

UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA, METALÚRGICA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA.



TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE: INGENIERO METALURGICO

TITULO:

“EXTRACCIÓN POR SOLVENTES Y LA ELECTRO-OBTENCIÓN DE
CÁTODOS DE COBRE”

AUTORES:

ESPADA COLLAZO KEVIN JUNIOR
CRUZ ULLOA RICARDO SANTIAGO

ASESOR:

M(o) Jaime Imán Mendoza
Cip: 103488 DU: 432


Ing. Jaime Imán Mendoza
C.I.P. 103488 DU 432

HUACHO - PERU

2021

DEDICATORIA

A Dios, por darme la vida, por las personas que puso en mi camino y darme las fuerzas suficiente para seguir adelante.

A mi familia, mis padres siempre creyeron en mí, no hay gratitud más grande que pueda cubrir su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

A mis amigos de la universidad quienes compartimos inolvidables momentos, cada uno un mundo distinto siempre estaban cuando los necesitaba hoy aunque la vida profesional nos lleva por distintos caminos espero conservar su amistad toda la vida, y gracias por soportarme, se que no es fácil.

INDICE

DEDICATORIA	02
PENSAMIENTOS	03
AGRADECIMIENTOS	04
RESUMEN	05
INTRODUCCIÓN	06

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1	DESCRIPCION DEL PROBLEMA	11
1.2	FORMULACION DEL PROBLEMA	12
	1.2.1 Problema Principal	12
	1.2.2 Problemas Secundarios	12
1.3	OBJETIVOS DE LA TESIS	13
	1.3.1 Objetivo General	13
	1.3.2 Objetivos Específicos	13
1.4	HIPOTESIS	13
	1.4.1 Hipótesis General	13
	1.4.2 Hipótesis Secundarios	13
1.5	VARIABLES DE LA INVESTIGACION	14
	1.5.1 Variable Independiente	14

1.5.2 Variable Dependiente	14
1.6 JUSTIFICACION E IMPORTANCIA	15
1.6.1 Justificación	15
1.6.2 Importancia	15
CAPITULO II: DESARROLLO HISTÓRICO DE LA TECNOLOGÍA	16
2.1 DESARROLLO HISTÓRICO DE LA TECNOLOGÍA DE LIXIVIACIÓN	16
2.2 PRÁCTICAS ACTUALES Y FUTURAS DE LIXIVIACIÓN EN PILAS EN EL PERÚ	16
2.3 CARACTERÍSTICAS DE LA LIXIVIACIÓN EN PILAS	16
2.4 LA EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE COBRE SEGÚN LOS PROCESOS DE LIXIVIACIÓN, EXTRACCIÓN POR SOLVENTES Y ELECTRO-OBTENCIÓN	16
CAPITULO III: DESARROLLO Y EVOLUCIÓN DE LOS PROCESOS HIDROMETALÚRGICOS A NIVEL MUNDIAL Y SU IMPACTO EN LA MINERÍA PERUANA	19
3.1 OBJETIVOS DE LA HIDROMETALURGIA	20
3.2 TECNOLOGIAS VIGENTES A 1970	20
3.3 HIDROMETALURGIA MUNDIAL	21
3.4 HIDROMETALURGIA (APLICACIÓN CÁTODOS DE COBRE)	23
3.4.1 Lixiviación en Pilas	23
3.4.2 Extracción por solventes	23
3.4.3 Electrodeposición	25
3.5 PANORAMA DEL COBRE EN EL PERU	27

3.6	FUTURO DE LA HIDROMETALURGIA	32
	CAPITULO IV: LIXIVIACIÓN EN PILAS (Heap Leaching) RESULTADOS	34
4.1	DESCRIPCIÓN	34
4.2	CONSTRUCCIÓN DE LAS PILAS	37
	4.2.1 Preparación de la base de las pilas	37
	4.2.2 Técnicas de apilamiento del mineral	38
	4.2.3 Riego de la pila	38
4.3	OPERACIÓN EN PILAS	40
4.4	CHANCADO DEL MINERAL	43
4.5	AGLOMERACIÓN	45
	4.5.1 Lixiviación TL (Thin Layer)	45
	4.5.2 Permeabilidad del lecho	45
	4.5.3 Proceso de aglomeración	45
4.6	VARIABLES DEL PROCESO	49
4.7	DISEÑO DE LAS PILAS	49
	4.7.1 Datos	50
	4.7.2 Capacidad de la planta de chancado	50
	4.7.3 Superficie de terreno	51
	CONCLUSIONES	52
	RECOMENDACIONES	53
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	54

RESUMEN

El presente trabajo monográfico está basado en el estudio y desarrollo de la minería Peruana en la obtención del cobre y el desarrollo tecnológico del proceso hidrometalúrgico de lixiviación en pilas por capas delgadas, incluido el proceso bacteriano. El documento comienza con una descripción de la historia de este desarrollo tecnológico, la hidrometalurgia y su aplicación industrial en el Perú por Xstrata Tintaya.

Si bien el concepto original de esta tecnología aplicada al tratamiento de los minerales de cobre se originó en EE.UU., y posteriormente se perfeccionó y modificó sustancialmente en Chile, logrando éxitos; este método modificado ha sido adoptado como parte de las tareas de explotación por la compañía minera Xstrata Tintaya.

