

Biolixiviación de minerales sulfurosos

*Jorge Hernando Agudelo López**, *Judith Betancur Urán***, *Wilson Martínez Nieto**, *Carlos Mario Castañeda Peña**, *Marinés Castaño Galvis***, *Robert Fernando Largo Mejía***

(Recibido el 24 de enero de 2002)

Resumen

Se hizo caracterización mineralógica y química de mineral sulfuroso de bajo tenor proveniente de una mina aurífera localizada en el municipio de Marmato (Caldas), antes y después de un proceso de biolixiviación en el que se empleó un cultivo bacteriano aislado de la mina —compatible con *Thiobacillus ferrooxidans*— para medir la efectividad del mismo.

Para los bioensayos, realizados en los laboratorios de microbiología y de química del Instituto de Biología y del Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Antioquia, se empleó un biorreactor y se consideraron diferentes relaciones líquido/sólido, para estimar variables como población bacteriana, pH, agitación, potencial de oxidorreducción, temperatura y tiempo.

Los resultados demostraron una eficiencia máxima de 95%, lo que significa un incremento del 8% de recuperación en relación con el tratamiento único por cianuración.

----- *Palabras clave:* cianuración, cultivo bacteriano, biolixiviación, mineral sulfuroso.

Bioleaching of sulfurous minerals

Abstract

Sulfurous mineral of low tenor coming from an auriferous mine located in the municipality of Marmato (Caldas) was characterized mineralogical and chemically, before and after a bioleaching process in which an isolated bacterial cultivation of the mine was used-compatible with *Thiobacillus ferrooxidans* - to measure the effectiveness of the same one.

For the bioassay, carried out in the laboratories of Microbiology and of Chemistry of the Institute of Biology and of the Department of Metallurgical

* Integrantes del grupo CERAMEX. Universidad de Antioquia. jagudelo@jaibana.udea.edu.co.

** Integrantes del grupo MAPLA. Universidad de Antioquia. japalacio@epm.net.co.

Engineering of the University of Antioquia, a biorreactor was used and they were considered different relationships liquid/solid, estimating variables as bacterial population, pH, agitation, oxi-reduction potential, temperature and time.

The results demonstrated a maximum efficiency of 95%, what means an increment of 8% recovery in connection with the unique treatment for cyanidation.

----- *Key words:* cyanidation, bacterial cultivation, bioleaching, sulfurous mineral.

Introducción

En general, los minerales presentan estructuras cristalinas y composiciones químicas diferentes, lo que dificulta el proceso de recuperación. En una matriz sulfurosa el metal de importancia económica como el oro, la plata o el titanio, entre otros, viene ocluido y el porcentaje de recuperación es muy bajo.

La industria minera inicia el proceso de extracción de metales preciosos con la tostación para eliminar la matriz sulfurosa y lograr mayor recuperación del metal, finalizando con la concentración gravimétrica, flotación, cianuración y fusión.

Las altas temperaturas a que se somete el mineral, que oscilan entre 500 y 800 °C, hacen que se desprendan emisiones gaseosas de SO_x que van a la atmósfera y contribuyen con la formación de lluvias ácidas que tiene impacto negativo sobre ella.

La biolixiviación se presenta como una alternativa biotecnológica para mejorar la eficiencia del proceso de recuperación de metales y minimizar la contaminación del medio ambiente.

A partir de la década de 1950, países como Alemania, Estados Unidos y España, iniciaron trabajos en el campo de la biohidrometalurgia, empleando bacterias oxidantes del azufre como *Thiobacillus ferrooxidans* sobre la matriz sulfurosa en la que se encuentra ocluido el metal.

De otro lado, Japón ha recurrido también a bacterias oxidantes para extraer hierro del agua del drenaje de minas y en América Latina, los países que más han desarrollado las técnicas de la biolixiviación son Brasil, Argentina y Chile.

En Colombia son muy pocos los trabajos que se han propuesto en este campo; sin embargo, hay reportes preliminares importantes de investigaciones que actualmente están adelantando la Universidad Industrial de Santander, la Universidad Nacional y la Universidad de Antioquia.

Generalidades

Características del biorreactor diseñado

Un biorreactor es un recipiente que tiene en su interior una turbina que es accionada por medio de un movimiento magnético, bajo control termostático (figura 1).

Parámetros técnicos del biorreactor

El biorreactor cilíndrico fue diseñado con una capacidad de veinticinco litros según especificaciones propuestas por Gates, 1976.

