

Positivos resultados en experiencias de ENAMI

LIXIVIACION ACIDA Y BACTERIANA EN PILAS

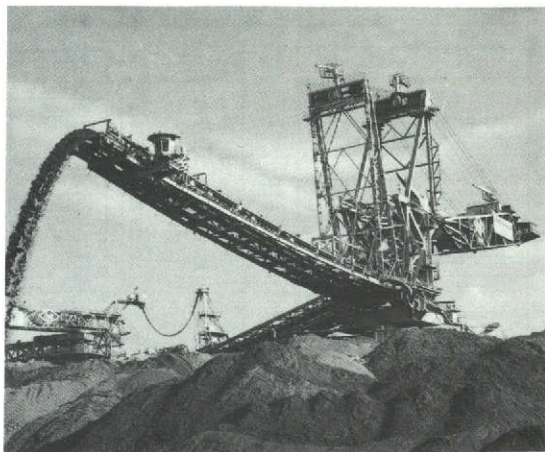
Exposición de los ingenieros René Canello S. y Raúl López O., de ENAMI, en la Trigésimo Octava Convención del Instituto Ingenieros de Minas.

Una de las metas de ENAMI es investigar y desarrollar nuevas tecnologías cuya implantación permita a la empresa operar en condiciones eficientes, manteniéndola en niveles competitivos en el mercado nacional e internacional.

Dentro de este contexto, en consideración a los altos costos de los procesos hidrometalúrgicos tradicionales, ENAMI ha emprendido, desde hace algún tiempo, el estudio y la posterior implementación de nuevas tecnologías de procesamiento que permitan activar, principalmente, la pequeña minería del cobre.

Estas tecnologías no convencionales, dentro de las cuales se encuentra la Lixiviación en Pilas, asociada a una planta de extracción por solventes y electrodeposición, que concluye con la obtención de cátodos de alta pureza, se muestran atractivas por los menores requerimientos de inversión, sus bajos costos de operación y porque no representan impacto contaminante sobre el ambiente.

Desde mediados de 1983, ENAMI ha realizado pruebas de laboratorio y a escala piloto sobre la aplicación de tecnologías de lixiviación en pilas, las cuales al mostrar resultados promisorios, han contribuido a iniciar parcialmente el desarrollo



industrial en sus plantas de beneficio. La total aplicación de esta tecnología dependerá, fundamentalmente, de la respuesta que el sector minero brinde a este nuevo proceso, en las diferentes regiones del país.

El presente trabajo describe las experiencias y algunos resultados obtenidos en relación a la aplicación de la lixiviación ácida en pilas, aplicada a minerales oxidados de cobre en la Planta Osvaldo Martínez de El Salado y a la Lixiviación Bacteriana en Pilas, aplicada a los minerales sulfurados de cobre de Andacollo.

LIXIVIACION ACIDA EN

PILAS DE MINERALES OXIDADOS DE COBRE

La lixiviación en pilas es una de las técnicas de procesamiento de minerales que ha tenido un fuerte desarrollo en los últimos años.

La investigación de nuevas metodologías en el proceso de lixiviación ha permitido implementar procesos hidrometalúrgicos muy atractivos en gran escala. Ejemplo de ello son los procesos aplicados al uranio, oro, plata, cobre y otros minerales.

En años recientes se ha acrecentado los estudios de los mecanismos de disolución de la especie metálica

a la fase líquida en el proceso de lixiviación. Esto ha permitido mejorar las recuperaciones, cinética, consumos involucrados en el proceso y comprender con más exactitud las variables que intervienen en el proceso. Como consecuencia de lo anterior, el desarrollo de los procesos de extracción por solventes, intercambio iónico y absorción-desorción, han hecho de la hidrometalurgia una herramienta exitosa.

Dentro de este marco, el presente trabajo describe brevemente los resultados de las pruebas de laboratorio, a escala piloto y la aplicación a escala semi-industrial de los estudios de lixiviación en pilas de cobre que ENAMI ha realizado desde 1986, aplicados a minerales oxidados de la zona de Chañaral.

ENAMI contempla además iniciar próximamente las experiencias metalúrgicas correspondientes para incorporar la lixiviación en pilas por cianuración a los minerales de oro y plata.

CONCLUSIONES

Las pruebas metalúrgicas de laboratorio y a escala industrial de lixiviación ácida en pilas de mineral oxidado de cobre, que se están efectuando con minerales de la zona de Chañaral, tienen los siguientes objetivos principales:

- Evaluar el comportamiento del sector minero en relación al abastecimiento ante la aplicación de una Tarifa Experimental.

- Definir las variables operacionales del proceso para optimizar las recuperaciones de cobre y obtener el máximo de beneficio económico.

Se pueden citar varias conclusiones que cubren diferentes aspectos.

Las recuperaciones han observado un incremento de 8% que en términos de finos de cobre; han aumentado en un 41% con respecto al promedio desde 1985 a septiembre de 1986, lo que ha significado una mayor producción de precipitados de un 56%.

Cabe destacar que la lixiviación ácida en pilas permite agregar al proceso productivo, minerales oxidados de baja ley, los que antes no podían ser incorporados económi-

camente a la operación ya que el proceso tradicional presenta una recuperación menor.

