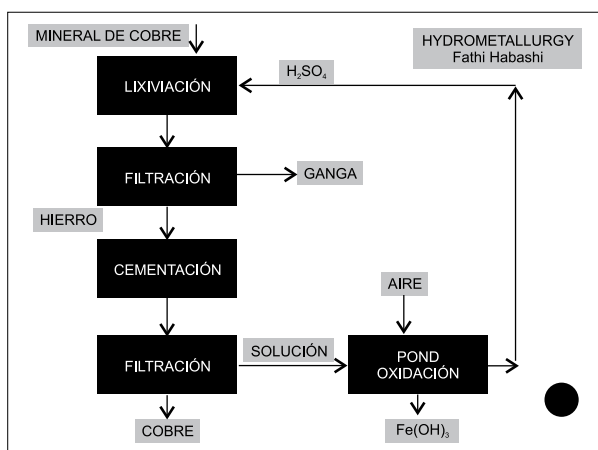


Figura 8. Diagrama de Flujo del Proceso de Cementación de minerales sulfurados de cobre.



Figura 9. Pruebas Experimentales de SX y Cementación de cobre.

### 3.1. Caracterización del mineral sulfurado

Se trabajó con un mineral de calcopirita sulfurada del Complejo Marañón. El análisis químico del mineral se muestra a continuación en la Tabla I:

Tabla I

% Cu	Ag ( oz/TM)	Au ( oz/TM)
4,27	1316	0,19

El análisis mineralógico de la muestra de mineral de cobre es la calcopirita, la cual se encuentra en gran porcentaje como partículas libres, así mismo está entrelazada con otros minerales que se encuentran en menor porcentaje.

MINERALES	VOLUMEN PORCENTUAL	GRADO DE LIBERACIÓN PORCENTUAL
Calcopirita	33.66	97.94
Pimutita	31.00	99.98
Esfalerita	4.43	80.93
Arsenopirita	0.65	93.46
Goetita	1.21	100.00
Pirita	1.28	71.09
Covelita	0.12	52.63
Galena	0.36	100.00
Gangas	27.29	99.67

Figura 10. Minerales presentes y su grado de liberación

Los minerales encontrados son: Calcopirita, Limonita, Covelita, Pirita, Galena Escalerita, Arsenopirita, Goetita, Gangas. (Quiñones, 2009)

### 3.2. Cementación de cobre

La cementación es un proceso de precipitación química que permite retirar iones en solución agregando un reactivo precipitante. En el caso de iones metálicos disueltos la reacción, se favorece agregando un metal más activo, según la serie electroquímica, como reactivo para formar un precipitado conocido como cemento. Este proceso se aplica en el tratamiento de efluentes de operaciones metalúrgicas. (Puente, 2002) (Calvo,1983)

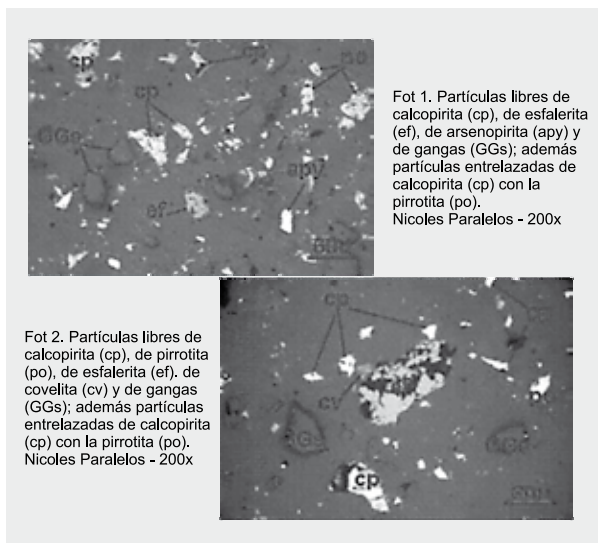


Figura 11. Microfotografías de minerales en Nicoles Paralelos - 200X.