Diámetro:	28 cm
Altura:	42 cm
Densidad específica (sólido/líquido):	1,8
Velocidad de sedimentación:	4,3 ft/min ≈ 2,1844 cm/s
Factor de corrección:	1,30
Velocidad de sedimentación corregida:	5,6 ft/min ≈ 2,8448 cm/s
Escala de agitación constante:	3-5
Revoluciones por minuto:	1/190
Numero de impele:	2
Altura del fondo al primer impele:	7 cm
Altura del fondo al segundo impele:	28 cm
Diámetro del impele:	20 cm
Ancho del baffle:	2 cm

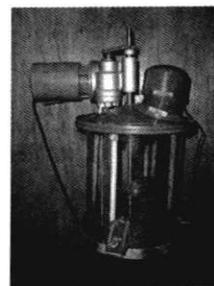


Figura 1 Biorreactor diseñado

Aislado bacteriano

El cultivo aislado fue comparado con las características determinadas para *Thiobacillus ferrooxidans*, que es una bacteria gram negativa, acidófila, mesófila y quimioautótrofa.

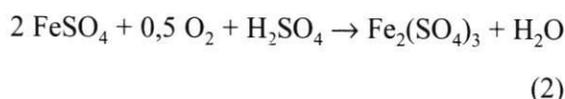
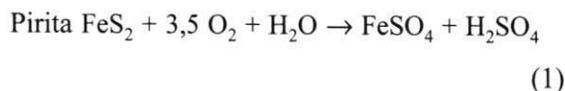
Las células en forma cilíndrica de aproximadamente 1-2 µm de largo y 0,5 de diámetro, soportan niveles de pH hasta de 0,5 y tienen gran capacidad de oxidación de ciertos metales, en especial del hierro y del azufre [2].

Mecanismos metabólicos

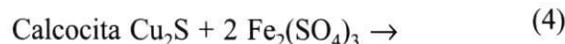
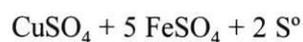
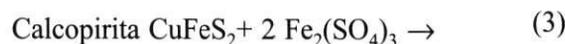
Los mecanismos metabólicos bacterianos en la biolixiviación de metales refractarios citados por Guerrero, 1998, se presentan como mecanismos directos e indirectos y las oxidaciones se producen a través de interacciones bacteria/substrato en las que participan enzimas diferentes.

a. Lixiviación indirecta:

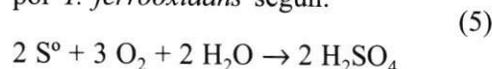
Dos reacciones importantes son mediadas por *Thiobacillus ferrooxidans*:



El sulfato férrico es un oxidante fuerte capaz de disolver amplia variedad de minerales sulfurados. La lixiviación con $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ recibe el nombre de lixiviación indirecta porque se realiza en ausencia bacteriana y de oxígeno y es responsable de la disolución o lixiviación de varios minerales sulfurados de cobre de importancia económica:



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:



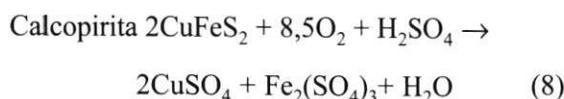
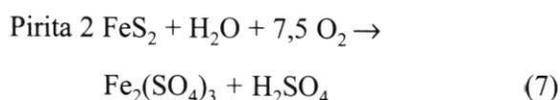
Este ácido sulfúrico, así generado, mantiene el pH del sistema a niveles favorables para el desarrollo de la bacteria.

b. 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.



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.

La rápida producción de ácido por *Thiobacillus thiooxidans* baja el pH durante la lixiviación y acelera el proceso, mejorando además las condiciones ambientales de vida de *Thiobacillus ferrooxidans* [3].

Desarrollo experimental

Componente metalúrgico

Muchos metales como el oro (Au), la plata (Ag), el cobre (Cu), el titanio (Ti) y el uranio (U) entre otros, vienen acompañados con gran cantidad de

mineral sulfuroso, los cuales son conocidos como minerales refractarios; debido a esto la recuperación del metal es de muy bajo porcentaje; por ello se hizo necesario realizar análisis químico y caracterización mineralógica del mineral y ensayo al fuego [4].

En las tablas 1 y 2 se presentan los resultados del análisis mineralógico y químico del mineral.

Ensayo al fuego

El ensayo al fuego es una rama del análisis químico cuantitativo. Este método se aplica principalmente a la determinación de Au, Ag y algunos elementos del grupo del platino Pt, con ayuda del calor y reactivos secos (tabla 3).