Se estima que, sometiendo los rípios de este sistema al proceso de lixiviación secundaria, la recuperación global aumentará en forma significativa en relación al proceso de lixiviación convencional aplicado anteriormente en esa planta, con los mismos minerales de la zona.

El sistema de lixiviación ácida en pilas es técnicamente factible y modificando algunas variables operacionales puede operar acoplado al proceso de extracción por solvente y electro obtención de cobre, eliminando el método actual de precipitación con chatarra para la obtención de precipitados de Cu.

Esto último permitirá producir en la misma planta cátodos de cobre de calidad grado "A" y reducir el consumo unitario de ácido sulfúrico, evitando los costos de consumo de chatarra, fusión, conversión, refinado a fuego y refinado electrolítico, derivados del proceso tradicional que deben seguir los precipitados de cobre.

DESCRIPCION DEL PROCESO

La lixiviación ácida en pila, de minerales de cobre oxidado, por aglomeración con agua y ácido sulfúrico y el posterior regado por aspersión con escurrimiento de la solución en un lecho poroso no saturado, ha sido motivo de varias patentes con distintos objetivos. Sin embargo, las características físico-químicas, factores cinéticos y metodología del proceso, son análogas y las respuestas a los distintos parámetros o variables al proceso son similares para todos los casos.

En la Planta Osvaldo Martínez se está ocupando la patente N° 30851, cedida a ENAMI para ser utilizada en sus procesos de lixiviación, a través de un Convenio de Licencia otorgado con fecha 30 de mayo de 1986 por CODELCO CHILE.

La lixiviación de minerales oxidados de cobre, mediante este proceso se puede dividir en dos etapas:

- Curado y aglomeración.
- Lixiviación con irrigación por aspersión.

La etapa de curado y aglomeración contacta al mineral chancado con ácido sulfúrico concentrado y agua o líquidos de reciclo.

Los objetivos de esta etapa son básicamente los siguientes:

- Uniformar el tamaño de las partículas, ligando los finos a los gruesos.

- Aumentar la porosidad del lecho.

- Mejorar la permeabilidad del lecho.

- Fracturar la roca matriz, lo que permite crear y mejorar vías de ataque y penetración.

- Inhibir la sílice soluble.

- Transformar las distintas especies de cobre oxidado en sulfato de cobre, el cual es soluble en agua.

La proporción de agua y ácido sulfúrico y la cantidad de ácido total que se agrega en la etapa de curado y aglomeración, ha de ser tal que permita:

- Lograr la máxima sulfatación de cobre oxidado por unidad de ácido sulfúrico agregado.

- Operar a una concentración final de mezcla de ácido sulfúrico y agua, de modo que la reactividad de la ganga sea menos efectiva sin dejar de inhibir la sílice soluble.

Ambas condiciones están, en todo caso, acotadas por las características de permeabilidad que debe alcanzar el lecho.

La lixiviación posterior del lecho curado y aglomerado se efectúa con una solución diluida de ácido sulfúrico, utilizándose para ello aspersores que producen una lluvia fina. El líquido que irriga el lecho escurre por las partículas de él, sin inundarlo totalmente. Las reacciones químicas involucradas en el proceso se presentan por frentes de reacción.

Una curva cinética típica de recuperación de cobre y consumo de ácido sulfúrico mediante este proceso se muestra en las Figuras N°s 1 y 2, respectivamente.

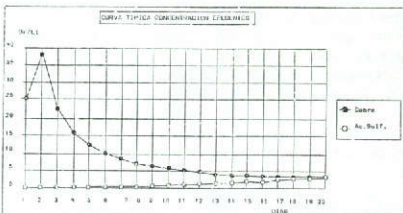
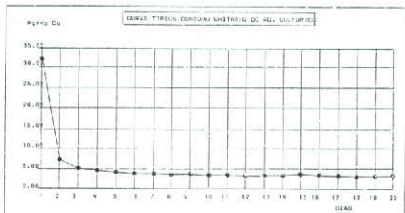
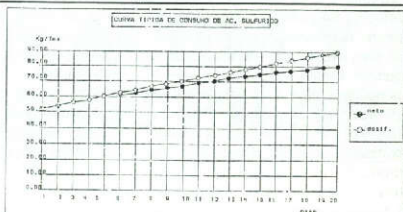
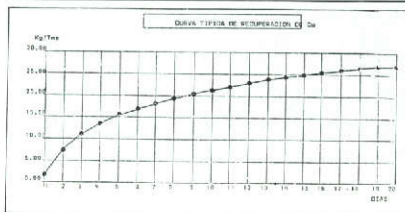
El cociente entre el consumo de ácido sulfúrico y la cantidad de cobre recuperada en función del tiempo, corresponde al consumo unitario de ácido sulfúrico y es una curva típica que se muestra en la Figura N° 3. Esta curva muestra

que al inicio de la lixiviación el consumo unitario de ácido es muy alto y baja a un mínimo y posteriormente sube.

Debe quedar claro que prolongar

el proceso más allá del mínimo de la Figura N° 3 para mejorar la recuperación del proceso, se hará en desmedro del consumo unitario de ácido sulfúrico. En todo caso, no es

regla general que el punto de mínimo consumo unitario de ácido sulfúrico coincida con el punto de máxima utilidad.



