

# Biolixiviación de cobre a partir de minerales sulfurados con altos tenores de pirita y arsenopirita

## Bioleaching copper from sulphide ores with content high pyrite and arsenopyrite

Vladimir Arias A.<sup>1</sup>, Daniel Lovera D.<sup>1</sup>, Janet Quiñones L.<sup>1</sup>, Abad Flores P.<sup>2</sup>, Juan Gil R.<sup>3</sup>, Luis Ramírez<sup>3</sup>, Hans Cayo<sup>3</sup>

RECIBIDO: 20/10/2015 - APROBADO: 22/12/2015

### RESUMEN

El estudio fue realizado con cepas aisladas de drenaje ácido y consistió en procesamiento de sulfuros de cobre de alta mineralización que contenían principalmente 45.30 % de pirita y 13.12 % de arsenopirita. La biolixiviación fue realizada en matraces de 500 ml, donde se agregaron 300 ml de medio 9k, 30 ml de inóculo bacteriano (10% V/V) de  $7.05 \times 10^7$  Cell/ml y diversas cantidades de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . Se reguló el pH a 1.8 y se sometieron a agitación en plataforma con 150 RPM a temperatura ambiental de 20°C en promedio.

Los ensayos se realizaron en tres etapas sucesivas a diferentes concentraciones de sal ferrosa. En la primera etapa se obtuvo 72.64 % de cobre con 6 g/l de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  en 22 días. En la segunda etapa se logró 85.6 % de cobre en ausencia de la sal ferrosa, también se logra mayor crecimiento bacteriano con 15 g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  y 25.62 % de recuperación de cobre en 24 días de lixiviación; además, se determina la existencia de una relación directa entre el incremento de la densidad bacteriana y la recuperación de cobre a partir del mineral sulfurado. En la tercera etapa se logra recuperar 89.38% de cobre en ausencia de la sal ferrosa y en tan solo 20 días de biolixiviación.

**Palabras clave:** Biolixiviación, sulfuros de cobre, pirita, arsenopirita, cepas nativas.

### ABSTRACT

The study was conducted with isolated bacteria from acid drainage, it consisted of processing mineralization high copper sulphide containing mainly 45.30 % pyrite and 13.12% arsenopyrite. Bioleaching was conducted in 500 ml flasks, where 300 ml of medium was added 9k, 30 ml of bacterial inoculum (10% V/V) of  $7.05 \times 10^7$  Cell /ml and various amounts of  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . The pH was adjusted to 1.8 and subjected to platform agitation at 150 RPM and average temperature of 20 °C.

Assays were performed in three successive stages at different concentrations of ferrous salt. In the first stage 72.64 % copper was obtained with 6 g/l of  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  in 22 days. In the second phase 85.6 % copper was achieved in the absence of the ferrous salt, most bacterial growth is also achieved with 15 g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  and 25.62 % copper recovery in 24 days leaching; also determined the existence of a direct relationship between increasing bacterial density and recovery of copper from sulphide ore . In the third stage it is achieved 89.38 % copper recovered in the absence of ferrous salt and just 20 days of bioleaching.

**Keywords:** Bioleaching, copper sulphides, pyrite, arsenopyrite, native bacteria.

1 Grupo de Investigación, Lab. Biometalurgia, UNMSM. Emails: [variasa@unmsm.edu.pe](mailto:variasa@unmsm.edu.pe), [dloverad@unmsm.edu.pe](mailto:dloverad@unmsm.edu.pe), [lups@hotmail.com](mailto:lups@hotmail.com)

2 Lab. Microbiología, Fac. de Ciencias Biológicas. Email: [afloresp@unmsm.edu.pe](mailto:afloresp@unmsm.edu.pe)

3 Tesisistas integrantes del grupo de Biometalurgia. Emails: [sjuan\\_remi\\_12@hotmail.com](mailto:sjuan_remi_12@hotmail.com), [iquisramirez@gmail.com](mailto:iquisramirez@gmail.com), [hans.c.g@hotmail.com](mailto:hans.c.g@hotmail.com)

## I. INTRODUCCIÓN

Los problemas de impacto ambiental y altos costos operativos son reducidos mediante la aplicación de tecnologías limpias, siendo la biolixiviación una alternativa que ha venido ganando terreno en el tratamiento de minerales sulfurados de cobre y otros metales a partir de matriz sulfurada. La creciente demanda mundial por el cobre exige a la industria la optimización de procesos y el uso de tecnologías más limpias. La biolixiviación en pilas de sulfuros de baja ley se ha aplicado con éxito a la extracción de cobre (Gonzaga L., 2011).

En los últimos años, la aplicación de los métodos microbiológicos a la extracción de metales a partir de minerales, sin duda, ha ganado un rol prominente apoyado en los procesos de biolixiviación y biooxidación. Esta puede ser una de las razones para el auge de la investigación y sus resultados seguirán estimulando el desarrollo en el futuro (Donati. E and Sand .W., 2007).

### I.1. Antecedentes

La aplicación moderna de biominería solo se inició en la década de 1960 con la construcción y el riego de los vertederos para la recuperación de cobre en la mina Kennecott Bingham Canyon Copper, Utah, EE.UU. (Brierley, 2001). Desde la década de 1980, ha habido una gran expansión en el número de operaciones de lixiviación para la recuperación de cobre a partir de minerales de baja ley, y varias operaciones iniciaron en Chile (Chandra S., 2012) (Cochilco, 2009).

En la última década, el acoplamiento de lixiviación en vertedero, óxido de cobre, lixiviación en pilas y microbiología industrial ha dado el éxito de un proceso de lixiviación bioheap secundaria de cobre y sulfuros refractario minerales de metales preciosos (Corales y James, 2007).

En el Perú, la biolixiviación bacteriana, acompañada de lixiviación química, está siendo aplicada por la Southern Perú en sus unidades de Cuajone y Toquepala, sus licores son tratados en la planta de extracción por solvente y electrodeposición. Igualmente, en Cerro Verde – Arequipa, con resultados muy ventajosos.

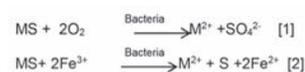
### I.2. Mecanismos de biolixiviación

Los mecanismos que tratan de explicar el proceso químico-biológico (Rodríguez Y., 2000) de la biolixiviación son el mecanismo directo, indirecto y ambos simultáneamente.

Según el primer mecanismo, la bacteria ataca al sulfuro metálico de forma directa, mediante su adherencia a la superficie mineral y la posterior oxidación enzimática de este por transporte de electrones desde la parte reducida del mineral, generalmente un sulfuro, al oxígeno disuelto (Álvarez M., 2005). La adherencia de bacterias al mineral es, por tanto, un requisito del mecanismo directo y la principal evidencia presentada en defensa del mismo (Jamanca G., 2014). Esta teoría ha sido apoyada por distintos estudios experimentales que confirman la adhesión de las bacterias biolixivantes a la superficie de los minerales (Acevedo, 2005).