La ventaja del ensayo al fuego sobre los métodos húmedos de análisis de minerales para oro y

Tabla 1 Análisis químico del mineral por elementos

Parámetro	Resultados
Plomo (p.p.m. Pb)	291
Cobre (p.p.m. Cu)	631
Hierro (p.p.m. Fe)	10.774
Zinc (pip Zn)	No detectable
Arsénico (p.p.m. As)	1.061
Calcio (p.p.m. Ca)	8.921

Tabla 2 Caracterización mineralógica del mineral

Ganga: 95%	Sulfuros: 5%
Calcita	Pirita: 96%
Sílice	Pirrotina: 2%
Cuarzo diorita	Calcopirita: 1,5%
Esfalerita: 0,5%	

Composición química mineralógica [6].
Granos irregulares: 0,007 mm de diámetro.

plata está basada principalmente en el costo menor y en la rápida eliminación de todas las sustancias minerales asociadas.

Cianuración

La cianuración consiste en tratar con una solución de cianuro, por sistema de percolación o de agitación, de arenas, concentrados o residuos provenientes de plantas de beneficio de minerales.

Esta sustancia tiene la propiedad de disolver el oro contenido en estos materiales (sea en forma libre haciendo parte molecular de los sulfuros), recuperándose el metal noble de la solución por cementación con zinc o carbón, aluminio, electrodeposición, para después purificarlo por medio de fusión y afinación [5].

En la tabla 4 se muestran los resultados de recuperación de oro de la cianuración después de la biolixiviación.

Componente biológico

La biolixiviación favorece la oxidación de minerales sulfurados, cataliza la oxidación del ión ferroso y de compuestos reducidos de azufre, beneficiando la liberación de metales preciosos.

Para el aislamiento de la bacteria compatible con *Thiobacillus ferrooxidans* se tomaron muestras de agua de represamientos provenientes del interior de una mina aurífera de veta ubicada en el municipio de Marmato (Caldas) y fueron transportadas a temperatura ambiente en frascos estériles al laboratorio de Microbiología del Instituto de Biología Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Antioquia. Las muestras permanecieron en reposo hasta que solamente bacterias ferruginosas y sulfuradas estuvieran presentes.

Posteriormente se homogeneizó la muestra de agua y se llevó a cabo el proceso de aislamiento de la bacteria: se empleó ácido sulfúrico para acidificar el medio.

Tabla 3 Resultados de cada uno de los crisoles en el ensayo al fuego

Parámetros	Crisol 1	Crisol 2	Crisol 3
Peso del botón	12,50 g	16 g	6,20 g
Poder reductor	1,25	1,6	2,24
Tipo de escoria	Negra, vítrea	Verdosa, negra en el interior y vítrea	Oscura verdosa

Tabla 4 Resultados de recuperación de oro de la cianuración después de la biolixiviación

Relación de pulpa	% de recuperación	Tenor (g Au/ton mineral)
50/50	95	5,7
70/30	90	5,4
80/20	85	5,1
90/10	81	4,9
95/5	80	4,8

Después de obtener colonias aisladas se replicaron en medios más selectivos para garantizar que se trataba de una bacteria compatible con la fisiología de *Thiobacillus ferrooxidans*, lo que se corroboró mediante la coloración de gram, que dio en este resultado bacilos gram negativos, y con pruebas bioquímicas específicas. Las variables que se tomaron en cuenta para esta fase fueron pH, temperatura y tiempo (figura 2).

En la figura 2 se muestra colonias aisladas de *Thiobacillus ferrooxidans* por método francés en medio selectivo.

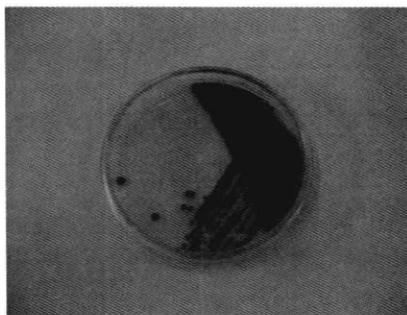


Figura 2 Crecimiento de la bacteria

Se realizaron pruebas preliminares con el objeto de determinar las mejores condiciones de crecimiento y actividad metabólica para la bacteria.

Paralelamente se efectuaron ensayos complementarios para garantizar la actividad bacteriana bajo las condiciones resultantes de los ensayos fisicoquímicos. Se determinó un desarrollo óptimo a 28 °C y a pH de 3,5.

Los bioensayos en el biorreactor se llevaron a cabo durante noventa días, en los que se realizaron muestreos y controles cada veinticuatro horas a las variables pH inicial, pH final, E° inicial y E° final a una temperatura de 28 ± 2 °C y 120 r.p.m.

Las relaciones líquido/sólido, se prepararon a partir de un blanco positivo de 50/50 y un blanco negativo de 95/5 para tres relaciones más de 70/30, 80/20 y 90/10, cada una con tres réplicas. La inoculación para cada relación fue de 532 x 10⁴ bacterias/ml en el día cero.

