

Minería in situ. Su aplicación en un yacimiento de cobre oxidado

Hard rock in situ mining. Its application in a copper oxide ore deposit

Ing. Oswaldo Ortiz Sánchez¹, Ing. Silverio Godelia Canchari¹, Carlos A. Soto M.²

RESUMEN

La minería metálica in situ comprende sistemas de recuperación de elementos metálicos mediante lixiviación, en el lugar de origen, usando reactivos químicos apropiados. Los métodos recuperan metales existentes en un yacimiento mineral haciendo circular soluciones a través de la masa de mineral en su estado geológico natural o sometido a fracturamiento previo in situ, y recuperando las soluciones cargadas para su procesamiento en planta.

En todas las explotaciones mineras se determinó que la fragmentación es una variable básica y debería obtenerse por perforación y voladura o por hidrofracturación para crear buena permeabilidad del yacimiento a la acción de la solución lixiviante. Ejemplos son las operaciones mineras del Sur de USA donde para aplicar lixiviación insitu, se efectuaron primero trabajos de fragmentación usando explosivos convencionales en voladuras tipo coyote o a cielo abierto.

Otras variables influyentes son la geología, en especial la génesis del yacimiento que es el opuesto del proceso in situ, el grado de porosidad natural de la roca, la inaccesibilidad del mineral abandonado por la explotación antigua o ubicado en áreas muy perturbadas o a gran profundidad donde puede llegarse con taladros largos y labores mineras convencionales.

En este estudio, se trata de aplicar el minado in situ a reservas remanentes abandonadas de óxidos de cobre dejados en su lugar por el minado subterráneo de un depósito de cobre que viene explotándose por más de 48 años.

Palabras clave: Lixiviación, in situ, mineral marginal, polución, bombeo.

ABSTRACT

In situ metallic mining are systems of metal elements recovery through leaching at their primary emplacements in hard rock ore deposits by appropriate chemical solutions. The methods involve recuperation of metals from ore bodies by circulating solutions through the ore in its undisturbed geologic state and recovering these solutions for processing.

In order to attain acceptable orebody permeability for flowing of leach solutions, fragmentation is a basic variable. It should be obtained by drilling and blasting with explosives or by hydrofracturing. Examples are some Southern USA in situ mining operations where rock fragmentation with explosives was successfully tried in coyote holes or open pit blasting grids.

Other significant in situ mining variables are the mineral geologic genesis which works in opposite direction to the insitu leach treatment, the natural rock porosity, the ore left insitu by previous mining exploitation, the unstable rock mass underground, the ore located very deep underground. Costs for gaining this ore are prohibited the only possibility of economic recovery being insitu mining by leach solutions in long hole drilling and conventional mine drives.

In this study in situ mining is applied to abandoned oxide copper ore reserves left by the underground mining of a copper ore body which is being exploited for over forty eight years.

Key words: Leaching, in situ, marginal ore, pollution, pumping.

¹ Docentes de la EAP de Ingeniería de Minas de la UNMSM. E-mail: ortizs@unmsm.edu.pe, sgodeliac@unmsm.edu.pe

² Egresado de la EAP de Ingeniería de Minas de la UNMSM. E-mail: osoos1990@gmail.com

I. INTRODUCCIÓN

La minería in situ es una técnica poco conocida en la recuperación de minerales y elementos metálicos de los yacimientos minerales. Comprende dos clases: Disolución en agua y lixiviación mediante una solución química. La característica principal es que ambos procesos se desarrollan en el emplazamiento de origen, a veces en forma natural y desde épocas remotas. La historia relata que en el año 150 a. C. los chinos obtenían cobre metálico de ciertas aguas azules al contacto con el hierro. En el río Tinto en España durante el siglo XVII, se obtenía cobre en forma comercial de las soluciones de lixiviación natural de los minerales sulfurados posiblemente con la ayuda de bacterias cuya participación viene desde la antigüedad, no obstante recientemente en 1947 fue aislado por primera vez el *Thiobacillus Ferroxidans* uno de los principales responsables en acelerar la oxidación de los sulfuros en presencia de ciertas soluciones ácidas.

En el Perú se desarrolló la lixiviación in situ desde 1935 en la mina Cerro de Pasco. Al inicio el cobre se recuperó de las soluciones del drenaje de mina y luego la lixiviación se intensificó mediante el lavado de los tajeos antiguos y a partir del año 1960 se lixivió los echaderos de mineral de baja ley provenientes del desencapado del tajo a cielo abierto. Un sistema similar se desarrolló en las minas de Quiruvilca recuperando el cobre y la plata de minerales de baja ley.

En la década del 70, empresas mineras extranjeras iniciaron la recuperación por lixiviación de los metales de los minerales de baja ley, acumulados en canchas y botaderos cuya explotación se efectuó en los años sesenta. También la recuperación in situ de valores metálicos de algunos minerales tuvo su inicio a fines de los setenta.

En la mina Agnew de Ontario, Canadá, Lang L.C. y Morrey W. B. (1974) describen la recuperación in situ de un yacimiento filoniano minado por perforación y voladura de taladros largos de 3 y 6 pulgadas de diámetro utilizando explosivos en voladura de bancos invertidos. En la mina el Teniente de Codelco en Chile, Valle A. (1984), relata la explotación in situ de minerales de cobre de baja ley con una producción de 15 ton. de cobre/día.

En los años ochenta tuvo éxito la explotación insitu de los depósitos de minerales de uranio en varios Estados de USA empleando el sistema de taladros verticales en arreglos de tipo pentagonal, hexagonal y otros, Pool, T. C. (1989). En estos sistemas la solución lixivante se hacía circular a presión a través de taladros periféricos de inyección recogiendo la solución cargada en un taladro de recolección central. Por tratarse de yacimientos sedimentarios en roca porosa generalmente no se requería fragmentación previa de los yacimientos.

En el caso de disolución de minerales solubles en agua, el principal uso del método según Richner D.R. (1952), es generar grandes cámaras aisladas para almacenamiento y no para recuperar el mineral que muchas veces es de bajo valor.

I.1. Objetivo

Desarrollar el sistema de lixiviación in situ y presentar un proyecto donde puede aplicarse esta técnica en minerales metálicos. Se detallará el método para aplicarlo en zonas abandonadas y de difícil acceso de la operación subterránea Raúl. El área escogida corresponde a mineral in situ. Igualmente se presentará la aplicación del sistema en áreas de leyes marginales de cobre.