ARREQUIP

Maquinaria y Equipo de Construcción



* COMPRESORES
(185-600 PCM)



* GRUPOS GENERADORES
(10-135 KVA)



* CARGADORES FRONTALES
(3,5-5 m³)



* RODILLOS AUTOPROPULSADOS
(1.000 Kgs.)

Sargento Aldea 1370 Tel. 5552214-5510579

CYANAMID

La revolución tecnológica para la industria minera lograda por CYANAMID tras años de investigación y desarrollo.

La más amplia gama de reactivos al servicio de la industria minera:

Colectores
Espumantes
Depresantes
Floculantes
...y

siempre una solución a sus problemas mineros.

CYANAMID
CHILE LTDA.

Ministro Carvajal N° 6
Teléfono: 2252345
Providencia - Santiago

Otro aspecto que se debe tomar en cuenta en la etapa de lixiviación del lecho curado y aglomerado es la característica de los efluentes en cuanto a la concentración de cobre y ácido sulfúrico libre en función del tiempo, lo que se muestra en la Figura N° 4.

De acuerdo a lo anterior, el proceso de lixiviación generalmente está acoplado a un tratamiento de los efluentes que requiere una concentración de cobre relativamente constante. Para ello se procede mediante la operación simultánea de más de una pila, desplazando los inicios y términos de éstas, de modo que la mezcla de la fracción de los efluentes de cada una de ellas, den como resultado concentraciones de cobre relativamente uniformes y concentraciones de ácido sulfúrico aptas para el proceso.

FASE EXPERIMENTAL

La experiencia metalúrgica de lixiviación en pilas se aplicó al stock de minerales oxidados de la compra normal existente en la faena, con una ley media de 3,2% de cobre soluble y a minerales oxidados correspondientes al abastecimiento derivado de la aplicación de la Tarifa Experimental, que contenía minerales que con métodos convencionales de lixiviación no era posible beneficiar económicamente.

Las etapas de la fase experimental para ambos casos fueron dos. La primera corresponde a pruebas a nivel piloto en columnas y que incluyen ensayos a nivel laboratorio. La segunda etapa propiamente tal corresponde a las experiencias a escala semi-industrial.

El objetivo de la primera etapa es determinar las variables metalúrgicas y condiciones de operación más adecuadas para el proceso y proyectar los resultados de la fase piloto a la fase semi-industrial.

Las variables operacionales principales que se estudiaron en la fase piloto fueron la dosis de ácido sulfúrico y agua en la etapa de curado y concentración de ácido sulfúrico en la etapa de lixiviación. Las variables secundarias analizadas co-

rresponden a permeabilidad, tasa de riego, altura del lecho, cinética de sulfatación y otros.

Los principales resultados analizados en las pruebas a nivel piloto fueron: la recuperación de cobre, consumos de ácido y características de los efluentes.

La segunda etapa corresponde a la prueba de lixiviación en pilas a escala semi-industrial.

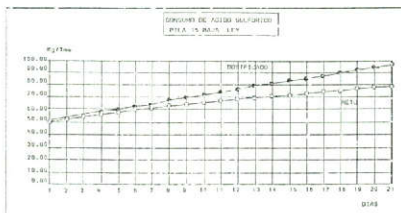
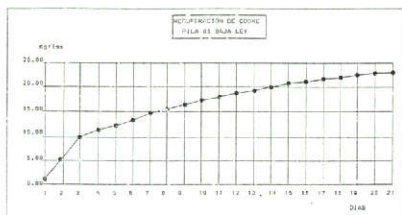
Para poder efectuar esta etapa se adecuó un sector de terreno dentro de la Planta Osvaldo Martínez de El Salado, donde se instaló un revestimiento de polietileno de alta densidad y sus respectivos estanques, red de riego y sistema de curado CO-DELCO.

La superficie de la carpeta es de 3.200 m² y está dividida en 4 sectores, que permiten operar dos pilas simultáneamente en forma independiente en los ciclos de carguío, lixiviación y descarga. La capacidad de tratamiento es suficiente para poder beneficiar un abastecimiento de 300 ton/día de mineral.

La etapa experimental de lixiviación en pilas a escala semi-industrial permitió conocer la respuesta del proceso, incluyendo las influencias de factores adicionales como son: inercia térmica, vientos, movimiento de materiales y todo lo relacionado con una operación a mayor escala.

Las Figuras N°s 5 y 6 muestran la recuperación de cobre y consumo de ácido sulfúrico, por seguimiento cinético de una de las pilas correspondiente a la prueba a escala semi-industrial llevada a cabo con mineral adquirido con la tarifa experimental.

Las experiencias a escala laboratorio y semi-industrial se aplicarán a un stock de ripsos antiguos de lixiviación, existentes en la Planta Osvaldo Martínez, en una cantidad aproximada de 500.000 tons con una ley media de 0,6% de cobre soluble.



REFERENCIAS

1. Un método y un aparato para lixiviación de minerales en estrato delgado. Pat. Chilena N° 29.522.
2. Un procedimiento para inhibir la disolución de sílice durante la lixiviación ácida de menas silicatadas de cobre. Pat. Chilena N° 30.851.
3. Utilización Convenio Licencia Patente de Invención N° 30.851 de CO-DELCO. (Informe Interno ENAMI).
4. Experiencia Metalúrgica a Escala Industrial de Lixiviación en Pilas con Mineral Oxidado de Cobre de Baja Ley (Informe Interno ENAMI).