Se controló el pH con ácido sulfúrico preparado a varias concentraciones, manteniendo un nivel máximo de 3,5. Los datos obtenidos fueron

referenciados para el análisis estadístico tomando en cuenta el número de días de muestreo, las densidades de pulpa y la oxidación de $Fe^{(2+)}$ a $Fe^{(3+)}$.

El porcentaje de oxidación es un parámetro que indica la actividad de oxidación de la bacteria sobre el mineral.

Resultados y análisis

Estudio estadístico

Se utilizó el paquete estadístico Statgraphics para realizar una proyección futura mediante un modelo dinámico (el modelo ARIMA) y, mediante los modelos resultantes, obtener un horizonte pronóstico para ver en el largo plazo como se comporta la variable oxidación de Fe^{3+} .

El rendimiento resume la importancia estadística de las condiciones en el modelo de pronóstico. Donde las condiciones de los P-valores menores de 0,05 son estadísticamente significativas, con 95% de confiabilidad.

En las tablas donde se resume cada modelo se incluye:

La media cuadrada de error (MSE).

La media absoluta de error (MAE).

El porcentaje absoluto de error (MAPE).

La media de error (ME).

El porcentaje de error medio (MPE).

Al agua de la mina previamente se le midió el pH con un pHmetro, el cual arrojó un valor de 7.

Luego de realizar los tres ensayos se calculó el tenor que contenía el mineral y dio como resultado 6 gramos de oro/tonelada de mineral.

Porcentaje de recuperación de oro en la cianuración antes de la biolixiviación

Tenor: 5,2 g Au/ton mineral

% de recuperación: 87

Los resultados demuestran que las relaciones en las que se presenta mayor oxidación son 50/50 y 70/30, con una gran variabilidad durante todo el tiempo de estudio en la relación 50/50. En el día 1 la relación 70/30 presenta mayor oxidación que la 50/50 (0,15 y 0,1 respectivamente) (tabla 5) debido posiblemente a que mayor cantidad de mineral permite actividad bacteriana alta.

En los siguientes días, la población bacteriana decrece, la disponibilidad de nutrientes es menor pero la actividad oxidativa tiende a aumentar a medida que aumenta el tiempo por selección de bacterias oxidativas del mineral, dado que el resto de micro biota acompañante no tolera estas condiciones y por lo tanto es eliminada o inactivada.

Para cada una de las relaciones se halló una ecuación que cumple las condiciones del modelo ARIMA, bajo el comportamiento dinámico, generando un modelo de predicción adecuado que

Tabla 5 Oxidación del Fe^{3+} de acuerdo con las densidades de pulpa, durante el período de experimentación (90 días) y proyección futura (180 días)

No. días	Oxidación del $Fe^{(3+)}$ (g/l)				
	50/50	95/5	70/30	80/20	90/10
1	0,1	0,07	0,15	0,04	0,03
90	0,7	0,20	0,40	0,28	0,24
180	1,1	0,40	0,60	0,19	0,38

permite observar el efecto a largo plazo de la oxidación del Fe⁽³⁺⁾. Figuras 3, 5, 7, 9. Se empleó la autocorrelación residual de ajuste para verificar la correcta construcción del modelo para cada caso figuras 4, 6, 8, 10 y 12 (tabla 6).

Relación 50/50

Número de observaciones: 91
 Índice de la salida: 1,0
 Intervalo probado: 1,0
 Longitud de ciclos: 6

Modelo $Y_t \sim \text{ARIMA}(1,0,0)(1,1,0)_6$

$$(1 - \phi_1 B)(1 - B^6)(1 - \gamma_1 B^6) Y_t = \mu + \varepsilon_t$$

Ecuación de pronóstico:

$$Y_t = \mu + Y_{t-6} + \phi_1 Y_{t-1} - \phi_1 Y_{t-7} +$$

$$\gamma_1 Y_{t-6} - \gamma_1 Y_{t-12} - \phi_1 \gamma_1 Y_{t-7} + \phi_1 \gamma_1 Y_{t-13} + \varepsilon_t$$

Esta relación presenta un comportamiento muy variable durante todo el muestreo y tiene efectos cíclicos estacionales cada 6 periodos.

En el horizonte pronóstico de oxidación de Fe³⁺ (figura 3) se observa un valor máximo de 0,9 unidades de oxidación, este valor es el más alto

con respecto a las demás relaciones. Su comportamiento durante los noventa días de muestreo y en la proyección es eficiente.