I.2. Justificación del estudio

Los yacimientos minerales tienden a bajar en leyes, calidad, accesibilidad y tamaño. La tendencia es a profundizarse tal que se alejan de su factibilidad económica de recuperación por los métodos superficiales convencionales. Igualmente, los métodos subterráneos tampoco son factibles porque son de alto costo unitario. En el caso de las operaciones de mina Raúl, el avance de la explotación subterránea ha dejado áreas aisladas de leyes marginales, pilares en zonas de difícil acceso y otros, no justificando su desarrollo para la explotación convencional. También en los últimos años se han introducido restricciones medioambientales en la explotación minera. Ante esto, la minería in situ reúne las condiciones técnicas, de seguridad y medio ambiental en razón de que no perturba ni contamina la naturaleza, no genera ruido ni polvo; tampoco altera la topografía y su costo operativo y de inversión es mucho menor que de cualquier método de la minería superficial y/o subterránea convencional.

I.3. Variables de la lixiviación in situ

Geología.– Factores geológicos influyentes son el origen, tipo, génesis, ubicación, geometría, características del mineral y de la roca encajonante, estructura, buzamiento, fallas, plegamientos, diaclasas, nivel freático y corrientes de aguas artesianas.

Mineralogía.– El diseño más apropiado de recuperación de los valores metálicos debe basarse en la naturaleza química y física del proceso de formación del mineral y de acuerdo a Dudas L. y otros (1974), en la reproducción del estado de formación del mineral. Así, deben tomarse en cuenta la textura, porosidad, dureza, permeabilidad, cristalización, temperatura de formación y distribución de los valores metálicos.

Hidrogeología.– El grado de porosidad y permeabilidad de la roca es un indicio de la presencia de corrientes de agua subterránea. La porosidad de la

roca no consolidada depende del grado de compactación y de la forma y distribución por tamaños. En un material consolidado la porosidad dependerá de su grado de cementación y fracturamiento.

Las rocas plutónicas, volcánicas y metamórficas tienen porosidades y permeabilidades pequeñas que van de 1 a 3% y 0.005 a 0.20 mm/día, respectivamente, lo que minimiza la presencia de aguas subterráneas. Las rocas sedimentarias presentan porosidades entre 0.5 y 20% y permeabilidades entre 1 y 200 mm/día. Por lo tanto, las rocas sedimentarias son más favorables a las corrientes de agua subterráneas por su granulometría de diversos tamaños, grado de cohesión y cementación. Las fallas, diaclasas y alteraciones de la roca favorecen las corrientes de agua subterránea y contribuyen al ciclo hidrológico natural que es la fuente potencial de agua que debe cuidarse y preservarse (Ahlness J. K., 1991).

Fragmentación.– El grado de fragmentación de la roca genera la permeabilidad y porosidad en el mineral y origina micro fracturas en la roca que constituyen vías de flujo del lixiviante.

Los métodos de lixiviación dependen de la forma de aplicación del lixiviante y de su recuperación. La inyección y recuperación de la solución cargada mediante arreglos de taladros largos en un yacimiento fracturado se puede aplicar cuando no es posible la aplicación y recuperación de las soluciones a través de labores subterráneas.

Percolación.– Depende de las características fisicoquímicas del material a tratarse. Para acortar el tiempo de lixiviación se debe considerar varios factores como textura y permeabilidad, presiones de los gases como el aire dentro del material, esfuerzo debido a presiones y profundidad, temperatura, tamaño de partícula e interacción fisicoquímica.

La textura y permeabilidad regulan la velocidad de percolación. El flujo en una roca de porosidad media está dado por la ecuación de Darcy:

$$Q = - K A P / (\mu h) \text{ o } V_t = K / \mu \cdot \delta P / \delta x$$

Donde: Q = caudal, V_t = velocidad de la solución lixiviante, K = coeficiente de permeabilidad o permeabilidad específica del mineral, A = área de la sección, P = presión del líquido a través del material, h = profundidad del estrato o cuerpo mineralizado, μ = viscosidad de la solución y $\delta P / \delta x$ = gradiente de presión o cabeza hidrostática de la solución.

Estas expresiones indican que el caudal de percolación está en relación directa de la permeabilidad específica del material. El K tiene influencia en la velocidad de percolación y esta puede reducirse por

la presencia de gases o aire en la masa de mineral. La percolación disminuye si la solución se alimenta de arriba hacia abajo por entrapamiento del aire. Si la alimentación es de abajo hacia arriba habrá menor generación de burbujas y las existentes serán desalojadas con facilidad.

A mayor temperatura menor viscosidad y según la ley de Darcy la velocidad de flujo es inversamente proporcional a la viscosidad de la solución percolante por lo que a mayor temperatura mayor velocidad de flujo.

Sullivan y otros (1981), concluyeron que el tamaño de partícula es la variable que más afecta la penetración del lixiviante deduciendo que el tamaño mínimo recomendable es malla -3 a -4. La disolución y penetración de la solución lixiviante en las partículas dependen además del grado en que el aire atrapado entre partículas es desalojado por la solución.

I.4. Aplicación de la solución lixiviante

Se suministra en la parte alta de la columna vertical de mineral dejando percolar la solución. La aplicación del lixiviante puede hacerse por tres métodos: Aspersión, inundación, e inyección.

La aspersión se aplica a través de tuberías instaladas sobre el material por tratar. La solución lixiviante fluye por los vacíos y poros existentes en la masa lixiviante.

La inundación consiste en colmatar el mineral almacenado y retenido mediante diques y elementos de contención del lixiviante. La desventaja del sistema es que el líquido se evapora produciendo deposición de sales ferrosas en la superficie.

Mediante la inyección se hace circular a presión la solución lixiviante, a través de tubos instalados hasta el fondo de la masa. Los tubos se colocan a diferentes profundidades (12 m o más), en una malla media de 8 x 8 m. El espaciamiento óptimo se calcula en el campo mediante pruebas. La velocidad de aplicación del lixiviante está en relación directa de la permeabilidad del mineral, altura y superficie de la cancha.