LIXIVIACION BACTERIANA EN PILAS DE MINERALES SULFURADOS DE COBRE

La Empresa Nacional de Minería es propietaria del Yacimiento Andacollo, ubicado en la IV Región, vecino al pueblo de Andacollo, a 54 kms al sur-este de La Serena.

La aplicación de las técnicas tradicionales de beneficio de minerales sulfurados de cobre de baja ley y el nivel de precio del cobre, determinaron que el proyecto fuera económicamente poco atractivo.

En vista de lo anterior, ENAMI decidió estudiar otras alternativas de procesos que tuvieran expectativas de ser aplicables y que presentaran ventajas sobre el método de concentración por flotación y tradicional, tales como menor inversión, menor costo de operación y menores consumos de agua y energía.

Específicamente, en el procesamiento de mineral se planteó, entre otras, la ruta hidrometalúrgica de lixiviación bacteriana teniendo en cuenta las actividades de lixiviación in situ del mineral, que hacía años que se realizaban en Andacollo y, además, los progresos en la aplicación de la lixiviación bacteriana a minerales mixtos y sulfurados en operaciones en pilas y botaderos.

CONCLUSIONES

Los resultados generados en las Experiencias Metalúrgicas Piloto y Semi-Industrial en Andacollo permiten establecer lo siguiente:

El proceso de lixiviación bacteriana y la posterior recuperación del cobre desde la solución rica por extracción por solventes y electrodeposición, aplicado al mineral de la zona supergénica exterior de enriquecimiento secundario del Yacimiento Andacollo es técnicamente factible.

La cinética de recuperación del metal, en términos generales y dentro de un margen aceptable de error, se ajusta a los valores proyectados en base a los resultados obtenidos en el estudio metalúrgico a nivel piloto.

Como producto final del proceso

estudiado, se obtienen cátodos de cobre que pueden ser comercializados bajo calidad high grade.

Otras conclusiones más específicas se exponen a continuación.

CARACTERISTICAS DEL MINERAL

El mineral procesado es un compuesto constituido por material de los piques AN-16 (9%), 61-A (26%), 64-A (35%) y Nuevo (30%), a diferencia de aquel utilizado en el estudio piloto que correspondió exclusivamente al Pique AN-16; de acuerdo a esto, los minerales considerados en las dos oportunidades no son estrictamente comparables.

La distribución granulométrica del mineral cargado en la pila, indicó una granulometría más fina que aquella estudiada a escala piloto; los tamaños promedios alcanzan a 21 mm y 34 mm, respectivamente.

Según la caracterización expuesta en la Tabla 1, la ley analizada de cabeza de los minerales estudiados a nivel semi-industrial y piloto es bastante similar.

Tabla 1: Leyes de Cabeza Analizada		
	Cu _T (%)	Cu _{Sol} (%)
Compósito Pila	0,86	0,18
Fase Piloto	0,88	0,12

La caracterización mineralógica permite establecer la contribución de las especies portadoras al contenido de cobre fino de la Tabla 2. De acuerdo a los valores presentados, el mineral de la experiencia semi-industrial debiera ser más accesible a la lixiviación bacteriana; ello se concluye al comparar el fino presente en las especies más fácilmente oxidables (calcosina, covelina y bornita), además de aquel en las especies oxidadas.

Tabla 2:
Contribución de Especies Mineralógicas al Fino Total de Cobre (%)

Especie	Compósito Pila	Fase Piloto
Calcopirita	9,3	20,5
Calcosina	59,3	61,4
Covelina	10,5	2,3
Oxidos	20,9	13,5
Total	100,0	100,0

LIXIVIACION

Los datos de concentración de oxígeno de las muestras de aire tomadas al interior de la pila, indican que el lecho estuvo sometido a una buena aireación, de manera que la tasa de consumo de oxígeno por el proceso bacteriano fue en todo momento inferior a la tasa de acceso de oxígeno por aireación. Esta situación se atribuye a la granulometría del chancado y al bajo contenido de material fino (menor que 0,3 mm), el que alcanzó a 5% del peso total cargado.

De las temperaturas determinadas en el interior de la pila se concluye que, a pesar de la buena aireación descrita en el punto anterior, el proceso bacteriano genera una cierta cantidad de calor que no se disipó por completo al ambiente y, por el contrario, permitió alcanzar una temperatura superior a la ambiental.

Se verifica también el aumento de la temperatura a mayor profundidad y durante los períodos de reposo; en los períodos de lavado, en cambio, la temperatura disminuye.

El enriquecimiento en cobre de la solución a su paso por la pila fluctuó entre valores promedio semanales de 5,0 g/l y 0,4 g/l. Como es de esperar, el alto enriquecimiento inicial disminuye a medida que en las superficies más accesibles a ataque decrece el contenido de cobre oxidado y de las especies sulfuradas más fácilmente, todo lo cual se refleja en un empobrecimiento del mineral.