La relación 70/30 demuestra una respuesta similar (tabla 7), así:

Número de observaciones: 91
 Índice de la salida: 1,0
 Intervalo probado: 1,0
 Longitud de ciclos: 15

Modelo $Y_t \sim \text{ARIMA}(1,0,0)(0,1,0)_{15}$

$$(1 - \phi_1 B)(1 - B^{15}) Y_t = \mu + \varepsilon_t$$

Ecuación de pronóstico:

$$Y_t = \mu + Y_{t-15} + \phi_1 Y_{t-1} - \phi_1 Y_{t-16} + \varepsilon_t$$

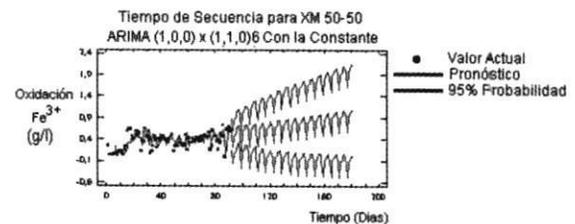


Figura 3 Modelo ARIMA para el comportamiento dinámico de oxidación de la XM50/50

Tabla 6 Resumen del modelo ARIMA para la relación 50/50

Parámetros	Estimado	Error estándar	T	P-valores
ϕ_1	0,4265900	0,1021360	4,17668	0,000073
γ_1	-0,5051310	0,1092320	-4,62439	0,000014
Media	0,0286970	0,0228691	1,25484	0,213101
Constante	0,0247672			

Tabla 7 Resumen del modelo ARIMA para la relación 70/30

Parámetros	Estimado	Error estándar	t	P-valores
ϕ_1	0,73143500	0,0724723	10,092600	0,000000
Media	0,03711450	0,0377025	0,984402	0,328126
Constante	0,00996763			