I.5. Lixiviación in situ del mineral de cobre remanente y de baja ley de la mina Raúl

El yacimiento Raúl en Mala se emplaza en un área de un kilómetro cuadrado. Dentro de esta superficie explotada la Zona Apolo contiene óxidos y sulfuros abandonados por la explotación subterránea en la forma de puentes, pilares y áreas aisladas que no pueden ser recuperados económicamente por los métodos convencionales de tajeado aplicados en la mina Raúl: El Corte y Relleno y el Almacenamiento Provisional. La ley media de cobre es de 1.0% en los óxidos y 0.5% en los sulfuros con una ley de 1.5 % en cobre total en los niveles superiores.

En los niveles inferiores, la ley de sulfuros se incrementa a 1% o más. La lixiviación in situ es apropiada para los niveles superiores donde el minado ha llegado a su término y se tiene mineral remanente.

El depósito mineral fue explotado por óxidos y sulfuros hasta el nivel -55 en la zona Apolo y por debajo de este nivel existen minerales de baja ley que debido a los bajos precios de años anteriores no fue económico extraerlos.

Las reservas probadas y probables en el sector 1 (Apolo) es de 550,000 tm aproximadamente correspondiente a minerales remanentes y sin explotar con una ley de cobre total de 1.5% sin dilución.

II. ANTECEDENTES

Se tiene noticias de la mina Raúl desde inicios del siglo pasado. Por los años 1920-1924 fue explotada por pequeños mineros y su mineral vendido a la casa "Vaise". Posteriormente fue abandonada y explorada por muchos aficionados. Los hermanos Vanini al enterarse de su abandono la denunciaron siendo los primeros poseedores legales. En 1955 comenzó su explotación en la zona de óxidos y su producción mensual al entrar en contrato con la Cía M. Hoshchild Ltda., alcanzaba 20 tm de cobre con 6 gr. de oro y 0.3 oz. de plata/tm de mineral.

La Cía. M. Hoshchild Ltda. se interesó en el yacimiento al encontrar minerales de sulfuros primarios en los depósitos de cobre oxidado y tomaron en opción de compra iniciándose los trabajos de exploración en abril del 1959. La Cía. Minera Pativilca S.A. subsidiaria de M. Hoshchild Ltda. firmó un contrato de compra después de constatar suficientes reservas de mineral.

Durante el año 1960 los minerales procedentes de los trabajos de exploración se enviaban hasta Pisco para ser concentrados. Finalmente, la empresa decidió instalar una planta de concentración de 150 tm/día iniciándose la producción de concentrados en Junio de 1961. A la fecha, la producción de mina sobrepasa las 2,000 tm/día.

Para lograr la fragmentación del mineral para la lixiviación in situ se utilizarán técnicas de perforación y voladura aplicadas en la explotación actual.

2.1. Aplicabilidad de la lixiviación in situ

En la mina Raúl es factible la lixiviación in situ por los siguientes factores favorables:

1. Yacimiento filoniano tabular y diseminado con buzamientos superiores a 50°. Roca encajonante competente de tipo diorítico andesítico y pórfidos dacíticos. Sistema de fallas y fracturamiento moderado.
2. La mineralogía así como el proceso de oxidación del yacimiento predicen buena lixiviablez del mineral.
3. Las propiedades físicas y mecánicas del mineral son apropiadas para óptima fragmentación.
4. Existe soluciones sulfatadas que en forma natural se formaron por infiltración de las aguas superficiales.
5. Las pruebas en columna desarrolladas para óxidos en el laboratorio demuestran el éxito del método.
6. No se prevé que pueda perderse las soluciones por encontrarse emplazado dentro del intrusivo competente.
7. Existen fracturas secundarias que atraviesan la zona y son de fácil control.
8. El yacimiento se emplaza en una zona árida y desértica con un nivel de precipitación pluvial muy bajo del orden de 400 milímetros por año. Igualmente la infiltración es mínima.
9. No hay evidencia de aguas subterráneas lo que se ha comprobado por la explotación subterránea que profundiza hasta una cota cercana al nivel del mar.

III. PROCEDIMIENTO

La lixiviación subterránea insitu en los tajos del área Apolo se efectuará en bloques de 35 m de altura (altura de banco), y para simular este proceso en el laboratorio se efectuó las pruebas en columna. En Apolo las zonas remanentes contienen minerales de óxidos y sulfuros de baja ley pudiendo efectuarse lixiviación combinada en forma eficiente y económico. En este estudio solamente se efectuó pruebas de lixiviación de óxidos en columna para determinar solubilidad, nivel de extracción, velocidad de extracción y consumo de ácido, usando condiciones de lixiviación como: fragmentación del mineral a 3/8 pulg., método de lixiviación: por inundación, ácido libre 3.4 g/l., pH 2.0, duración del prueba: 2.5 meses, temperatura 30 °C, humedad del mineral 12%.

3.1. Pruebas preliminares

Se utilizó una columna de PVC de 50 cm. de altura y 6 pulg. de diámetro. La columna se cargó con 25 kg de óxidos de cobre con ley de 1.3% metal a una fragmentación de 3/8 de pulg. de diámetro. Se inundó la columna con solución acuosa conteniendo lo siguiente: 3.4 g/l de ácido, 1.5 g/l de cobre, 1.0 g/l de Fe+ 2, 2.0 g/l de Fe+ 3 con lo cual se tuvo 3.0 g/l de Fe total.

Durante la prueba el pH se mantuvo en 2 para evitar precipitación de sales de hierro. Los resultados de la

prueba de lixiviación de los óxidos de cobre fueron los siguientes. Ver Tabla N.º 1.

Tabla N.º 1 Resultados de lixiviación.

| Semana | Ácido (g/l) | Fe+ 2 (g/l) | Fe total (g/l) | Cu (g/l) |
|--------|-------------|-------------|----------------|----------|
| 1 | 3.4 | 1.0 | 3.0 | 2.5 |
| 2 | 3.4 | 1.0 | 3.0 | 2.5 |
| 3 | 3.4 | 1.0 | 3.0 | 3.0 |
| 4 | 3.4 | 1.0 | 3.0 | 3.5 |
| 5 | 2.5 | 1.0 | 3.0 | 3.5 |
| 6 | 2.5 | 1.0 | 2.8 | 4.0 |
| 7 | 2.5 | 0.8 | 2.6 | 4.2 |
| 8 | 2.5 | 0.8 | 2.5 | 4.5 |
| 9 | 2.5 | 0.8 | 2.5 | 4.8 |
| 10 | 2.5 | 0.8 | 2.5 | 5.0 |
| 11 | 2.5 | 0.7 | 2.4 | 5.0 |
| 12 | 2.5 | 0.6 | 2.0 | 5.5 |

Resumen de la prueba: consumo de ácido: 3.4 kg/kg de cobre; volumen de solución: 9 litros; velocidad de extracción 2.5 g/mes; extracción 2.4 %/mes; periodo de extracción proyectado: 3 años.