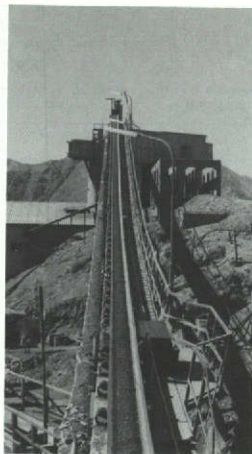
El nivel de enriquecimiento de la solución dependió evidentemente del período de reposo a que se sometió el mineral antes del lavado, de la duración del lavado y de la tasa de irrigación utilizada entre otras razones.

Al parecer, el enriquecimiento fue mayor al lavar el extremo norte de la pila, lo que podría indicar que ese sector aportó una fracción mayoritaria del cobre recuperado. Como explicación podría esgrimirse un carguo selectivo involuntario de mineral más refractario a la lixiviación en el extremo sur, o un acondicionamiento más efectivo del extremo norte y a reposos extremadamente largos del extremo sur con posterioridad a los acondicionamientos. Desafortunadamente y a diferencia de las experiencias a menor escala en que se operan sistemas en paralelo bajo diferentes condiciones, que permiten establecer comportamientos disímiles sin dar lugar a dudas, en esta experiencia la información generada no es concluyente. Es posible que el análisis final de rípos, que se efectuará con posterioridad, permita corroborar esta aseveración.

Prácticamente desde el inicio de los lavados, la concentración de ácido sulfúrico en las soluciones de lixiviación tendió a aumentar en forma continua de manera que, excepto de la adición en los acondicionamientos, no fue necesario agregarlo con posterioridad. Esta situación se atribuye al bajo consumo de mineral, al ácido generado por oxidación de la pirita y, especialmente, al ácido incorporado a la lixiviación como resultado de la transferencia de cobre a extracción por solventes.

A pesar de los descartes efectuados, la lixiviación operó con acidez superiores a las programadas; luego, éstos no fueron suficientes. Demás está decir que en cualquier operación a mayor escala se debe considerar el tratamiento de las soluciones de descarte para neutralizar el ácido purgado.

La concentración de fierro también evolucionó en forma continua hacia niveles superiores, y los des-



cartes realizados no bastaron para mantenerla en el rango sugerido de 2-3 g/l. Como en el caso del ácido, los requerimientos de purga de fierro en una faena de mayor envergadura tienen que ser debidamente considerados.

El potencial de oxidación Eh de la solución drenaje alcanzó valores cercanos a 850 mV al término del tercer mes de operación; en adelante, fluctuó entre 850 y 900 mV. Estos altos potenciales reflejan el desarrollo de condiciones oxidativas favorables para la lixiviación de las especies sulfuradas de cobre presentes en el mineral.

Las soluciones efluentes de la pila tuvieron un aspecto muy cristalino. El material fino que se podía observar en la canaleta de recolección de soluciones y en los estanques, y que en ciertas oportunidades provocó problemas de operación en extracción por solventes, no corresponde a mineral fino arrastrado por la solución, sino que al relave utilizado en la construcción de la cancha de lixiviación y al material del terreno introducido al sistema por las lluvias, la circulación de vehículos y al viento.

Se estima que, solucionando los problemas de operación surgidos en

la faena, el tratamiento de la solución rica por filtración convencional previo a su ingreso a extracción por solventes, debería reducir la formación de borra a niveles normales.

Tempranamente, se estableció en el lecho una apreciable actividad bacteriana, lo que se verifica por los recuentos bacterianos, la rápida evolución del fierro en solución a ión férrico (aumento del potencial de oxidación) y la mayor temperatura del lecho en relación a la temperatura ambiental.

Los resultados obtenidos indican que es posible recuperar un 42,4% del cobre total contenido, valor calculado sobre la base del cobre fino analizado en la cabeza, en 47 semanas de operación contadas desde el comienzo de los períodos de lavado/reposo y que incluyen una detención intermedia de 6 semanas para el segundo acondicionamiento del mineral.

Cabe señalar que esta recuperación estuvo limitada por la capacidad combinada del proceso implementado y no refleja estrictamente la capacidad del mineral de entregar cobre solubilizado. Se estima, sin lugar a dudas, que la recuperación en lixiviación podría haber mejorado a través de una implementación más efectiva del proceso; optativamente, la misma recuperación se podría haber logrado en un tiempo menor.

Bajo las condiciones de lixiviación utilizadas y para la extracción de cobre obtenida, el requerimiento de ácido sulfúrico en lixiviación alcanzó a 1,17 kg/kg Cu recuperado o 4,27 kg/ton de mineral tratado. El consumo total de agua, por otro lado, llegó a 0,31 m³/ton mineral tratado.

EXTRACCION POR SOLVENTES Y ELECTRODEPOSITACION

El comportamiento de estas plantas no se puede calificar en forma muy estricta puesto que ellas no operaron bajo condiciones óptimas, y por el contrario, debieron adaptarse continuamente a las características fluctuantes de la solución rica. Además, la falta de experiencia

del personal en terreno y los problemas que se verificaron con algunos equipos, incidieron sobre el rendimiento de la operación.