**3.3. El modelo cinético de cementación**

La ecuación cinética del proceso de cementación es de la forma:

$$-dC/dt = K C^n \dots\dots\dots(1.0)$$

Donde K, n: son constante de la cinética del sistema.

Resolviendo la Ecuación (1.0) para una cinética de primer orden (n=1), obtenemos el modelo cinético de la cementación que nos permitirá hacer el tratamiento de los datos experimentales.

**Tipos geométricos de entrelazamientos de los minerales y sus posibilidades de liberación completa**

Muestra N.º: Mineral de cobre

Minerales entrelazados	Tipo entr.	Núm. Part.	Dist. Porc.	Posibilidades de liberación completa
Partículas libres		1608	97.63	
cp-ef	1af	11	0.67	Fácil
	1alf	5	0.30	Fácil
	1blf	1	0.06	Moderadamente Fácil
	1b/v	1	0.06	Moderadamente Fácil
	1ef	5	0.30	Muy difícil a imposible
cp-py	1af	2	0.12	Fácil
cp-po	1af	1	0.06	Fácil
	1bl	1	0.08	Moderadamente Fácil
	1blll	2	0.12	Moderadamente Fácil
py-po	1al	2	0.12	Fácil
cp-cv	1al	1	0.06	Fácil
py-GGt	1af	0	0.36	Fácil
apy-op-OGI	1alf	1	0.06	Fácil
<b>TOTAL</b>		<b>1647</b>	<b>100.0</b>	

Figura 13. Tipos Geométricos de Entrelazamientos de los minerales.

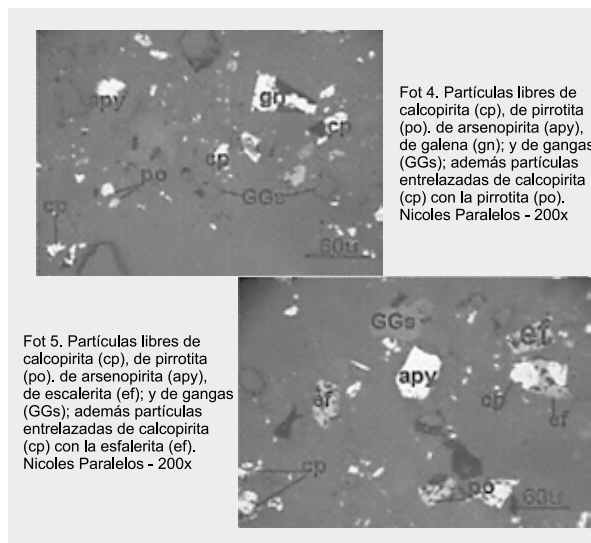


Figura 12: Microfotografías de minerales en Nicoles Paralelos - 200X.

$$C = C_0 \text{Exp} (- Kt) \dots\dots\dots(2.0)$$

Aplicando la Ecuación de Nernst para correlacionar el potencial de electrodo con la concentración podemos tener la siguiente expresión para hacer las transformaciones del potencial en Concentraciones de los iones:

$$V = K_1 * \log C \dots\dots\dots(3.0)$$

**3.4. Operación de cementación**

En laboratorio, se probó la cementación de cobre con chatarra ligera de hierro. La solución conteniendo cobre disuelto proviene de la lixiviación ácida de la muestra mineral sulfurado de cobre proveniente del Marañón. Para obtener mejores resultados, las muestras fueron previamente tostadas a baja temperatura (400 °C) por doce horas.

La concentración inicial de solución a cementar es de 3.33 g Cobre por litro.