Esta prueba nos muestra que es posible recuperar cobre por lixiviación in situ aunque los resultados son de carácter preliminar requiriendo pruebas piloto en el campo.

3.2. Parámetros en la lixiviación in situ de la zona Apolo

De las pruebas efectuadas podemos deducir los niveles de las variables que intervienen. Ver Tabla N.º 2.

Tabla N.º 2. Lixiviación de minerales oxidados

| Componente | Lixivante gr./l | Solución Result. g/l |
|--------------------------------|-----------------|----------------------|
| Cobre | 1.5 | 5.0 |
| H ₂ SO ₄ | 3.5 | 3.0 |
| Fe total | 2.8 | 2.5 |
| Fe ⁺² | 1.0 | 0.7 |
| Fe ⁺³ | 1.8 | 1.8 |

Concentración del metal en la solución impregnada: 5 g/l y en la solución gastada 0.2 g/l.

En la zona Apolo se observa filtraciones sulfatadas debido a las precipitaciones pluviales lo que indica la posibilidad de lixiviación natural de los minerales de cobre.

3.3. Geología estructural

Con el objeto de identificar plenamente los rumbos y buzamientos de fallas y fracturas en la mina Raúl y en especial en el área Apolo, se trazó dos diagramas de frecuencias usando como base 24 estructuras pre

minerales y post minerales mapeadas en el campo. En las Fig. N.º 1 y 2 se observa que las pre minerales tienen rumbo N 10° a 45° E con buzamientos entre 60 y 80° a ambos lados y las post minerales presentan dos sistemas: el principal con rumbos N 30 a 50° W y el segundo con rumbos entre N 10° a 20° E y buzamientos variables.

De estos diagramas se deduce que: a) Existe un sistema principal de fracturamiento pre-mineral de rumbo N 45° E de tipo tensional comprobado por la abertura entre cajas y la tendencia a acuñarse en profundidad. Posterior a su relleno mineralizante, estas estructuras fueron falladas.

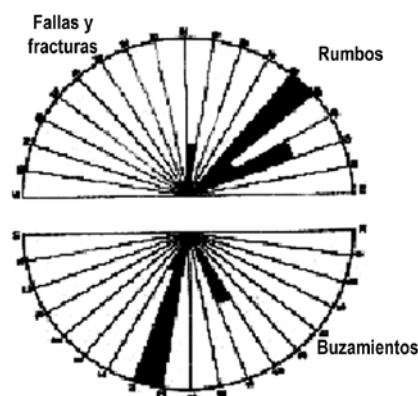


Figura N.º 1. Frecuencia de fracturamiento premineral, zona Apolo, mina Raúl.

b) Existen dos sistemas de fracturas post-minerales con rumbos medios N 15° E y N 40° W que fueron originados por fuerzas compresivas y c) El control estructural local del depósito se orienta en el rumbo medio N 45° E.

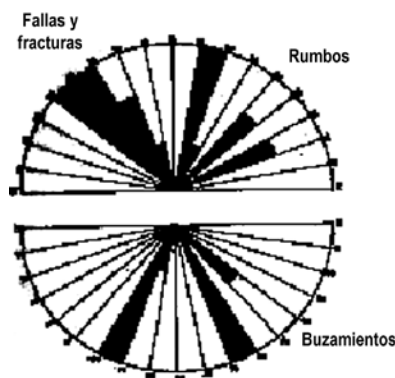


Figura N.º 2. Frecuencia de fracturamiento posmineral. Zona Apolo. Mina Raúl.

3.3.1. Depósitos de mineral oxidado y de enriquecimiento secundario

Las soluciones de cobre generadas en la zona de oxidación se depositaron in situ o emigraron y por evaporación o reacción con las paredes rocosas originaron depósitos de tamaño variable. Las soluciones que emigraron de las vetas y mantos con gran cantidad de sulfuros primarios precipitaron en las rocas adyacentes, fracturas y zonas de alteración. El mineral oxidado predominante es malaquita, también hay brocantita, crisocola, algo de chalcocita y cuprita.

En la mina Raúl la zona de oxidación llega hasta los 50 m de profundidad y la zona supergénica está entre los 15 y 50 m. Por debajo de esta zona de cementación profundizan los sulfuros hipógenos.

3.3.2. Reservas de mineral lixiviable

La Fig. N.º 3 presenta un pórfido diseminado ubicado mediante perforación diamantina. La Fig. N.º 4 muestra un corte vertical de dos mantos paralelos y su relación con el pórfido. La Fig. N.º 5 es el desarrollo de labores subterráneas en la zona Apolo. La Fig. N.º 6 presenta una sección longitudinal vertical del área Apolo escogida para lixiviación. Puede observarse los tajos minados antiguos que actualmente se encuentran abandonados en los niveles 0 y -35.

La superficie en explotación está dividida en 3 zonas de las cuales en la primera se ubica el área Apolo cuyas reservas lixiviables entre óxidos y sulfuros son de 550,00 tm de mineral conteniendo 1.3 % Cu. Total.

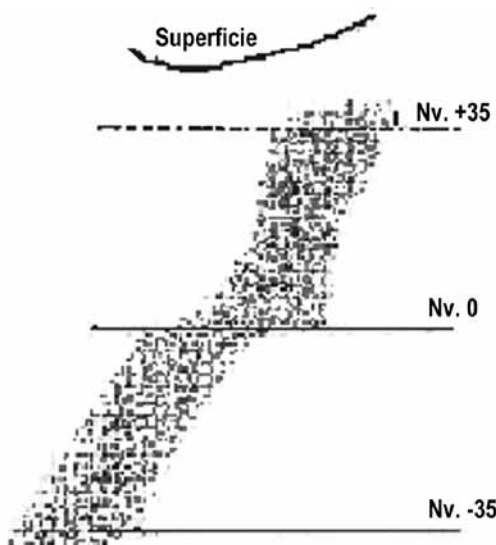


Figura N.º 3. Cuerpo mineralizado, Zona Apolo, Mina Raúl, Mala.