En términos generales, en extracción por solventes el consumo de extractante por concepto de pérdidas por arrastre, en la borra, por evaporación y derrames alcanzó a 0,011 l/kg cobre electrodepositado o 0,009 l/m³ de solución rica tratada. Los valores correspondientes al diluyente fueron 0,221 l/kg cobre o 0,189 l/m³ de solución. Estos consumos deben disminuir en una planta de mayor capacidad.

En electrodeposición se obtuvieron cátodos de pureza calificada high grade, para un rendimiento global de energía de 2,11 KWH/kg Cu depositado y una eficiencia de corriente global de 85,8%.

PARAMETROS DEL PROCESO

En la tabla 3 se presenta un resumen de los parámetros más importantes determinados durante la experiencia. De acuerdo a lo expresado en los puntos precedentes, varios de estos índices pueden ser mejorados fácilmente a través de cambios en la práctica operacional y en el diseño de algunos equipos.

RECOMENDACIONES

En consideración a los promisorios resultados obtenidos en la experiencia semi-industrial, como culminación del estudio metalúrgico llevado a cabo con el mineral supergénico exterior del Yacimiento Andacollo, se ha recomendado continuar la experiencia con una segunda pila a escala semi-industrial con granulometría más baja y posteriormente proceder con el sistema de ingeniería conceptual del proceso, consistente en la lixiviación bacteriana en pilas, seguida de extracción por solventes y electrodeposición, obteniendo cátodos de cobre como producto final. Ello, en base a la información generada en la experiencia y a los antecedentes bibliográficos disponibles.

TABLA 3
RESUMEN DE PARAMETROS DETERMINADOS EN
LA EXPERIENCIA SEMI-INDUSTRIAL

Parámetro		Valor
Características del mineral		
Ley de cobre total	(%)	0,86
Ley de cobre soluble	(%)	0,18
Granulometría	(% bajo 4")	96,4
	(% bajo 50#)	5,3
Tamaño promedio	(mm)	21,0
Lixiviación		
Extracción de cobre total	(%)	42,4
Consumo total de H ₂ SO ₄	(Kg/Kg Cu)	2,70
	(Kg/ton min)	9,84
Requerimiento externo de H ₂ SO ₄	(Kg/Kg Cu)	1,17
	(Kg/ton min)	4,27
Consumo de agua	(m ³ /ton min)	0,31
Extracción por Solventes		
Consumo de extractante	(l/kg Cu)	0,011
	(l/m ³ sol)	0,009
Consumo de diluyente	(l/kg Cu)	0,221
	(l/m ³ /sol)	0,189
Electrodeposición		
Rendimiento de energía	(MWH/kg Cu)	2,11
Eficiencia de corriente	(%)	85,8

DESARROLLO

El estudio de la ruta hidrometalúrgica de lixiviación bacteriana en pilas se desarrolló en tres fases:

a) FASE LABORATORIO

En enero de 1984 se dio comienzo en el CIMM a las actividades de la Fase Laboratorio del Proyecto "Factibilidad Técnica de Procesar el Mineral de Andacollo mediante Lixiviación en Pilas".

El programa experimental, de un año de duración, se realizó en columnas de 5 kg de capacidad y altura de lecho de 50 cms con minerales chancados a 1/4 de pulgada. En esta primera etapa se consideró las siguientes alternativas:

- lixiviación ácida
- lixiviación férrica
- curado ácido/lixiviación ácida
- curado ácido-férrico/lixiviación férrica
- lixiviación bacteriana.

El estudio se desarrolló con 5 muestras representativas de los distintos sectores que conforman el Yacimiento Andacollo.

- Muestra L-1. Mineral de la zona supergénica exterior de enriquecimiento secundario, con alteración cuarzosericita y sílice.

- Muestra L-2. Mineral de la zona supergénica interior de enriquecimiento secundario, con alteración cuarzosericita y sílice.

- Muestra L-3. Mineral primario con alteración cuarzosericita.

- Muestra L-4. Mineral primario con alteración cuarzosericita y feldespato potásico.

- Muestra L-5. Mineral primario con alteración biotítica.

Los resultados obtenidos se indican a continuación en términos globales.

El mineral L-1 fue receptivo a los diferentes procesos estudiados. La muestra recibida analizó 1,07% CuT y 0,10% CuSol. La especie de cobre sulfurado más abundante fue la calcosina (conteniendo el 56%

del cobre sulfurado presente) seguida de la calcopirita (42%); en ínfimas concentraciones se encontró covelina y bornita.

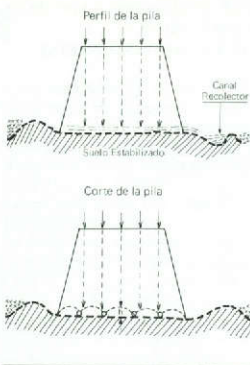
El mineral L-2 experimentó sólo leves extracciones de cobre para las alternativas metalúrgicas estudiadas. Las leyes analizadas fueron 0,49% CuT y 0,018% CuSol. En la muestra predominó la calcopirita (la que contenía el 94% del cobre sulfurado presente) sobre la calcosina (5%).

Los minerales restantes, L-3, L-4 y L-5, provenientes de la zona primaria del yacimiento, y por lo tanto, fundamentalmente calcopiríticos, fueron refractarios a la lixiviación bacteriana (única alternativa estudiada) y por ello se marginaron tempranamente del desarrollo experimental.