En contraste con el mecanismo directo, el indirecto considera básicamente la acción de los iones férricos sobre el mineral sulfurado disolviéndolo (Wang J. et al, 2014). A

través de esta reacción química de lixiviación, se producen iones ferrosos y azufre elemental (Brand H., 2001). Finalmente, estas especies químicas son oxidadas biológicamente a hierro férrico e ion sulfato, respectivamente. Las ecuaciones que toman parte son las siguientes:



Paralelamente, la acción bacteriana cataliza la oxidación del ion ferroso y del azufre elemental, según las dos reacciones siguientes:



La hipótesis de partida del modelo es que los iones férricos y/o los protones son los únicos agentes –químicos– que disuelven al sulfuro. El mecanismo es, por tanto, de naturaleza simultánea. Las bacterias tienen las funciones de 1) regenerar los iones férricos y/o los protones y 2) concentrarlos en la interfase mineral/agua o mineral/célula bacteriana para favorecer y aumentar la degradación del mineral. Se postula que en esta capa tienen lugar los procesos químicos que llevan a la degradación del sulfuro. La catálisis del proceso en presencia de bacterias, en comparación con el proceso químico convencional, se explica por la alta concentración de agentes de lixiviación que se llega a alcanzar en la interfase citada (Sand W. et al, 1995). Este modelo no contempla la aparición de enzimas u otras sustancias biológicas que hasta la fecha no han sido detectadas (Acevedo F., 2005). Figura N° 1.

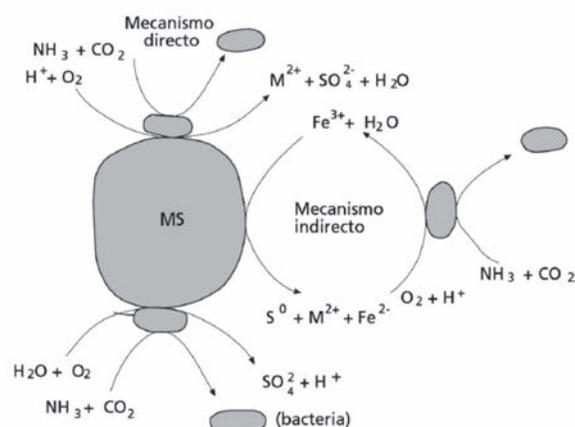


Figura N° 1. Mecanismos directo e indirecto de biolixiviación. Según Rodríguez Y, 2000.

## II. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Metodología de la investigación

El diseño, la implementación y el desarrollo de la investigación se realizó en el laboratorio de biometalurgia de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Metalúrgica, con la colaboración de estudiantes y docentes de las facultades de Ciencias Biológicas, Química e Ingeniería Química, habiéndose trabajado con muestra de mineral sulfurado con tenores en cobre, oro y plata, principalmente.

## 2.2. Laboratorios de experimentación

Los ensayos se realizaron en los ambientes del Laboratorio de Biometalurgia de la E.A.P de Ingeniería Metalúrgica, Laboratorio de Microbiología Ambiental de la Facultad de Ciencias Biológicas y en el Laboratorio de Microscopía Óptica de la E.A.P de Ingeniería Geológica; todos ambientes de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

## 2.3. Equipos de prueba

Los equipos con que cuenta el Lab. de Biometalurgia son: agitadores de plataforma Digisystem DSR-2800D, con control digital de velocidades de 0 a 240 RPM y control de tiempo de 1 minuto a 99 horas; también un agitador Shaker Gemmy industrial Corp-modelo VRN-480, con control digital de tiempo y velocidades. El recuento biológico se ha realizado en un microscopio biológico binocular Carl Zeiss de campo claro. La caracterización mineralógica de las muestra se ha realizado en un microscopio de luz polarizada por el método de reflexión. La determinación analítica elemental: por vía clásica, espectrometría de absorción atómica y espectrometría de plasma inducido, se llevó a cabo mediante servicio del sector privado. Demás materiales de vidrio, como vasos, matraces, tubos de ensayo, pipetas, probetas, baguetas, etc., son materiales pertenecientes al Laboratorio de Biometalurgia.

gico se ha realizado en un microscopio biológico binocular Carl Zeiss de campo claro. La caracterización mineralógica de las muestra se ha realizado en un microscopio de luz polarizada por el método de reflexión. La determinación analítica elemental: por vía clásica, espectrometría de absorción atómica y espectrometría de plasma inducido, se llevó a cabo mediante servicio del sector privado. Demás materiales de vidrio, como vasos, matraces, tubos de ensayo, pipetas, probetas, baguetas, etc., son materiales pertenecientes al Laboratorio de Biometalurgia.

## 2.4. Plan del procedimiento experimental

En la Figura N° 2 se muestran las etapas del procedimiento experimental seguido en el laboratorio, para desarrollar las pruebas de biolixiviación.

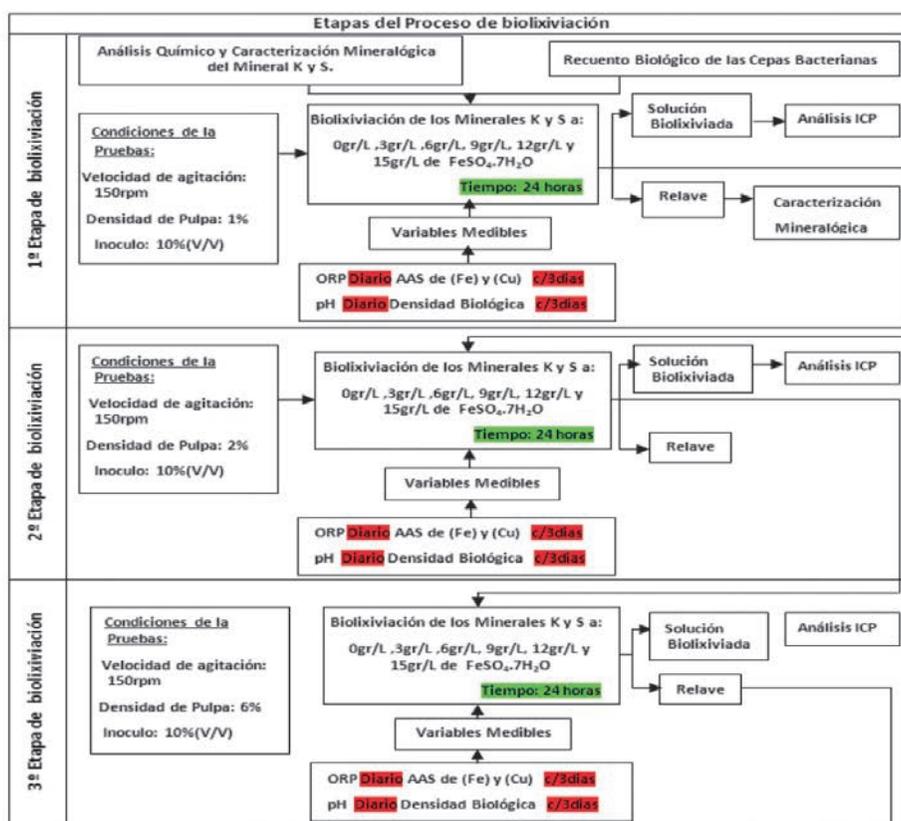


Figura N° 2. Diagrama del procedimiento experimental

## 2.5. Análisis del mineral

Realizado a partir de una granulometría de 82%-200 mallas.