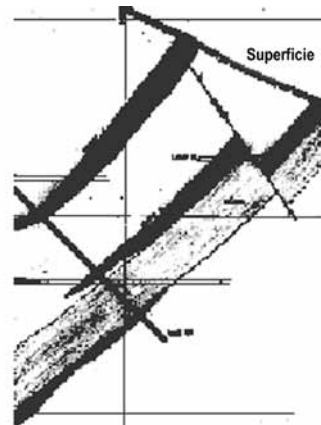


Figura N.º 4. Corte vertical de dos vetas, zona Apolo, mina Raúl.

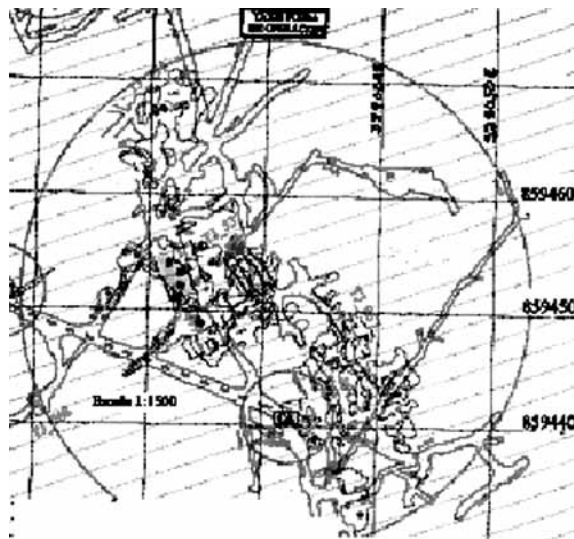


Figura N.º 5. Labores mineras, nivel 0, zona Apolo, mina Raúl.

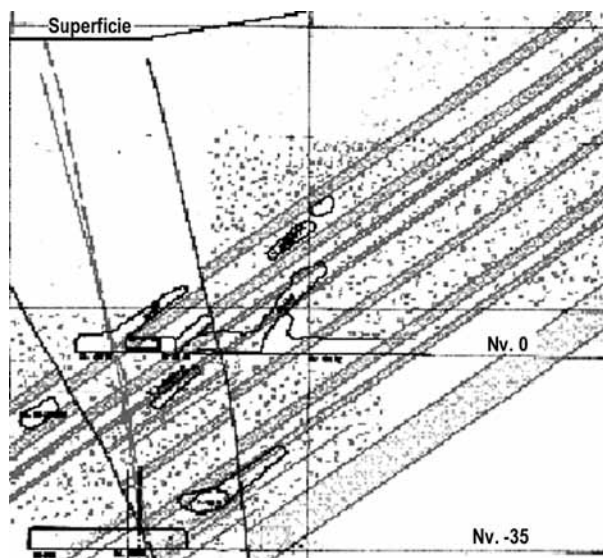


Figura N.º 6. Sección longitudinal, zona mineralizada Apolo, mina Raúl, Mala.

3.3.3. Zona propuesta para la lixiviación in situ

Para la etapa inicial de lixiviación se propone la lixiviación de las áreas A y B en los niveles 0 y -35, respectivamente, ubicado en la parte central de la zona Apolo (Fig. N° 7).

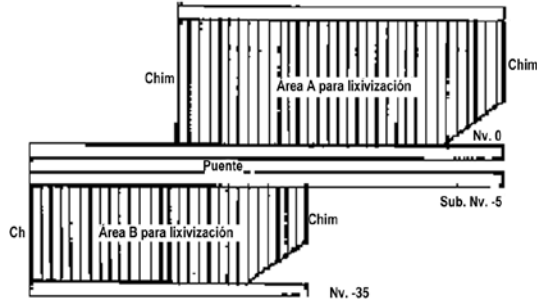


Figura N.º 7. Sección longitudinal áreas A y B, para lixiviación in situ, zona Apolo, mina Raúl.

El área A comprende los niveles 0 a +35 con 300,000 tm de mineral con una ley de 1.30% cobre total. El área es accesible desde la superficie y fue explotada en los niveles 0 y +35 por sulfuros de cobre quedando los óxidos que no pudieron ser enviados a la planta de flotación de sulfuros.

El área B corresponde al nivel -35, zona inferior del área A con una longitud de 150 m, buzamiento medio de 60° NE, 30 m de alto y una potencia media de 10 m. Las características geológicas, mineralógicas y de textura para la percolación se preservan con respecto a lo observado en los niveles superiores con pequeñas fallas orientadas N 30° E. La mineralogía es óxidos y sulfuros de cobre, bornita asociada a pirita y magnetita. La reserva remanente de esta área es de 250,000 tm con ley de 0.9% cobre. El área B es accesible desde superficie por la rampa principal.

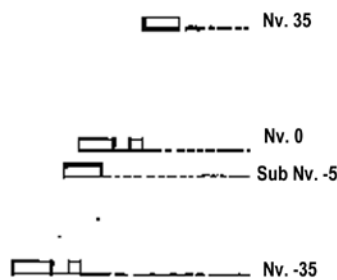


Figura N.º 8. Sección transversal Área de lixivización in situ mostrando labores principales de preparación.

IV. DESARROLLO Y PREPARACIÓN

4.1. Labores de desarrollo y preparación. Área B entre Niveles -35 y 0

La Fig. N.º 8 muestra algunas de las principales labores de desarrollo que debe efectuarse para poner en marcha este sistema de minado.

Sub nivel -5 a 5 m por debajo del nivel 0 con una sección de 10 m x 3.5 m y una longitud de 150 m. Para perforación de taladros largos entre el nivel 0 y el nivel -35, ventilación, acceso y bombeo de soluciones. Desde este subnivel se perforará taladros DTH de 3.5 pulg. de diámetros y se aplicará la solución lixivante al nivel -35, inclinado entre los niveles 0 y -35 con una sección de 2.50 m x 1.50 m y 35 m de longitud. Permitirá el acceso, ventilación y bombeo de soluciones.

Cámara inferior en el nivel -35 que servirá de cara libre inferior para la voladura del tajo (ampliación de la galería -35). Se usará como acceso y para la recuperación de la solución lixivante. La cámara tendrá 10 m de ancho y 3.60 m de altura para captar el exceso de volumen debido al esponjamiento del mineral roto.