El procesamiento del mineral L-1 mediante un curado ácido-férrico y posterior lixiviación férrica permitió extraer rápidamente un 38,4% del cobre contenido en 25 días de operación, período típico para este tipo de lixiviación, con un consumo de ácido sulfúrico de 2,9 kg/kg Cu u 11,8 kg/ton mineral tratado. Sin embargo, este esquema de tratamiento fue muy dependiente de la granulometría utilizada, ya que en una experiencia realizada bajo condiciones similares pero con chancado bajo 1/2 pulgada, la recuperación de cobre en 25 días disminuyó a 32,4% con consumos de ácido de 3,1 kg/kg Cu o 10,2 kg/ton.

Luego, para aumentar la extracción del metal en esta alternativa, además del requerimiento de un chancado fino, se debía continuar operando bajo una condición oxidativa (no bacteriana) que permitiera mantener un alto nivel de ión férrico en las soluciones o, en su defecto, implementar a continuación una lixiviación bacteriana.

En la ruta bacteriana aplicada al mineral L-1, se recuperó el 80,4% del cobre total contenido, en 7 meses de operación, tiempo que incluyó 1 mes de reposo inicial para la proliferación bacteriana, con un consumo de ácido sulfúrico de 2,9 kg/kg Cu o 24,9 kg/ton mineral. El análisis microscópico del ripio de esta experiencia indicó la casi total



solubilización de la calcosina, especie de cobre mayoritaria de la cabeza, y la desaparición del 55% de la calcopirita inicial.

Estos resultados confirmaron la respuesta favorable del mineral L-1 a la lixiviación bacteriana ya que, aun cuando el chancado fue fino, se demostró la solubilización de una porción importante de la calcopirita contenida.

Finalmente, se estableció que no ser posible un chancado fino, la alternativa bacteriana era la más apropiada. Para un chancado a 2 pulgadas o más grueso, el curado ácido-férrico es muy poco efectivo y la posterior lixiviación, necesariamente prolongada por el tamaño de la partícula involucrada, se transforma en el hecho en una lixiviación bacteriana con un nivel de hierro total inferior a aquel normalmente utilizado en las lixiviaciones férricas.

b) FASE PILOTO

En vista de los promisorios resultados obtenidos a escala de laboratorio, el estudio metalúrgico continuó a escala piloto con los minerales de las zonas supergénicas exterior e interior, de enriquecimiento secundario. En esta oportunidad se aplicó sólo la lixiviación bacteriana. El programa experimental se desarrolló entre julio de 1984 y octubre de 1985 y tuvo como objetivo esta-

blecer, con mayor confiabilidad, la respuesta metalúrgica de estos minerales, además de generar la información necesaria para proyectar la respuesta piloto a una escala mayor.

Las experiencias se realizaron en columnas de capacidades entre 0,3 y 1,0 ton y con los minerales chancados a 2 tamaños bastante más gruesos que en la Fase Laboratorio, bajo 2 1/2 y bajo 4 pulgadas.

A esta escala, en 7 columnas, se incluyó el tratamiento de las soluciones fuertes por extracción por solventes y la recirculación de los refinos (soluciones descobrizadas) a lixiviación; en la octava columna se utilizó la cementación como método de descobrización. Esto permitió incorporar en el estudio el efecto de la acumulación de impurezas (especialmente el hierro) en las soluciones y mejorar el balance de ácido sulfúrico. Pero, fundamentalmente, se analizó el efecto de la granulometría y de la altura de lecho sobre la cinética de recuperación de cobre. Los resultados obtenidos se indican a continuación:

El mineral supergénico exterior L-1 analizó 0,88% CuT y 0,12% CuSol, con una distribución de sulfuros de cobre diferente a aquella de la muestra L-1 de la Fase Laboratorio. Así, la contribución de la calcosina y la calcopirita al contenido de cobre sulfurado alcanzó a 71 y 24% respectivamente.

La recuperación del metal con el mineral chancado bajo 4 pulgadas llegó a 49,6% luego de 10 meses de operación, tiempo que incluyó aproximadamente 1 mes de reposo inicial para la proliferación bacteriana. El consumo de ácido sulfúrico fue de 1,95 kg/kg Cu u 8,50 kg/ton mineral tratado. Se debe aclarar que estas cifras son valores netos porque llevan incorporado el crédito de ácido correspondiente a operar la lixiviación en combinación con extracción por solventes y electrodeposición.

El mineral supergénico interior, P-2 analizó 0,48% CuT y 0,022% CuSol. El cobre sulfurado está presente mayoritariamente como calcopirita (87%), en segundo lugar como calcosina (7%), y en porcentajes menores como covelina y bornita.

La recuperación de cobre con el mineral chancado bajo 2 1/2 pulgadas alcanzó a 19,7%, luego de 10 meses de operación, con un consumo de ácido sulfúrico de 5,64 kg/kg Cu o 5,35 kg/ton mineral, cifras que también llevan incorporado el crédito de 1,5 kg/H₂SO₄ producido por kg de cobre recuperado en extracción por solventes y electrodeposición.