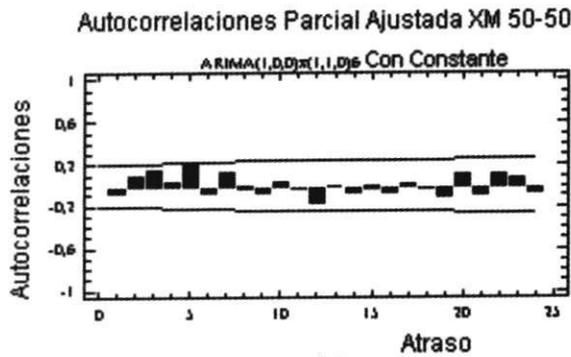


Figura 4 Ajuste de la XM50/50

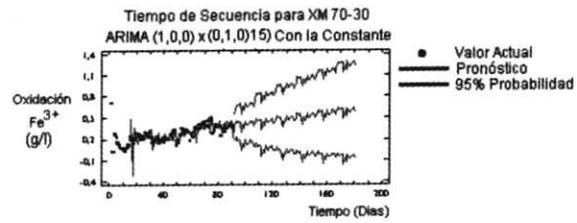


Figura 5 Modelo ARIMA para el comportamiento dinámico de oxidación de la XM70/30

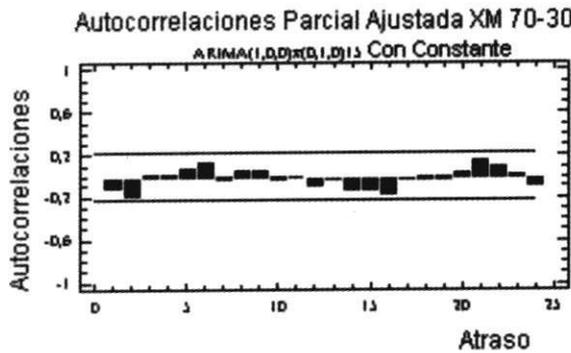


Figura 6 Ajuste de la XM70/30

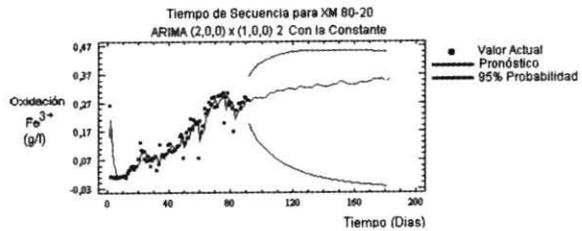


Figura 7 Modelo ARIMA para el comportamiento dinámico de oxidación de la XM80/20

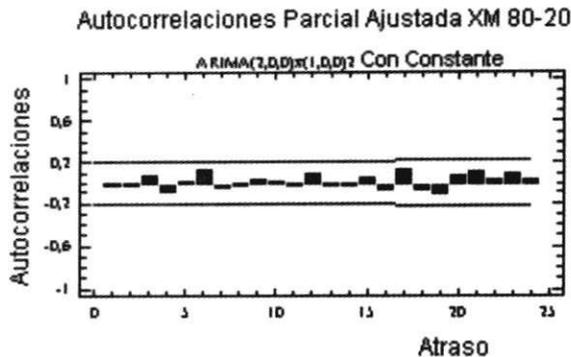


Figura 8 Ajuste de la XM80/20

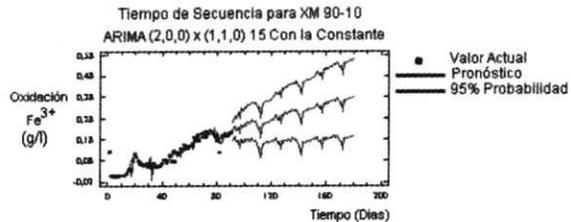


Figura 9 Modelo ARIMA para el comportamiento dinámico de oxidación de la XM90_10

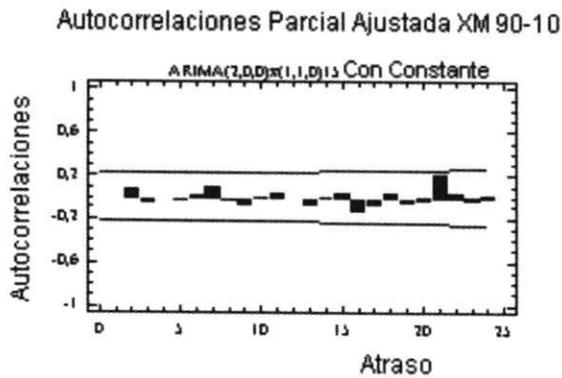


Figura 10 Ajuste de la XM90/10

Durante el periodo de noventa días, el valor de oxidación de Fe^{3+} , tuvo una longitud de 0,46g/l y al realizar la proyección se observa aumento del valor de oxidación hasta 0,6g/l (tabla 5).

En esta relación se presentan longitudes de ciclos cada quince días, con valores de oxidación aceptables, su punto máximo se da en el día setenta y cinco. En la proyección, se observa un aumento en la oxidación (figura 5) y se obtienen los mejores resultados entre los días ciento veinte y ciento sesenta.

Relación 80/20

- Número de observaciones: 91
- Índice de la salida: 1,0
- Intervalo probando: 1,0
- Longitud de ciclos: 2

Modelo $Y_t \sim ARIMA(2,0,0)(1,0,0)2$

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2)(1 - \gamma_1 B^{15}) Y_t = \mu + \epsilon_t$$

Ecuación de pronóstico:

$$Y_t = \mu + \gamma_1 Y_{t-2} + \phi_1 Y_{t-1} - \phi_1 \gamma_1 Y_{t-3} + \phi_2 Y_{t-2} - \phi_2 \gamma_1 Y_{t-4} + \epsilon_t$$

Esta relación no presenta mucha variabilidad, se dan efectos estacionales leves cada dos días. Tiene un comportamiento ascendente durante el tiempo de muestreo, pero con valores de oxidación bajos. Por más que permanezcan las condiciones el punto máximo no sobrepasa las 0,37 unidades de oxidación, lo que implicaría que la recuperación de metales preciosos no es tan eficiente como la que resulta de los dos modelos anteriores (figura 7).

Relación 90/10

- Número de observaciones: 91
- Índice de la salida: 1,0
- Intervalo probando: 1,0
- Longitud de ciclos: 15

Modelo $Y_t \sim ARIMA(2,0,0)(1,1,0)15$

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2)(1 - B^{15})(1 - \gamma_1 B^{15}) Y_t = \mu + \epsilon_t$$

Ecuación de pronóstico:

$$Y_t = \mu + \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + Y_{t-15} - \phi_1 Y_{t-16} - \phi_2 Y_{t-17} + \gamma_1 Y_{t-15} - \phi_1 \gamma_1 Y_{t-16} - \phi_2 \gamma_1 Y_{t-17} - \gamma_1 Y_{t-30} - \phi_1 \gamma_1 Y_{t-32} + \epsilon_t$$

Tabla 8 Resumen del modelo ARIMA para la relación 80/20

Parámetros	Estimado	Error estándar	t	P-valores
ϕ_1	0,52726000	0,0906643	5,81551	0,000000
ϕ_2	0,44162100	0,0955150	4,62358	0,000013
γ_1	0,19532400	0,1038190	-1,88139	0,063263
Media	0,20233200	0,1214590	1,66584	0,099343
Constante	0,00752619			

Esta relación tiene un efecto cíclico cada quince días y presenta valores de oxidación bajos. Realizando la proyección por noventa días más se observa incremento en la oxidación pero con niveles de oxidación muy bajos (por debajo de 0,38 g/l) (figura 9). Lo anterior permite inferir que el proceso de recuperación del mineral sería poco eficiente si la relación se mantuviera en estos límites.