Galería en el nivel -35 paralela a la cámara inferior con cruceros de 5 m de largo cada 25 m de distancia que conectará la galería con la cámara. Esta galería recibirá las soluciones cargadas de cobre. Será ubicada en la caja piso y se usará también para control e inspección de la operación y de posibles pérdidas.

Chimenea entre los niveles 0 y -35 en el extremo opuesto al inclinado. Esta labor de ventilación será de 2.5 m x 2 m.

4.2. Labores de desarrollo y preparación. Área A entre Niveles 0 y +35

Chimenea de 2.50 m x 2 m. entre los niveles 0 y +35 con una longitud de 35 m, permitirá el acceso, ventilación y bombeo de las soluciones.

Cámara superior en el nivel +35 con una sección de 10 m de ancho por 3.6 m de alto y una longitud de 150 m. para perforación de taladros largos entre los niveles 35 y 0, ventilación, y acceso. Desde este nivel se perforará taladros DTH de 3.5 pulg. de diámetro y se aplicará las soluciones lixiviantes al nivel 0.

Ampliación de la galería en el nivel 0 a un ancho de 10 m y 3.60 m de altura para recibir las soluciones lixiviantes y a su vez servirá de cara libre inferior para la voladura del tajo. Será acceso para la recuperación de las soluciones de lixiviación.

Galería en el nivel 0 paralela a la cámara inferior con cruceros de 5 m cada 25 m de intervalo que conec-

tarán la cámara con la galería. Se ubicará en la caja piso y recibirá la solución cargada de cobre sirviendo también de control e inspección de las operaciones incluyendo pérdidas de soluciones en los laterales.

Chimenea de 2.5 m x 2 m entre el nivel 0 y el nivel +35 en el extremo opuesto a la chimenea anterior para ventilación.

El mineral roto generado de las labores de preparación y desarrollo será ubicado en el nivel 0 en las zonas vacías explotadas anteriormente. Este material se sumará al proceso de lixiviación.

4.3. Preparación para la lixiviación in situ

Se requieren algunas labores adicionales como taladros para el ingreso y salida de las soluciones, preparación del tajo para encausar las soluciones lixiviantes tal que no se infiltren por el piso o cajas del tajo entre niveles -35 y el subnivel -5.

Entre niveles -35 y 0 del área B: Perforación de 2 taladros de 5 pulg. de diámetro para las tuberías de circulación de soluciones lixiviantes y solución impregnada. Impermeabilización del piso del tajo Nivel -35 para evitar pérdida de solución y la contaminación de aguas freáticas, mediante la colocación de geomembranas de polietileno. Para ello se preparará en el piso del tajo una cavidad longitudinal a ambos lados a una cierta profundidad para insertar la geomembrana para captar las soluciones que puedan pasar a través de la caja piso. Sobre la geomembrana de alta resistencia, se colocará una capa de mineral fragmentado de 1.50 m de altura para amortiguar al material que cae de los disparos y no dañe la geomembrana.

Perforación de taladros de control y captación de soluciones en la roca encajonante. Los taladros serán de 5 pulg. de diámetro en la caja piso y zonas débiles como fallas y diaclasas. Estos taladros serán verticales desde el nivel 35 hasta el nivel -45 o sea 10 metros debajo del nivel inferior del tajo para monitorear las posibles infiltraciones por las cajas o el piso ante la posibilidad de rotura de la geomembrana en los niveles 0 y -35.

Preparación de una cámara de bombeo en el nivel -35 para captar y bombear la solución impregnada que fluirá hacia la cámara por la gradiente negativa del nivel de colección.

Entre niveles 35 y 0 del área A: Perforación de 2 taladros de 5 pulg. de diámetro para las líneas de circulación de soluciones lixiviantes e impregnada. Impermeabilización del piso del tajo en el nivel 0 mediante geomembranas de polietileno para evitar pérdidas de soluciones y la posible contaminación de las aguas freáticas. Para esto se preparará en el piso del tajo una cavidad longitudinal a ambos

lados a una cierta profundidad, para insertar la geomembrana a lo largo del tajo para los mismos propósitos indicados en el caso del área B. Sobre esta geomembrana se colocará una capa de mineral fragmentado de 1.50 m de altura para protegerlo del material que caerá de los disparos. Preparación de una cámara de bombeo en el nivel 0 para captar y bombear la solución impregnada que fluirá hacia la cámara por la pendiente negativa del nivel de colección.

4.4. Perforación y voladura de los bloques

El material debe tener fragmentación adecuada para la lixiviación in situ. Las características geológicas, estructurales y geomecánicas del mineral y de la roca encajonante y la experiencia ganada en la aplicación de los dos métodos de minado en Raúl permitirán determinar los parámetros de la perforación y voladura. Los taladros son DTH de 30 m de largo de 3.5 pulg. de diámetro. El disparo es eléctrico y se vuelan con cargas concentradas de 1 m de altura espaciados con micro retardos y dinamita gelatina de 65%.

4.5. Parámetros de perforación y voladura

Los siguientes datos de campo se usaron para determinar los parámetros de perforación y voladura: Matriz rocosa: porfirítico andecítico; discontinuidades: diaclasas y fallas de rumbo NE y NW; buzamientos de 50° a 70° NW; textura: fracturada y compacta; densidad in situ del mineral: 2.7 tm/m³; dureza: 6 en la escala de Mohs; tenacidad: friable y regular fragmentación; sismicidad: velocidad de onda 5,500 a 6,500 m/s; esponjamiento: 30%; resistencia a la compresión: 1200 kg/cm²; resistencia a la tensión: 250 kg/cm².

Mineral con relleno de óxidos de hierro y cobre, Malla: 3.0 x 3.0 m tipo alterno de orientación NE-SW. Diámetro de taladro: 3.5 pulg. Los taladros serán perforados con equipo DTH 30 m de longitud como promedio de nivel a nivel, inclinados a 60° concordante con el buzamiento del cuerpo diseminado. La perforadora debe estacionarse en puntos de la malla perpendicular al rumbo del cuerpo diseminado. La malla de perforación permitirá obtener fragmentación adecuada con un diámetro de partícula de 25% < 0.5 cm. y 5% > 30 cm. o el 85% de un diámetro menor a 10 cm. y el 45% menor a 1 cm que permitirá asegurar buena velocidad de percolación y recuperación.