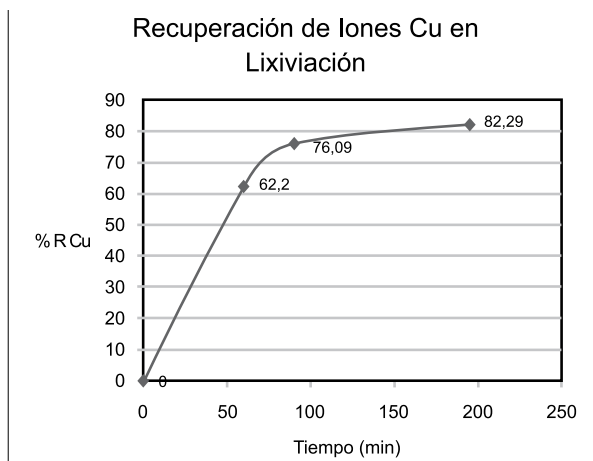


Figura 14. Curva de Recuperación de Cobre en Lixiviación.

La chatarra ligera de hierro se agregó en forma de partículas laminares con amplio exceso del necesario teórico.

La agitación fue constante y para la cinética del proceso se procedió a retirar muestras de la solución cada cierto tiempo, tal como se muestra en la figura 15.

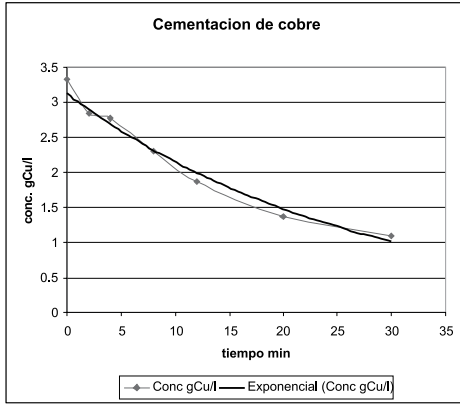


Figura 15. Data Experimental del proceso de Cementación del Cobre

Las pruebas experimentales de cementación de soluciones iónicas de cobre e iones presentes ( $Ag^{+1}$ ,  $Zn^{+2}$ ,  $Fe^{+2}$  entre otros) se muestran en las figuras 16, 17 y 18.

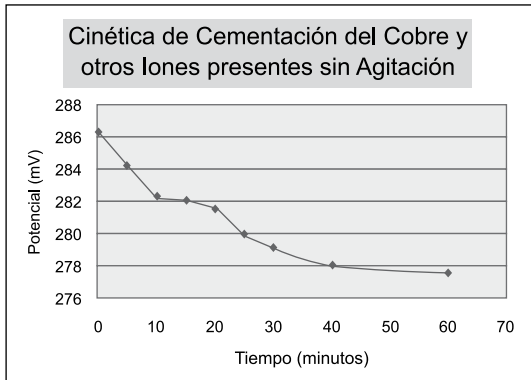


Figura 16. Cinética de Cementación de Cobre y otros iones presentes sin agitación.

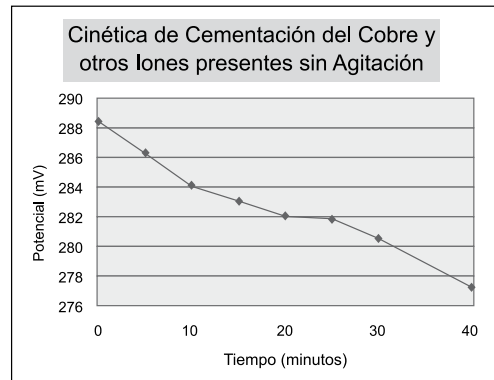


Figura 17. Cinética de cementación de cobre y otros iones presentes con agitación.

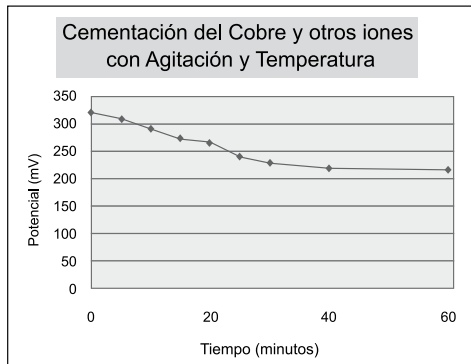


Figura 18. Proceso de Cementación del Cobre y otros iones presentes con agitación y temperatura.