De los análisis químicos, se observa que el mineral contiene mayores cantidades de minerales sulfurados y férricos, posteriormente se ha realizado la mineralogía para determinar dichos compuestos mineralógicos. Ver Tabla N° 1

Tabla N° 1. Composición química del mineral

Au	As	Cu	Fe	S
g/t	%	ppm	%	%
13.9	9.37	7389	22.69	20.38

## III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Pruebas de biolixiviación

Las pruebas de biolixiviación se han realizado en 3 etapas secuenciales, con 1, 2 y 6 % (W/V) de mineral sulfurado, teniendo como sustrato soluciones de 9K modificado en su contenido de sulfato ferroso (FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O). La agitación ha sido constante a 150 RPM y a temperatura promedio de 20.5 °C y un pH de 1.8.

Se realizaron mediciones constantes de potencial óxido reducción (ORP) y pH y muestreos periódicos de solución para determinar contenido de cobre y hierro. Al final de cada etapa se ha analizado la solubilidad del arsénico, hierro y azufre mediante análisis de ICP.

### 3.2. Primera etapa de biolixiviación

El licor utilizado o sustrato de biolixiviación fue el medio 9K  $-(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  (3.00 g/l), KCl (0.100 g/l),  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  (0.500 g/l),  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (0.500 g/l),  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  (0.01 g/l)- variando las concentraciones de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  entre 0.00 a 15.00 g/l.

Los ensayos se realizaron utilizando matraces de 500 ml, donde se agregaron 3 gramos de mineral (1% W/V), 30 ml de inóculo bacteriano (10% V/V) de  $7.05 \times 10^7$  Cell/ml y 300 ml de medio 9k y cantidades de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  equivalentes a 3, 6, 9, 12 y 15 g/L. Se reguló el pH a 1.8 con solución de ácido sulfúrico y posteriormente se dio inicio a la biolixiviación a 150 RPM. La dosis óptima de iones ferrosos para la lixiviación de los sulfuros, como la pirita y calcopirita, difiere en función de la naturaleza del mineral (Pradhan N. et al, 2007) (Ying-bo D. et al, 2013). Figura N° 3.

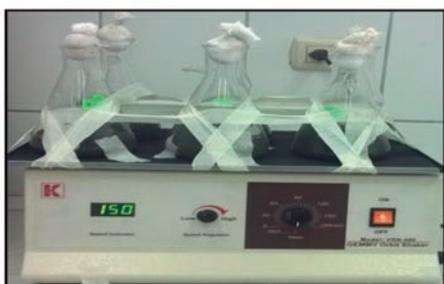


Figura N° 3. Inicios de la primera etapa de biolixiviación, a diferentes concentraciones de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .

#### 3.2.1. Efecto en el crecimiento bacteriano

La variación del crecimiento bacteriano durante la biolixiviación es identificada en función de la concentración de la sal férrica, observándose mayor incremento del crecimiento aproximadamente a los 10 días de iniciado el proceso y en los días 21 al 24 se da el quiebre en el crecimiento, con la tendencia de mantenerse constante e indicando la finalización de la etapa. La máxima densidad bacteriana alcanzada hasta los 24 días fue de  $4.75 \times 10^7$  Cell/ml con 6 g/l de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  llegando al 67 % del inóculo. Ver Figura N° 4.

La metodología comúnmente empleada en los procesos de biolixiviación incluye la adaptación de la bacteria (*A. ferrooxidans*) a la presencia de iones metálicos pesados, que consiste en cultivos sucesivos en los cuales los microorganismos se reproducen progresivamente y a su vez se incrementa la concentración de iones metálicos (Douglas E., 2005) (Juan David O. y Col., 2012).

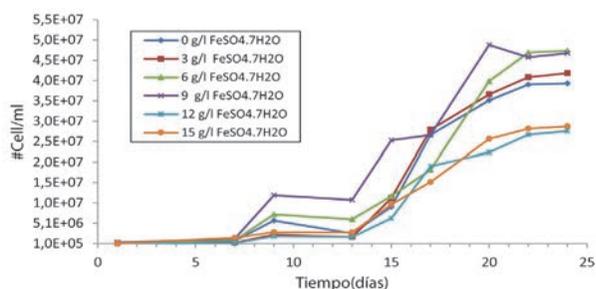


Figura N° 4. Incremento de la densidad bacteriana durante la primera etapa de biolixiviación

#### 3.2.2. Recuperación de cobre

Los minerales polimetálicos de cobre contienen componentes como la esfalerita, pirrotita, galena y compuestos de plata que dificultan su recuperación por múltiples factores (Yu-guang W. et al 2014) (Erika Mejía y col 2014). La Figura N° 5 muestra el incremento en la disolución del cobre, obteniéndose un máximo y mínimo de 72.64% con 6 g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  y 30.96 % con 15 g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  respectivamente, durante los primeros 15 días y a 0 y 3 g/l de concentraciones de la sal férrica, las recuperaciones superan el 50 %. Se determina la existencia de una relación directa entre el incremento de la densidad bacteriana y la recuperación de cobre a partir del mineral sulfurado.