No hay humedad en los taladros, pudiendo usar explosivos ANFO, ANFO aluminizado hasta 10% Al y dinamita de 65% como carga puntual. Taco superior: 3 m., iniciadores HDP de 1 lb. para las columnas: longitud de carga: 15 m; densidad de carga: 15 lb./pie; Factor de potencia: 0.4 kg/tm; Cordón detonante: Pentacord 5 PE o similar; retardos de 9 a 15 m.

4.6. Lixiviación y tratamiento posterior

La lixiviación se inicia en el Área B para lo cual la solución lixivante se aplica por aspersión en el sub nivel -5 con una velocidad de percolación de 7 a 8 l/h/m². La solución se percola hasta el nivel -35 desde donde se bombea hasta el nivel +35 para la lixiviación del área A. En el nivel 0 se acumula la solución en una cámara y luego es bombeada a superficie para su tratamiento en la planta de Cemento de Cobre que trata los óxidos mediante el proceso de lixiviación-precipitación. Actualmente esta planta produce 50 tm de cobre fino como cemento de cobre de 70% cobre metálico. La Fig. N.º 9 muestra esquemáticamente el orden de la lixiviación entre las áreas A y B.

Una segunda opción en la lixiviación de las áreas A y B consiste en aplicar la solución en el nivel +35 y por percolación recibirlo en el nivel 0 donde se acumula en la cámara y luego se bombea a superficie para su tratamiento en planta. El área B seguiría un proceso independiente similar al área A dependiendo del grado de saturación de la solución resultante por contener sulfuros además de óxidos.

La solución lixivante llega por gravedad a los diferentes niveles para lo cual se debe instalar tuberías PVC de 4, 3 y 2 pulg de diámetros y mangueras de polietileno de 2 pulg. de diámetro equipados con sistemas de aspersión y válvulas reguladoras de flujo. La solución saturada se bombeará a superficie mediante tuberías de alta presión para su tratamiento en la planta.

La solución cargada de cobre se represa en el nivel -35 y desde este punto se bombea a la planta de tratamiento en superficie o al nivel 35 para la lixiviación del área A dependiendo del nivel de carga de la solución. En este caso el producto de la lixiviación de esta área se recoge en el nivel 0 para ser bombeada a la planta de cemento de cobre. La solución lixivante al atravesar la zona de óxidos incrementará su contenido de cobre a 5 g/l disminuyendo su contenido de hierro.

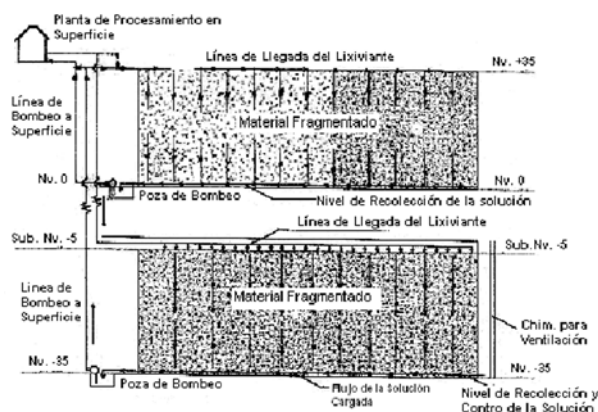


Figura N.º 9. Diagrama de lixiviación in situ. Zona Apolo. Mina Raúl.

4.7. Balance de flujos y de la solución

Área de lixiviación: A + B 300 m²

Mineral en áreas A + B: 300 x 30 x 2.7 = 243,000 tm

Contenido metálico de cobre: 243,000 x 0.8% = 1,944 tm

Cobre recuperable: 1,944 x 0.5 = 972 tm

Flujo lixivante: 300 m² x 8 l/h/m² = 24,000 l/h

Flujo de solución impregnada recuperable: 24,000 x 0.85 = 20,400 l/h

Volumen de solución impregnada/mes: 20,400 x 24 x 30 = 14'688,000 litros

Contenido de cobre en el impregnado: 5.0 gr./l.

Tonelaje de cobre/mes: 14'688,000 x 5 = 73'440,000 gr. = 73.44 tm.

Extracción mensual de cobre: 4.0%

Tiempo de extracción: 3 años

4.8. Análisis económico

Costos de desarrollo y preparación

Trabajos en niveles. 35, 0, -35 y sub nivel -5. Chimeneas, etc.: \$ 292,500

Perforación DTH 6,000 m: 0.36 \$/tm

Voladura: 0.50

Extracción mineral de desarrollo: 0.35

Lixiviación con H₂SO₄ 0.88

Tratamiento en planta de cementación: 1.70 de cobre

Adicionales (adm. + GG + medio 1.83 ambiente + ventas)

Costo de producción

Una tm de mineral 8.8 lbs Cu fino al 50% de recuperación: 5.62

Costo unitario: 0.64

Costo mensual: 2204 x 0.64 x 73.44 = \$ 103,590

Costo anual: 103,590 x 12 \$1'243,100

Ingresos

Precio lb. de cobre a 4 años: \$ 1.30

Producción mensual de cobre fino: 73.44 tm

Ingreso mensual: \$ 210,420

Ingreso anual: \$ 2'525,000

Inversión

Desarrollo y preparación: \$ 289,000
 Perforación y voladura: 200,000
 Extracción mineral remanente
 Lixiviación 0.32 x 300,000: 96,000
 Cementación: 245,000
 Servicios (agua, energía eléctrica, otros): 350,000
 Capital de trabajo 150,000
 Ingeniería y otros 120,000
 Total inversión \$ 1'450,000
 Puesta en marcha del proyecto: 1 año
 Flujo de fondos
 Ingreso anual: $73.44 \text{ tm} \times 1.3 \text{ \$/lb} \times 2,204 \text{ lb/tm} \times 12 = \$ 2'525,000$
 Costo anual: \$ 1'243,100
 Interés anual: (200,000)
 Utilidad anual: 1'081,900
 Depreciación anual: 20% de 1'450,000 290,000
 Ingreso Bruto: 792,900
 Participación laboral: (según ley) 8% (63,350)
 Utilidad antes de impuestos: 728,550
 Impuesto a la renta: 30% 218,570
 Utilidad después de impuestos: 509,980
 Depreciación: 290,000
 Amortización: 290,000
 Flujo de caja anual: 509,980
 VAN al 20 %: $509,980 \times 2.9906 - 1450,000 = 75,140$
 TIR: 22 %
 Tiempo de retorno: TRI = 3 años

V. CONSIDERACIONES AMBIENTALES

5.1. Hidrología e hidrogeología.— No existen cursos de agua superficial en el área de la mina. La altura de la mina oscila entre 50 y 400 msnm y tanto el río Mala como las quebradas más cercanas se encuentran alejados del yacimiento y se caracterizan por sus pequeñas cantidades de agua en los meses de verano manteniéndose secos durante el resto del año excepto el río Mala que permanece con un caudal importante de agua en estos meses.