En esta relación la máxima oxidación del Fe³⁺ se presenta a los setenta y cinco días, con una oxidación de 0,27 g/l y para el día noventa, la oxidación baja a 0,22 g/l. En la proyección se observa un aumento en la oxidación del Fe³⁺ hasta 0,38 g/l (figura 9).

Relación 95/5

Número de observaciones:	91
Índice de la salida:	1,0
Intervalo probando:	1,0
Longitud de ciclos:	4

Modelo $Y_t \sim \text{ARIMA}(2,1,0)(1,1,0)_4$

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2) (1 - B) (1 - B^4) (1 - \gamma_1 B^4) Y_t = \mu + \varepsilon_t$$

Ecuación de pronóstico:

$$Y_t = \mu + \gamma_1 Y_{t-4} + Y_{t-4} - \gamma_1 Y_{t-8} + Y_{t-1} - \gamma_1 Y_{t-5} - Y_{t-8} + \gamma_1 Y_{t-12} + \phi_1 Y_{t-1} - \phi_1 \gamma_1 Y_{t-5} - \phi_1 Y_{t-5} + \phi_1 \gamma_1 Y_{t-9} - \phi_1 Y_{t-2} + \phi_1 \gamma_1 Y_{t-6} + \phi_1 Y_{t-6} - \phi_1 \gamma_1 Y_{t-10} + \phi_2 Y_{t-2} - \phi_2 \gamma_1 Y_{t-6} - \phi_2 Y_{t-6} + \phi_2 \gamma_1 Y_{t-10} - \phi_2 Y_{t-3} + \phi_2 \gamma_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-1} + \phi_2 \gamma_1 Y_{t-11} + \varepsilon_t$$

Esta relación muestra ciclos repetitivos cada 4 días. Aunque la oxidación de Fe³⁺ en esta relación es bastante estable, es la relación que presenta menor valor de oxidación durante todo el periodo de muestreo (inferiores a 0,1) con relación a las demás. Los niveles de oxidación en la proyección están por debajo de 0,4 g/l (figura 11). En consecuencia, se considera que no es aconsejable esta relación para un proceso óptimo de recuperación de metales preciosos.

Tabla 9 Resumen del modelo ARIMA para la relación 90/10

Parámetros	Estimado	Error estándar	t	P-valor
ϕ_1	0,60569700	0,0991266	6,11034	0,000000
ϕ_2	0,31242600	0,1000460	3,12282	0,002580
γ_1	-0,78689100	0,0693178	-11,35190	0,000000
Media	0,02662950	0,0143960	1,84978	0,068449
Constante	0,00389606			

Tabla 10 Resumen del modelo ARIMA para la relación 95/5

Parámetros	Estimado	Error estándar	t	P-valores
f_1	-0,698641000	0,102689000	-6,803450	0,000000
f_2	-0,226553000	0,103506000	-2,188800	0,031455
g_1	-0,617098000	0,086958800	-7,096440	0,000000
Media	0,000208896	0,000456806	0,457297	0,648667
Constante	0,000650342			

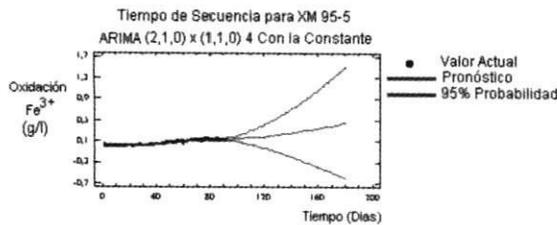


Figura 11 Modelo ARIMA para el comportamiento dinámico de oxidación de la XM95/5

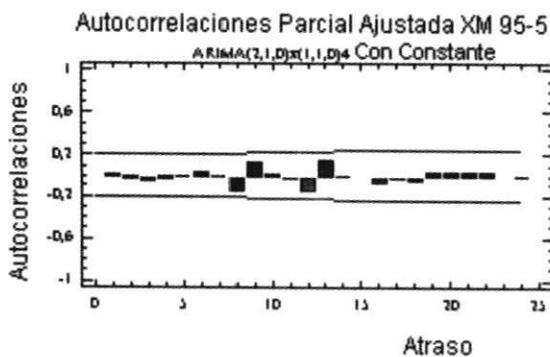


Figura 12 Ajuste de la XM95/5

Conclusiones y recomendaciones

El modelo ARIMA permitió una interpretación adecuada de los resultados por ser de tipo dinámico, para determinar predicciones en el tiempo acerca de los niveles de oxidación.

Los pronósticos obtenidos con la aplicación del modelo ARIMA para cada una de las relaciones hacen posible definir para cuál(es) es recomendable prolongar el muestreo por noventa días. En esta investigación se determinó la efectividad de la proyección en las relaciones 50/50 y 70/30, dado que en la proyección a largo plazo se observa mayor oxidación del mineral sulfuroso. Para aplicaciones posteriores, las demás relaciones no se recomiendan por tener valores de oxidación tan bajos.