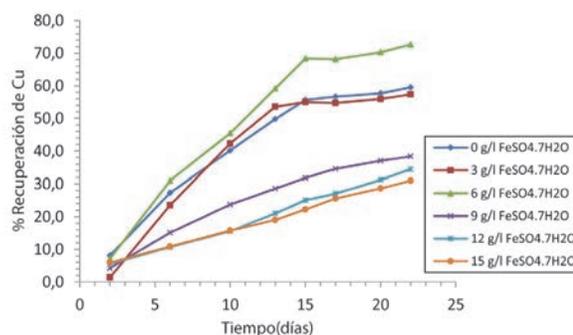


Figura N° 5. Recuperación de cobre durante la primera etapa de biolixiviación

#### 3.2.3. Concentración de hierro total en solución de biolixiviación

Teniendo en cuenta las características del mineral, con abundantes especies sulfuradas (pirita, arsenopirita y calcopirita) proveedores de hierro y, por otro lado, la adición de sulfato ferroso al sustrato, es de esperarse el incremento de la concentración de hierro total (Fe) dado por la solubilidad de las especies presentes, alcanzando concentraciones de hasta 3450 ppm de hierro total en el medio de lixiviación, con tendencia a mantenerse constante a periodos mayores de 15 días aproximadamente. Figura N° 6

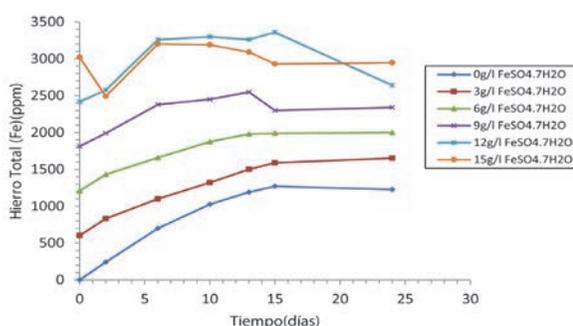


Figura N° 6. Concentración de hierro total durante la primera etapa

### 3.3. Segunda etapa de biolixiviación

El licor utilizado o sustrato de biolixiviación fue el medio 9K, variando las concentraciones de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . Los ensayos se realizaron utilizando matraces de 500 ml, donde se agregaron 6 gramos de mineral (2% W/V), 30 ml de inóculo bacteriano (10% V/V) y 300 ml de medio 9k y cantidades de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  equivalentes a 0, 3, 9 y 15 g/L. Se reguló el pH a 1.8, con solución de ácido sulfúrico y se continúa el

proceso a una agitación constante de 150 RPM. El inóculo es obtenido de la primera etapa, teniendo en consideración su adaptación biológica al mineral. Los parámetros de control son los mismos respecto a la primera etapa.

**3.3.1. Efecto en el crecimiento bacteriano**

Realizado con un inóculo cuya densidad bacteriana fue de  $4.75 \times 10^7$  Cell/ml. Aproximadamente a los 3 días de iniciado la biolixiviación empieza el crecimiento exponencial, 8 días después aprox. se aprecia la variación con tendencia a mantenerse constante, alcanzando un valor promedio de  $4.38 \times 10^7$  Cell/ml. Es preciso advertir que en esta etapa se logra reducir el periodo de crecimiento exponencial en alrededor de 5 días, ya que el inicio del crecimiento exponencial en la primera etapa se dio a los 10 días. Para esta etapa se observa que a 0 g/l  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  se logra una concentración máxima de  $4.41 \times 10^7$  Cell/ml respecto a las demás concentraciones. Ver figura N° 7.

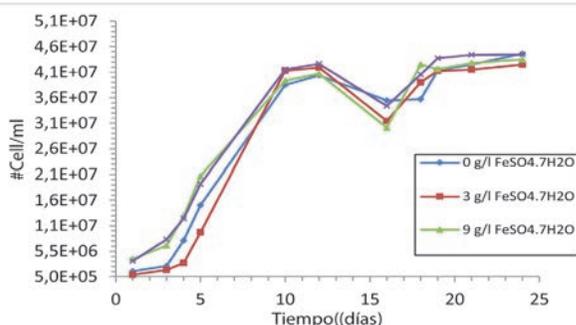


Figura N° 7. Incremento de la densidad bacteriana durante la segunda etapa de biolixiviación

**3.3.2. Recuperación de cobre**

En todos los casos se observa un incremento casi lineal, con mayor recuperación (85.6%) en ausencia de la sal férrica en el licor de biolixiviación, a diferencia de la etapa anterior (59.45%). Figura N° 8.

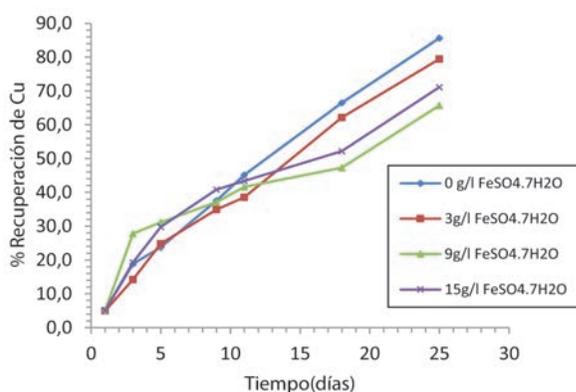


Figura N° 8. Recuperación de cobre durante la segunda etapa de biolixiviación

**3.3.3. Concentración de hierro total en solución de biolixiviación**

Se ha observado un incremento lineal de las concentraciones de hierro en solución como resultado de la biolixiviación de los minerales sulfurados con contenido de hierro. Por

ejemplo, a 0 g/l en la primera etapa se ha logrado una concentración máxima de 1225.98 ppm, mientras en la segunda etapa se ha alcanzado una concentración máxima de 2711.21 ppm. Figura N° 9.

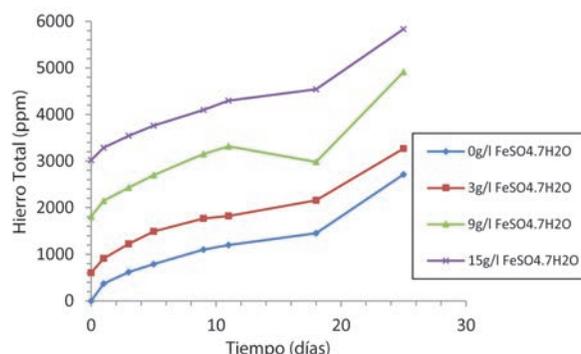


Figura N° 9. Concentración de hierro total durante la segunda etapa

**3.4. Tercera etapa de biolixiviación**

Los ensayos se realizaron utilizando matraces de 500 ml, donde se agregaron 18 gramos de mineral (6% W/V), 30 ml de inóculo bacteriano (10% V/V) y 300 ml de medio 9k y cantidades de  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  equivalentes a 0, 2, 4 y 6 g/L. Se reguló el pH a 1.8 con solución de ácido sulfúrico y se continúa el proceso a una agitación constante de 150 RPM. El inóculo es obtenido a partir de la solución de la etapa anterior.

**3.4.1. Efecto en el crecimiento bacteriano**

Se consigue incrementar la densidad bacteriana. Teniendo como soporte el inóculo de la etapa anterior, cuya población bacteriana fue de  $4.41 \times 10^7$  Cell/ml, observándose un comportamiento similar para todas las concentraciones de  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ , Iniciando la fase exponencial al día 8, se ha obtenido una densidad biológica máxima de  $6.30 \times 10^7$  Cell/ml en ausencia de la sal férrica, superando a la concentración del inóculo en 42 %, en comparación con la segunda etapa. Figura N° 10.