5.2. Calidad y uso de la tierra.— El aporte de contaminantes que la minería in situ hace al suelo es prácticamente nulo en razón de que los lixiviantes actúan en profundidad más allá de los límites de

los suelos donde las rocas circundantes son aislantes naturales del proceso. La zona es eriaza no existiendo tierras agrícolas por tratarse de una topografía accidentada y carente de fuentes de agua. Las operaciones se desarrollan en un desierto cubierto de material aluvial y eólico, no existiendo vegetación ni fauna silvestre.

5.3. Sismicidad.— La mina se encuentra dentro de la franja sísmica originada por la subducción entre la placa Oceánica de Nazca y la placa Continental Sudamericana. Sin embargo, por encontrarse el yacimiento emplazado dentro de una formación intrusiva diorítica y granodiorítica competente, los efectos serían de poca consecuencia.

5.4. Calidad del agua.— En la mina Raúl ninguna labor subterránea ni perforación diamantina hasta una profundidad cercana al nivel del mar ha detectado aguas subterráneas pero será necesario monitorearlo a través de perforaciones efectuadas para este propósito. En la zona de influencia no existen cursos de agua superficial.

El agua para las operaciones de mina, planta y consumo doméstico, proviene de pozos de bombeo situados a varios kilómetros de la mina.

5.5. Calidad del aire.— La contaminación del aire en la minería in situ es mínima limitándose a emanaciones de SO₂ y a la generación de polvo en suspensión por las unidades móviles.

La calidad del aire en la zona de las operaciones no será afectada salvo el caso de la perforación y voladura para la fragmentación del mineral así como el transporte de minerales y el movimiento interno. Los niveles de ruido que afectarán el medio ambiente serán mínimos entre ellos el ruido de la perforación y voladura en la etapa de preparación del mineral. Durante la operación de lixiviación, los equipos de transporte originarán cierto nivel de ruido que deberá monitorearse y mitigarse.

El medio ambiente biológico tiene las siguientes características: la operación minera se halla en un desierto árido-subtropical donde la vegetación natural es muy pobre por falta de precipitaciones, ausencia de aguas superficiales y subterráneas. En las temporadas de lloviznas y humedad crecen ciertas plantas estacionales pequeñas. En el entorno tampoco se encuentran especies de cultivos pero sí en la localidad de Mala a unos 8 km al norte donde se tienen frutales y hortalizas.

La fauna silvestre es también muy limitada. En la zona del yacimiento no existen áreas naturales ni especies protegidas.

En el medio ambiente socio-económico el campamento y las oficinas administrativas se localizan en las

cercanías de la mina. La población más cercana es el pueblo de Mala y a 3 km al oeste se ubica el caserío Bujama. Ambos poblados no son factibles de impactos ambientales por la operación de minado in situ.

VI. CONCLUSIONES

Debido a su bajo costo y versatilidad, la Minería in situ puede recuperar yacimientos minerales marginales, inaccesibles y de metalurgia complicada.

Permite un buen control ambiental de contaminantes del aire, ruido, suelo y de corrientes subterráneas de agua. No altera la topografía y el paisaje. No se generan hundimientos en superficie.

Existe un reducido riesgo para la salud y seguridad de los trabajadores y los costos de implementación ambiental y de seguridad son inferiores a cualquier costo similar de otros métodos de explotación convencional.

El agotamiento de reservas de minerales de alta ley alentará el desarrollo de la minería in situ. Su flexibilidad permitirá su aplicación a muchos minerales como sulfuros simples o compuestos

Se puede aplicar con éxito la lixiviación in situ, a grandes profundidades debido a que hay incremento de temperatura y presión hidrostática que favorecen el proceso porque activan la disolución del oxígeno.

Hay un requerimiento mínimo de personal para el mantenimiento de la operación ya que el sistema trabaja fundamentalmente con bombas y tuberías.

Las desventajas del sistema consisten en la dificultad en contener y controlar la solución lixivante debido a fallas y ausencia de formaciones de confinamiento, imposibilidad de estimar con certeza el nivel de recuperación de los metales contenidos. La recuperación es generalmente baja en velocidad y en porcentaje comparado con lo obtenido en plantas de tratamiento en superficie. Pero el sistema se justifica si consideramos que se aplica en áreas abandonadas y de difícil acceso.

No hay corrientes de aguas superficial/subterránea que pueden contaminarse por tratarse de una zona desértica

Los índices económicos como el VAN y el TIR dan buenas perspectivas para el sistema.

La ejecución de este proyecto permitirá la recuperación de reservas remanentes abandonadas en las 3 zonas de la mina Raúl y también de la mina Condestable que contiene reservas marginales.

VII. REFERENCIAS

1. Ahlness, Jon K., Tweeton D.R., Larson W. C. and Millenacker D, J, 1991. In situ Mining of Hard Rock
2. Dudas L.; Maas H. and Bhappu R. Role of Mineralogy in Heap and in situ Leaching of Copper Ores. *Mountain States Research and Development*. Tucson, Arizona, USA. 1974.
3. Lang, L.C. and Morrey W.B.. Scientific blasting for in situ leaching proves successful in Agnew Lake Mines. Technical Marketing Services, Canadian Industries. 1974.
4. Pool, T.C. Solution Mining. The flexible approach. Proceedings In Situ All Mining Symposium. Wyoming Mining and Metal Section SME-AIME. 1989.
5. Richner D. R. In Situ Mining of Soluble Salts. SME Mining Engineering Handbook H. L. Hartman, Senior Editor, Littleton, Colo. USA. 1992.
6. Sullivan, J. D. and Ostrea E. O. Factor Governing the Entry of Solution into Ores during Leaching. U.S. Bureau of Mines, USA. 1981.
7. Valle, Alonso. In Place Leaching of a Block Caving Mine. El Teniente Division of Codelco, Chile. 1984.