El proceso biológico para la recuperación de metales ocluidos en minerales sulfurosos, reduce impactos ambientales negativos generados en los procesos químicos convencionales en la industria minera que utilizan grandes cantidades de cianuro, con la formación de compuestos cianurados reportados como muy tóxicos para la biota en general.

Se encontró que el aislado nativo compatible con *Thiobacillus ferrooxidans* realiza su actividad de manera más eficiente en un pH de 3,5, lo que es diferente a lo reportado en otros trabajos realizados donde hablan de pH de 1,5.

Se comprobó que la biolixiviación es un método efectivo en el proceso de recuperación de oro para el mineral sulfuroso porque se obtuvo un rendimiento adicional del 8% con respecto a la cianuración que se efectuó antes de la biolixiviación.

La emisión de gases sulfurosos, producto de métodos tradicionales de extracción, se minimizaría con la implementación de métodos biológicos para este fin.

Los contaminantes ambientales resultantes de procesos extractivos en minería afectan la salud pública. La implementación de la biolixiviación sería una alternativa para mejorar la calidad de vida de las poblaciones mineras.

Es recomendable realizar recuentos bacterianos diariamente, con el fin de comparar el comportamiento de la bacteria con respecto a la oxidación.

El trabajo fue interesante porque demuestra que el metabolismo de las bacterias nativas está influido por las variables de su medio y este dato permite plantear ensayos a nivel piloto con estudios de un medio adecuado para bacterias en Colombia.

Definir la población bacteriana diaria durante el tiempo del proceso podría indicar una relación importante entre esta variable y la oxidación del Fe^{3+} .

Es importante realizar un estudio de factibilidad económica para determinar la rentabilidad de este proceso biológico para la industria minera.

Las zonas aledañas a los distritos mineros han sido progresivamente alteradas por los drenajes ácidos. La desestabilización de los ecosistemas ha llegado a puntos críticos, lo que obliga a la búsqueda de alternativas biológicas que ayuden a reestablecer el equilibrio ambiental.

En general, la oxidación del Fe^{3+} parece tener mejores resultados en la proyección por noventa días adicionales al efectuado en el experimento. Se recomienda aumentar el tiempo del proceso para verificar estos resultados.

Es un proceso factible para minerales de bajo tenor, sulfurosos o no, y colas de minería de veta, por sus bajos costos de procesamiento, con la limitante de largos periodos de tiempo.

Para trabajos posteriores sería interesante:

Realizar ensayos con diferentes concentraciones del mineral a las que se tuvieron en cuenta en este estudio para observar, en rangos más estrechos, la eficiencia en la recuperación.

Estudiar la microbiota acompañante dominante y persistente en el material sulfuroso con el fin de definir su intervención en el proceso.

Realizar ensayos con los distintos grupos bacterianos seleccionados y relacionar su eficiencia en la recuperación del mineral.

Reproducir el experimento en una planta piloto "in situ" y compararlo con los resultados obtenidos en el presente trabajo.

Realizar bioensayos variando la agitación del sistema con el fin de determinar el movimiento cinético óptimo para la actividad de la bacteria.

Nomenclatura

Y_t = Valor de oxidación de Fe^{3+} en el tiempo

T = Probar la significancia del parámetro

ϵ_t = Error o ruido

μ = la media

ϕ = Contribución actual del día anterior

γ = Auto regresivo de orden n hasta donde va el proceso

B = Operador rezagado de la oxidación de Fe^{3+}

XM = Media aritmética

Referencias

1. Gates, Lewis et al. *Selecting agitator systems to suspend solids in liquid*. chemical engineering mayo 21 y 24, 1976.
2. Guerrero, José. *Biotecnología en la disolución y recuperación de metales*. Perú. 1998.
3. Rawlings, D.E. *Reasons why 'Leptospirillum'-Like species rather than Thiobacillus ferrooxidans are the dominant iron-oxidizing bacteria in many commercial processes for the biooxidation of pyrite and related ores*. En *Micobiology*. Vol.145. 5-13. Great Britain. 1999.
4. Barraza, Lorenzo et al. *Beneficio de minerales*. Medellín. Copyclase. 1997.
5. Vásquez, Jorge. *Métodos de cianuración y alternativas para su neutralización*, Ministerio de Minas y Energía 1991.
6. Rodríguez Terezinho and Pesson, Francisco. *Lixiviação Bacteriana de Cobre de Baixo Teorem Escala de Bancada*. Ministerio das Minas, Brasilia. 1984.