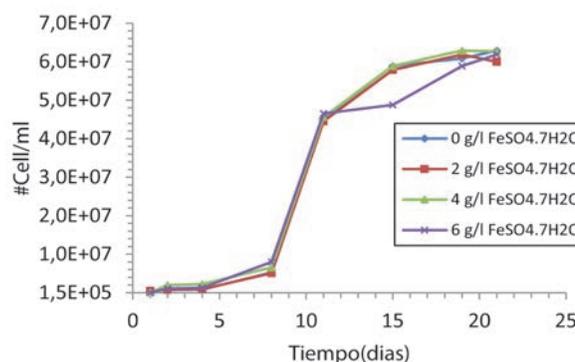


Figura N° 10. Incremento de la densidad bacteriana durante la tercera etapa de biolixiviación

**3.4.2. Recuperación de cobre**

El uso secuencial de la bacteria ha permitido alcanzar 89.38% de recuperación de cobre en tan solo 20 días de lixiviación y en ausencia de la sal de hierro. Figura N° 11.

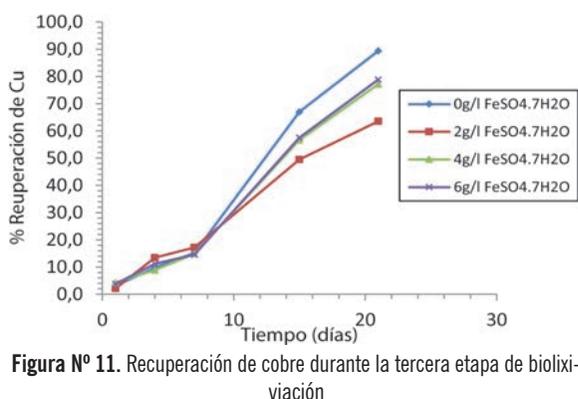


Figura N° 11. Recuperación de cobre durante la tercera etapa de biolixiviación

**3.4.3. Concentración de hierro total en solución de biolixiviación**

La tendencia lineal en el incremento de la concentración de hierro total en ausencia de FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O es mayor en aproximadamente 25% respecto a la segunda etapa, considerando que en esta tercera etapa la concentración de pulpa es de 6% de sólidos. Figura N° 12.

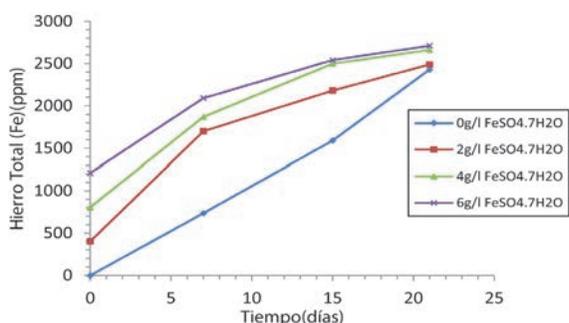


Figura N° 12. Concentración de hierro total durante la tercera etapa

**3.5. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA**

Las muestras fueron estudiadas a partir de secciones pulidas, identificándose los principales constituyentes minerales, el volumen porcentual y el grado de liberación.

**3.5.1. Identificación de especies minerales**

El estudio mineralógico de las muestras se ha realizado mediante el microscopio de luz polarizada por el método de reflexión, para lo cual previamente se han preparado las secciones pulidas y a partir de esta se han caracterizado y determinado las especies mineralógicas que conforman en cada muestra. La caracterización de este mineral se muestra en la Tabla N° 2.

**3.5.2. Distribución y grado de liberación**

Se determina el volumen de cada componente en la muestra de mineral y el % liberado del mismo. La pirita ocupa el 45.30 % del volumen total de la muestra, de este volumen el 95.60% se halla libre. La calcopirita ocupa el 1.90 % del volumen total de la muestra, de este volumen el 84.21% se halla libre, mientras que el 15.79% restante se encuentra aún entrelazado. La arsenopirita ocupa el 13.12 % del volumen total de la muestra, de este volumen el 93.90% se halla libre, mientras que el 6.10% restante se encuentra aún entrelazado. El oro se encuentra entrelazado y, por lo general, no es visualizado. Figura N° 13.

**3.5.3. Mineralogía del mineral tratado**

El objetivo de esta prueba es dar a conocer el cambio físico de las especies minerales por efecto de la biolixiviación, como también la liberación del oro que se encuentra encapsulado o entrelazado en las especies minerales presentes, siendo material de estudio los residuos generados en la primera etapa de biolixiviación.

Tabla N° 2. Distribución de especies minerales contenidos en el mineral inicial y del mineral residual o relave de la primera etapa de biolixiviación

Minerales	Fórmula	Abrev.	Mineral de cabeza		Mineral tratado	
			% Volumen	% Liberación	% Volumen	% Liberación
Pirita	FeS <sub>2</sub>	py	45.30	95.06	44.10	97.06
Arsenopirita	AsFeS <sub>2</sub>	apy	13.12	93.90	13.62	94.90
Calcopirita	CuFeS <sub>2</sub>	cp	1.90	84.21	1.90	82.23
Esfalerita	SZn	ef	8.90	79.28	10.67	80.18
Goetita	FeO.OH	gt	0.20	100.00	0.10	100.00
Galena	PbS	gn	3.69	71.20	3.60	76.20
Boulangerita	Pb <sub>3</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>11</sub>	boul	1.15	76.90	1.15	74.90
Enargita	---	en	0.12	0.00	0.11	0.00
Covelita	CuS	cv	0.06	0.00	0.00	0.00
Oro	Au	Au	0.01	0.00	0.01	100.00
Tenantita	Cu <sub>3</sub> As <sub>3,25</sub>	tn	0.95	85.10	1.25	95.10
Gangas	---	GGs	24.60	97.50	23.51	97.50

### 3.5.4. Identificación de especies en la muestra tratada

Se logran identificar todas las especies visualizadas en el mineral de cabeza, con porcentajes significativos de pirita, arsenopirita y ganga; todas entrelazadas geoméricamente en razón de los mecanismos de cristalización.

### 3.5.5. Distribución y grado de liberación en muestra tratada

Se determina el volumen de cada componente en la muestra de mineral tratado y el % liberado del mismo. La pirita ocupa el 44.10 % del volumen total de la muestra, de este volumen el 97.06% se halla libre. La calcopirita ocupa el 1.90 % del volumen total de la muestra, de este volumen

el 82.23% se halla libre, mientras que el 17.77% restante se encuentra aún entrelazado. La arsenopirita ocupa el 13.62 % del volumen total de la muestra, de este volumen el 94.90% se halla libre, mientras que el 5.10% restante se encuentra aún entrelazado. El oro ocupa el .01% del volumen total de la muestra, de este volumen el 100% se encuentra libre. En la micrografía A de la Figura N° 15 se observa la partícula de oro libre, del cual podemos deducir la liberación producto de la oxidación biológica, como también se muestran fisuras y cambios en las demás especies mineralógicas. Figura N° 14.