Estas extracciones confirmaron la refractariedad del mineral P-2 en relación al mineral P-1, sobre todo al considerar la menor granulometría empleada en el primero. La tasa de recuperación del metal fue entre 2,0 y 2,6 veces superior para el material supergénico exterior.

Estas pruebas a escala piloto indicaron además que ambos minerales eran de bajo consumo de ácido, el que fue necesario adicionarlo sólo al comienzo de la operación. Posteriormente, la acidez de las soluciones tendió a aumentar producto del crédito de ácido sulfúrico y/o del ácido generado en el mineral por la actividad oxidativa bacteriana.

Los resultados obtenidos fueron finalmente modelados a fin de proyectar el comportamiento esperado de estos materiales. El escalamiento a nivel semi-industrial de la respuesta del mineral P-1, para condiciones de operación similares a aquellas del nivel piloto, entregó extracciones de cobre de 44%, 57% y 67% respectivamente, al cabo de 1, 2 y 3 años de operación. Se obtuvo además el perfil esperado de la concentración de cobre en las soluciones fuertes.

La proyección efectuada para el mineral P-2 fue menos auspiciosa, indicando extracciones de cobre de 19%, 26% y 32%, respectivamente, luego de 1, 2 y 3 años de operación.

En relación a la experiencia que operó con cementación como método de descobricción de las soluciones fuertes, cabe señalar que no se aconsejó la utilización de este método, fundamentalmente por los altos consumos de chatarra esperados, a causa de la reacción con el ión férrico presente en altas concentraciones en la solución fuerte. También, a continuación, una fracción signifi-

cativa de esta solución debía purgarse para mantener el nivel de fierro bajo control.

c) FASE SEMI-INDUSTRIAL

En vista de los resultados metalúrgicos expuestos anteriormente, ENAMI planteó internamente un estudio pre-inversional orientado a la definición de parámetros operacionales, definición y control del proceso, en una escala semi-industrial de lixiviación bacteriana del cobre contenido en el mineral supergénico exterior del Yacimiento Andacollo.

Esta actividad se concibió dentro del estudio de alternativas y proposición de acciones para explotar el yacimiento o para dimensionar su valor. Un segundo objetivo fue corroborar el escalamiento de los resultados a nivel semi-industrial, efectuado sobre la base del comportamiento promisorio de las pruebas piloto de la fase piloto. Un tercer objetivo consistió en comprobar que la lixiviación bacteriana en pilas a escala semi-industrial de un sector del yacimiento era factible y requería inversión y costos de operación menores a una flotación tradicional. La obtención de parámetros de operación permitiría el diseño del proyecto en caso de tener un estudio de factibilidad técnico económico positivo.

Cabe señalar que todas estas experiencias fueron realizadas con la asesoría del CIMM. A solicitud de ENAMI, el proyecto también fue apoyado, en lo concerniente a extracción por solventes y electrodeposición, por profesionales de TAM LTDA. y HENKEL CORPORATION.

En terrenos de Sociedad Minera Coipa Ltda., ENAMI instaló la planta de procesamiento que consistió en una cancha de lixiviación y unidades de extracción por solventes y electrodeposición para el tratamiento de las soluciones ricas de lixiviación. La cancha tuvo un área de 1.600 m², para la extracción por solventes, con una capacidad de tratamiento de solución acuosa cercana a 86 l/min; y electrodeposición con una capacidad máxima de diseño de 244 kg/día de cobre catódico.

co.

El mineral se cargó y acondicionó, en la práctica, en el mes de abril y comienzos de mayo de 1986. Entre el 23 de mayo de 1986 y el 19 de abril de 1987 se llevaron a cabo los períodos consecutivos de lavado/reposo de la pila, que para este efecto fue dividido en sectores. Se procesaron 9.300 tons secas de un compuesto constituido por material procedente de los piques de explotación.

El compuesto analizó 0,86% cobre total, 0,18% cobre soluble. Entre las especies sulfuradas portadoras de cobre predominó la calcosina; los contenidos de calcopirita y covelina fueron bastante menores y similares entre sí, y la bornita se encontró presente a nivel de trazas. El peso total de cobre fino en la muestra estaba distribuido, de acuerdo a las especies portadoras, como sigue: 59,3% en calcosina, 20,9% en óxidos de cobre, 10,5% en covelina y 9,3% en calcopirita.

El mineral chancado a 4 pulgadas y apilado hasta una altura de 6,5 m, fue sometido por parcialidades a un tiempo total de lavado de 273 días. La lixiviación permitió extraer un 42,4% del cobre fino contenido en la cabeza en 47 semanas de operación, extracción calculada en base a la ley analizada del mineral. Estos resultados confirmaron, dentro de un margen de error aceptable, los valores extrapolados en base a la información generada a escala piloto. Bajo estas condiciones fue necesario adicionar al lecho 1,17 kg ácido por kg de cobre recuperado o 4,27 kg por tonelada seca de mineral tratado.

Como consecuencia de procesar la solución rica por extracción por solventes y electrodeposición, se alcanzó una producción catódica de 33 tons. Los cátodos cosechados fueron comercializados como cátodos high grade.

Además de estos resultados promisorios, se establecieron parámetros de consumo que serán de beneficio para un estudio futuro de factibilidad económica.