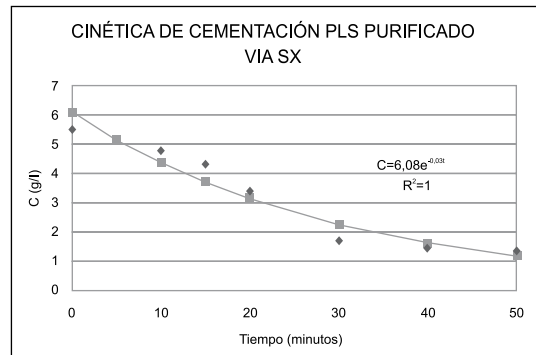


Figura 19. Simulación del proceso de cementación PLS purificados con SX.

A partir de soluciones PLS obtenidas de procesos de tostación, lixiviación y extracción con solventes, se han cementado con partículas de hierro, obteniéndose cementos de cobre de alta calidad. (Ver figura 19).

#### IV. SIMULACIÓN DEL PROCESO DE CEMENTACIÓN

Los datos, al ser procesados con las ecuaciones 1.0, 2.0 y 3.0, nos permiten encontrar el siguiente Modelo para la Cementación del Cobre purificado con el proceso de Extracción por Solventes (SX):

$$C = 6,08 \exp(-0,03t) \dots(4.0)$$

En la figura 19, podemos apreciar la simulación de los datos experimentales con el modelo encontrado.

#### V. CONCLUSIONES

- Se logran buenas recuperaciones de soluciones lixiviadas de minerales sulfurados.
- Los cementos encontrados están alrededor del 90 % en base cobre.
- La agitación y la temperatura mejoran la cinética de cementación, hasta un cierto nivel.

- Se logra encontrar modelos que caracterizan la cementación del cobre y los iones presentes, así como también del cobre en el PLS purificado vía SX.

## VI. AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Metalúrgica a nivel de pre y posgrado; al Vicerrectorado de Investigación, al Consejo Superior de Investigaciones - CSI y al Instituto de Investigación IIGEO de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos por el apoyo brindado al Proyecto de Investigación IIGEO - CSI - VRI N° 091601011. A la Minera CHAVINITA por facilitarnos de minerales y el apoyo técnico brindado.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Lovera et al. (2005). Caracterización fisicoquímica y pruebas metalúrgicas en la prospección de minerales polimetálicos en el Complejo Marañón - Perú. Revista del Instituto de Investigación FIGMMG. 8(16): 44-50.
- [2] Puente L. (2002). Precipitación química y adsorción en el tratamiento de efluentes conteniendo metales disueltos. Revista del Instituto de Investigación FIGMMG. 5(9).
- [3] Perez J.C. et al. (2008). Análisis termodinámico de especies cianuradas de oro, plata y cobre sometidas a cementación con zinc y aluminio. *Scientia et Technica*. XIV(38):155-160. Disponible en: <http://redalyc.vaemex.mx>.
- [4] Colombini A. et al. (1969). Process for the preparation of arsenic free copper cement from arsenical acid solutions. Patent N.° 3,684,492, USA.
- [5] Chew F. (1971). Copper - refining process. Patent N.° 3,630,722, USA.
- [6] Molina et al. (1971). Cementation process. Patent N.° 3,874,940, USA.
- [7] Parker W. (1966). Up-grading cement copper. Patent N.° 3,282,675, USA.
- [8] Keyes H. (1966). Copper recovery process. Patente N.° 3,288,599, USA.
- [9] Ministerio de Energía y Minas (MEM) - Perú. Producción Minera del Cobre 2008.
- [10] Quiñones J. Informe Microscopia Óptica del mineral sulfurado del Marañón, IIGEO-VRI-UNMSM. 2009.
- [11] Krivsky. (1966). Repined copper and process therefor. Patente 3,490,899, USA.
- [12] Calvo et al. (1983). Cementación de las soluciones del ion Tetrabrommercuriato. *Anales de Química*. 83: 390 – 393.