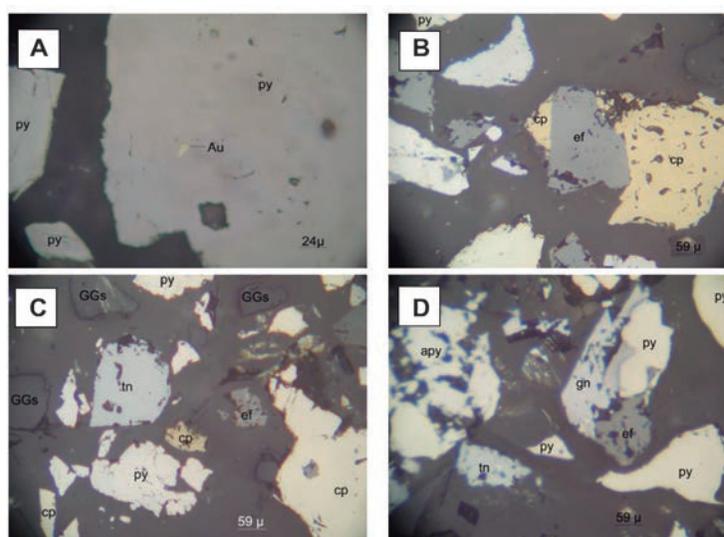


Figura N° 13. Micrograffas

- A: Partículas libres de pirita (py) y entrelazadas de pirita (py) y oro (Au). 500X  
 B: Partículas libres de pirita (py), esfalerita (ef) partículas entrelazadas de calcopirita (cp) y esfalerita (ef). 200X  
 C: Partículas libres de pirita (py), calcopirita (cp), gangas (GGs) y tenantita (tn) y partículas entrelazadas de calcopirita (cp) y gangas (GGs). 200X  
 D: Partículas libres de pirita (py), arsenopirita y tenantita (tn) y partículas entrelazadas de pirita (py), esfalerita (ef) y galena (gn). 200X

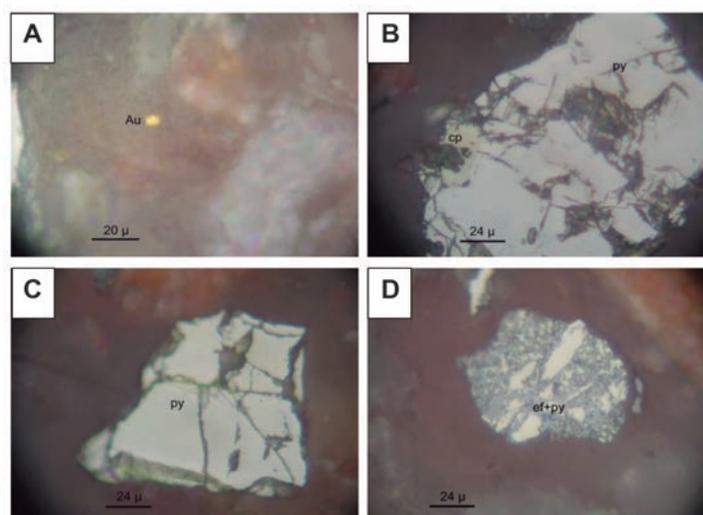


Figura N° 14

- A: Partículas libres de oro (Au). 500X.  
 B: Partícula entrelazada de calcopirita (cp) con la pirita (py). 500X.  
 C: Partícula libre de pirita (py). 500X.  
 D: Partícula entrelazada de esfalerita (ef) con la pirita (py). 500X.

#### IV. CONCLUSIONES

El estudio abordado nos permitió adquirir conocimientos y obtener resultados con miras de su aplicación a una escala de pilotaje y su exploración en diversas muestras de minerales sulfurados que contienen cobre y otros metales base y que presenten factibilidad al proceso de extracción.

El alto crecimiento bacteriano alcanzado en sustratos con determinada cantidad de hierro no garantiza el logro de un óptimo proceso catalítico durante el enfrentamiento a minerales sulfurados, menos la mejor recuperación de cobre.

La concentración óptima de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  en la primera etapa de biolixiviación fue de 6g/l de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . La máxima recuperación de Cu (72.64%) se alcanzó en 22 días.

En la segunda y tercera etapa de biolixiviación se consigue incrementar la disolución de Fe y otros elementos como producto de la oxidación biológica favorable, con degradación de las especies minerales y favoreciendo la liberación de especies valiosas como el oro y la plata, presentes en el mineral.

#### V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Vicerrectorado de Investigación, que, a través del Consejo Superior de Investigaciones, financió la realización de este Proyecto Multidisciplinario PMI 2014L02, asimismo a los participantes de la Facultad de Ciencias Biológicas y de la Facultad de Química e Ingeniería Química por sus aportes de materiales y equipos para el desarrollo de la prácticas, igualmente a cada uno de los integrantes del grupo de estudio en biotecnología metalúrgica, por su entrega en la realización de las tareas que implicaron la consecución de los resultados.

#### VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acevedo F., Gentina J. C. 2005. Biolixiviación de minerales de cobre. In: Fernando Acevedo y Juan Carlos Gentina (Editores). Fundamentos y Perspectivas de las Tecnologías Biomineras. p 14-43.
2. Alvarez M. T. (2005). Microbial Treatment of heavy metal leachates. Doctoral tesis. Suecia.
3. Chandra S. Ghan, Haragobinda S., Dong-J. Kim, 2012. Biohydrometallurgy and Biomineral Processing Technology: A Review on its Past, Present and Future. Research Journal of Recent Sciences .Vol. 1(10), PP.85-99.
4. Cochilco. Comisión Chilena de Cobre, 2009. Biolixiviación: Desarrollo actual y su expectativas. PP. 1-27.
5. Donati E. and Sand Wolfgang. (2007). Microbial Processing of Metal Sulfides. Published by Springer. The Netherlands. 314 pgs.
6. Douglas E. Rawlings, 2005. Characteristics and adaptability of iron- and sulfur-oxidizing microorganisms used for the recovery of metals from minerals and their concentrates. Microbial Cell Factories.2005, 4:13 Pág.2-7.
7. Erica Mejía, Laura Osorno y Juan Ospina, (2014). Microorganismos Hierro-Azufre Oxidantes. Una Alternativa Biotecnológica. Revista CINTEX, Colombia. Vol. 19, pp. 63-77.
8. G. Jamanca Lino y V. Arias Arce (2013). Aislamiento de Acidithiobacillus Ferrooxidans y su aplicación a sulfuros mixtos. Congreso Internacional, V Latinometalurgia. Cuzco, Perú
9. Gonzaga L. at el (2011). Biohydrometallurgical Processes: A practical approach. Centre for mineral technology – CETEM, Ministry of science, technology and innovation – MCTI. Rio de Janeiro, Brasil
10. R.H. Lara, J.V. García-Meza y I. González, (2012). Correlación entre el tipo de fases secundarias y la estructura de las biopelículas de la bacteria sulfurooxidante acidithiobacillus thiooxidans durante la biooxidación de pirita y calcopirita. XXI Congreso Internacional de Metalurgia Extractiva. México.
11. Wang Jun, Zhu Shan, et al, 2014. Bioleaching of low grade copper sulfide ores by Acidithiobacillus ferrooxidans and Acidithiobacillus thiooxidans. J. Cent. South Univ. 21: 728-734.
12. Ossa M. 2004. Biolixiviación de sulfuros (pirita-arsenopirita) utilizando cepas nativas de acidófilos como pretratamiento, para el beneficio de metales preciosos, mina El Zancudo, Titiribí, Antioquia. Tesis de Maestría, Biotecnología. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias.
13. N. Pradhan , K.C. Nathsarma, K. Srinivasa Rao, L.B. Sukla, B.K. Mishra, 2008. Heap bioleaching of chalcopirite. Elsevier . Minerals Engineering 21, PP.355–365.
14. Rodríguez, Y., 2000. Tesis Doctoral: “Contribución al estudio del mecanismo de biolixiviación de distintos sulfuros metálicos con bacterias mesófilas y termófilas”. Universidad Complutense, Madrid, España.
15. Brandl, H., 2001. Microbial leaching of metals. In: Rehm, H.J., Reed, G. (Eds.), Biotechnology, . In: Special Processes, vol. 10, pp. 191–224.
16. Deveci H. 2004. Effect of particle size and shape of solids on the viability of acidophilic bacteria during mixing in stirred tank reactors. Hidrometallurgy, Vol. 71. 385-396.
17. Sand, W., Gehrke, T., Hallmann, R., 1995. Sulfur chemistry, biofilm, and the (in) direct attack mechanism a critical evaluation of bacterial leaching. Appl. Microbiol. Biotechnol. 43, 961–966.
18. Luis G., Debora, M., Carlos E. G. 2011. Biohydrometallurgy Processes: a Practical approach.1:6-7
19. Ying-bo Dong, et al, 2013. Bioleaching of two different types of chalcopirite by Acidithiobacillus Ferrooxidans. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials Volume 20, Number 2, February 2013, Page 119
20. Juan David O. y Col. 2012. Biooxidation of arsenopyrite concentrates by Acidithiobacillus ferrooxidans in shake flasks. Rev. Colomb. Biotecnol. Vol. XIV No. 1 page 135-145
21. Yu-guang Wang et al , 2014. Optimization of copper extraction for bioleaching of complex Cu-polymetallic concentrate by moderate thermophiles. ELSEVIER Science Press. Trans. Nonferrous Met. Soc. China 24 1161-1170.

## NORMAS EDITORIALES DE LA REVISTA

La Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica (RIIGEO) de la UNMSM es el órgano de difusión científica. En ella se publican trabajos inéditos, notas breves y artículos de revisión. Toda contribución debe corresponder a un trabajo original; la opinión y conceptos expresados en los artículos son de responsabilidad exclusiva de los autores. El Comité Editorial estudiará cada artículo y decidirá sobre la conveniencia de su publicación. En algunos casos podrá aceptar el artículo con algunas modificaciones o podrá sugerir la forma más adecuada para su nueva presentación.

**Trabajos Inéditos.** Son artículos primarios que exponen los resultados de trabajos de investigación y constituyen aportes al conocimiento. Debe contener las siguientes partes: Título, autores, resumen (en inglés y español), palabras clave (en inglés y español), introducción, material y métodos, resultados, conclusiones, agradecimientos y referencias bibliográficas.

**Notas Breves.** Son los resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica sobre un tema específico de interés para la comunidad, recurriendo a fuentes originales. Debe tener las siguientes partes: Título, autores y resumen (en inglés y español), palabras clave (en inglés y español), cuerpo de la nota y la referencia citada.

**Artículos de Revisión.** Es el documento resultado de la investigación, en la cual se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones publicadas sobre un tema específico, derivadas de tesis de grado, libros recientes y recapitulaciones de avances y tendencias de desarrollo. Debe contener las siguientes partes: Título, autores, resumen (en inglés y español), palabras clave (en inglés y español), introducción, cuerpo de la revisión, discusión, agradecimientos y referencias bibliográficas.

### PRESENTACIÓN Y ACEPTACIÓN DE ARTÍCULOS

Se presentará el artículo impreso con su respectivo CD a la dirección del Instituto de Investigación (IIGEO), adjuntando dirección, correo electrónico y teléfono del autor, quien adquiere el compromiso de no enviarlo simultáneamente a otras publicaciones. Los trabajos serán enviados a los árbitros anónimos que designe el Comité Editor. Las opiniones y sugerencias emitidas por estos serán transmitidas a los autores a fin de ser tomadas en cuenta.

Los artículos seleccionados para su publicación pasan al sistema de comunicación e información de la Universidad, sin ningún tipo de retribución económica o compensación para con el autor o autores del artículo. Una vez impreso, el autor principal podrá solicitar dos ejemplares de la revista.

### EXTENSIÓN Y ORGANIZACIÓN

Los artículos inéditos y artículos de revisión deben contener un máximo de 15 páginas, incluyendo referencias e ilustraciones, digitadas a doble espacio en formato A4 con letra Times New Roman N.º 11. Como nota breve, se aceptarán hasta 8 páginas digitadas a doble espacio, incluyendo como máximo dos ilustraciones.

Todo trabajo debe incluir las siguientes partes:

1. **Título.** Debe tener el menor número posible de palabras y expresar de manera concisa el contenido del trabajo de investigación.
2. **Autor(es).** Debe contener nombres y apellidos de los autores. La dirección institucional y correo electrónico se anexará en la primera hoja como pie de página.
3. **Resumen.** Se presentará en uno o dos párrafos y en no más de 200 palabras. Debe indicar en forma clara el problema, los procedimientos y los resultados de la investigación. Debe ser conciso, informativo y adelantar los resultados dados en el texto. Para facilitar su inclusión en índices y bases de datos bibliográficos, se debe agregar por lo menos cinco palabras clave. Tiene que estar traducido al inglés.
4. **Texto principal.** Descrito en forma clara, directa y concisa como realizó el trabajo de investigación, ilustrado con tablas y figuras. Para su mejor comprensión, el texto deberá ser dividido en secciones encabezadas por subtítulos. Existen tres niveles jerárquicos de subtítulos: el primero va en mayúsculas y negrita, el segundo en negritas y minúsculas, y el tercero en cursivas; todos ellos alineados a la izquierda, ordenados con números romanos y arábigos, respectivamente. Las fórmulas y ecuaciones que contengan deberán ser generadas por editores de ecuaciones actualizados.
5. **Referencias.** Contiene la lista de todos los trabajos citados en el texto. Se hará en orden alfabético,

por apellidos de los autores. No olvidar que solo van los autores citados en el texto.

6. **Ilustraciones.** Estas comprenden figuras y tablas. Entre las figuras están las imágenes, gráficos y diagramas; deben ser originales, con la numeración arábica y descripción fuera de ella. Si fuera el caso, deberán tener una resolución de 300 dpi como mínimo y grabadas con las extensiones JPG, CDR o TIFF. Las tablas incluyen cuadros y listas. Estas no se reprocesarán, por lo tanto deben elaborarse y presentarse impresas en excelente calidad y listas para su reproducción. Los costos de las ilustraciones a color serán asumidos por el autor.
7. **Nota de pie de página.** Contiene las llamadas de atención que el investigador hace en su trabajo para indicar la fuente o procedencia literal de los datos y para aclarar o explicar una idea.

#### **CITACIÓN DE REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Las referencias deben ser pertinentes al artículo y tendrán la estructura según el estilo APA. A continuación presentamos los siguientes modelos.

##### **Publicación periódica:**

Benavides V. (1999). Estratigrafía Preterciaria de la Región de Arequipa. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, T. 38, pp: 55-63.

##### **Libro:**

Smith, H. y Mc Cabe, R. (2006). *Operaciones unitarias en Ingeniería Metalúrgica*. México: Reverte.

##### **Publicación colectiva:**

Vicente, J. C. (2008). Elementos de estratigrafía mesozoica sur-peruana. En W. Volkheimer y E. Musacchio (eds.). *Cuencas sedimentarias del Jurásico y Cretácico*. Vol. 1, pp. 319-351. Buenos Aires: Comité Sudamericano del Jurásico y Cretácico.

##### **Tesis:**

Alejandro, V. (2010). *Contribución a los Estudios Petrográficos del Magmatismo Meso-Cenozoico de los Andes Centrales* (Sur del Perú). Tesis de ingeniero geólogo. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

##### **Actas de congresos, coloquios, cursos, simposios:**

Soto, J. (2005). Levantamiento sísmico tridimensional en el yacimiento Pavayacu Parte Sur. Resúmenes extendidos del VIII Congreso Peruano de Geología. Lima: Edit. Sociedad Geológica del Perú, p: 130-132.

##### **Sitios de internet:**

Acevedo F. (2005). Fundamento y perspectivas de la biominería. Ediciones Universitarias de Valparaíso. [http://www.euv.cl/archivos\\_pdf/libros\\_nuevos/fundamentos\\_biomneras.pdf](http://www.euv.cl/archivos_pdf/libros_nuevos/fundamentos_biomneras.pdf) (visitado el 06-06-2010)

#### **COMITÉ EDITOR**

Informes: Comité de Publicaciones RIIGEO

Teléfono: 619-7000, anexo 1107

Pabellón de Ingeniería Metalúrgica

Ciudad Universitaria.

Calle Germán Amézaga 375, Lima 1

E-mails: [iigeo@unmsm.edu.pe](mailto:iigeo@unmsm.edu.pe), [iigeo.2010@gmail.com](mailto:iigeo.2010@gmail.com)

LIMA – PERU



## CUPÓN DE SUSCRIPCIÓN / *SUSCRIPTION FORM*

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA  
GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA



Esta revista es un órgano de difusión científico-técnica del Instituto de Investigación de la FIGMMG, de publicación semestral, con el objetivo primordial de dar a conocer a la comunidad nacional e internacional las investigaciones y trabajos académicos originales de los profesores, alumnos, ex alumnos e invitados, quienes tratan principalmente temas de las áreas de ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica; asimismo de Medio ambiente y otras relacionadas a ellas, que conllevan al desarrollo de la sociedad, en especial de nuestro país y de la región.

*This magazine works as a diffusion via of the Scientific-Technical Research Institute of FIGMMG, which is published every semester, with the main objective of informing to the national and international community about all the researches and original academic work of teachers, students, alumni and guests, who mainly work with Geological, Mining, Metallurgical Engineering's issues, geographical environment and others related to them, which lead to the development of society, especially our country and its regions.*

Av. Venezuela 3400, Lima 01  
Ciudad Universitaria UNMSM, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica.  
Pabellón de Ing. Metalúrgica, Primer Piso  
Tel: +511 619-7000 anexo 1107      E-mail: [iigeo.2010@gmail.com](mailto:iigeo.2010@gmail.com)      [iigeo@unmsm.edu.pe](mailto:iigeo@unmsm.edu.pe)

Nombre / Name: .....

SUSCRIPCIÓN ANNUAL / ANNUAL SUBSCRIPTION

Institución o Empresa / Institution or Company: .....

Incluye envío / Includes delivery:

Nacional      S/. 60.00

Dirección / Address .....

Internacional      \$/. 60.00

Ciudad (Estado / Provincia / Departamento) / City (State / Province / Department): .....

**Nota:**

1. Si envía Cheque, debe estar a nombre de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos - FIGMMG. / *If you send a check, this has to be under the name of Universidad Nacional Mayor de San Marcos - FIGMMG.*

Código Postal / Zip Code: .....

2. Si hace el depósito, debe ser a nombre de la UNMSM - FIGMMG.

País / Country: .....

Cuenta de Ahorros en soles N.º 00270019870 / *If you make a deposit, this has to be to UNMSM - FIGMMG: Saving Account in Soles: N.º 00270019870.*

Fax: .....

Cuenta ahorros en dólares N.º 00270019880 / *Saving Account in Dollars: N.º 00270019880.*

E-mail: .....

Banco Financiero, Lima - Perú (Enviar copia de depósito al correo indicado) / *Banco Financiero Lima-Perú (Send voucher's copy to the above e-mail).*



**CEPREDIM - UNMSM**

SE TERMINÓ DE IMPRIMIR  
EN EL MES DE OCTUBRE DE 2015  
EN LOS TALLERES GRÁFICOS DEL  
CENTRO DE PRODUCCIÓN EDITORIAL E IMPRENTA  
DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS  
JR. PARURO 119, LIMA 1.  
TELÉF.: 619-7000 ANEXO 6009  
E-MAIL: [ventas.cepredim.unmsm@gmail.com](mailto:ventas.cepredim.unmsm@gmail.com)  
PÁGINA WEB: [www.cepredim.com](http://www.cepredim.com)  
TIRAJE: 500 EJEMPLARES