En la primera década del siglo XXI se difundió ampliamente en la minería cuprífera Peruana la nueva tecnología como parte de una nueva ruta tecnológica que incluía además la extracción por solventes y la electro-obtención de cátodos de cobre. Este cambio tecnológico contribuyó significativamente al fortalecimiento de la competitividad internacional del sector cuprífero Peruano, hoy en día situándolo en el segundo lugar a nivel mundial. Otros efectos importantes fueron la introducción de tecnologías de producción limpia en la minería del cobre, innovaciones tecnológicas en maquinaria e instalaciones mineras en el ámbito local, la generación de nuevos servicios de ingeniería y consultoría entorno a la nueva tecnología y la creación de capacidades de excelencia en investigación y docencia en centros y universidades del país, especialmente en el campo de la hidrometalurgia.

Se señala que la creación, básicamente en la última década de los noventa, de un marco legal y normativo estable, provocó luego grandes inversiones privadas extranjeras y nacionales en proyectos mineros cupríferos del país.

Palabras Claves: Lixiviación, Metales Preciosos, Molienda, Circuito y Flotación

ABSTRACT

This monographic work is based on the study and development of Peruvian mining in obtaining copper and the technological development of the hydrometallurgical process of heap leaching by thin layers, including the bacterial process. The document begins with a description of the history of this technological development, hydrometallurgy and its industrial application in Peru by Xstrata Tintaya.

Although the original concept of this technology applied to the treatment of copper ores originated in the US, and was later perfected and substantially modified in Chile, achieving successes; This modified method has been adopted as part of the exploitation tasks by the Xstrata Tintaya mining company.

In the first decade of the 21st century, the new technology was widely disseminated in Peruvian copper mining as part of a new technological route that also included solvent extraction and the electrowinning of copper cathodes. This technological change contributed significantly to the strengthening of the international competitiveness of the Peruvian copper sector, today placing it in second place worldwide. Other important effects were the introduction of clean production technologies in copper mining, technological innovations in mining machinery and facilities at the local level, the generation of new engineering and consulting services around the new technology and the creation of excellent capacities. in research and teaching in centers and universities in the country, especially in the field of hydrometallurgy.

It is pointed out that the creation, basically in the last decade of the 1990s, of a stable legal and regulatory framework, later provoked large private foreign and national investments in copper mining projects in the country.

Keywords: Leaching, Precious Metals, Grinding, Circuit and Flotation

INTRODUCCIÓN

En los últimos diez años la participación de Perú en la producción mundial de cobre de mina aumentó fuertemente al punto de situarse como segundo productor mundial de cobre. Este avance del país como productor mundial del metal rojo estuvo acompañado de una profunda transformación de su minería cuprífera. Una de las manifestaciones importantes fue un marcado cambio en la estructura de la propiedad del sector como consecuencia de un masivo ingreso de capitales privados, tanto nacionales como privados, junto con la realización de grandes inversiones en exploración y desarrollo minero.

Otro aspecto sustantivo del cambio en la minería cuprífera del país fueron algunas innovaciones tecnológicas y, entre ellas, particularmente las que se generaron en el campo de la hidrometalurgia extractiva del cobre.

Este desarrollo consistía básicamente en el perfeccionamiento del concepto y en la aplicación industrial de dos tecnologías de lixiviación: una se denomina “lixiviación en pilas por capas delgadas” o, usando un término en inglés, “lixiviación en pilas TL” — figurando TL como abreviatura de *Thin Layer*; la otra, complementaria a la anterior, se conoce como “lixiviación bacteriana” o lixiviación BTL — *Bacterial Thin Layer* y ésta fundamentalmente era el resultado de un sostenido esfuerzo de investigación y desarrollo sobre los mecanismos de intervención de bacterias en los procesos de lixiviación de minerales sulfurados.

El presente trabajo monográfico resume los contenidos sobre estos desarrollos tecnológicos. En el trabajo se enfocaron en particular el proceso de innovación tecnológica en el proceso de lixiviación. Además se investigaron los efectos que tuvo este desarrollo tecnológico en la formación y transformación de la minería peruana.

En este contexto se ha considerado que forman parte del desarrollo de la minería cuprífera Peruana las siguientes actividades, organizaciones, estructuras productivas y recursos:

Estas actividades y recursos se extienden sobre una franja de territorio de más de 2,000 km de largo. Las justificaciones para incluir un conjunto geográficamente tan disperso de actividades dentro del concepto de un *cluster* fueron fundamentalmente dos: la primera fue la gravitación que tiene la minería cuprífera en la economía de estas regiones. La segunda fueron las relaciones profesionales que mantienen los ingenieros y otros profesionales que trabajan en las empresas mineras y organizaciones relacionadas con el sector del país. Estas relaciones se formaron durante el paso por la universidad, en el trabajo como investigadores en centros de investigación tecnológica o como ejecutivos en las empresas y a través de la participación en congresos y grupos de trabajo.

Los centros de investigación tecnológica y sus departamentos especializados así como laboratorios especializados de universidades.

Firmas de ingeniería y montaje así como consultores ligados a la minería.

Proveedores y fabricantes de equipos y materiales. Por otra parte no se ha identificado en el estudio otras instituciones que idealmente forman parte de un *cluster* como ser instituciones financieras especializadas.

El primero de los cinco capítulos del informe describe en forma general los distintos procesos de lixiviación y en particular la lixiviación en pilas tl, incluida la versión bacteriana. Este capítulo incluye también un recuento histórico de su desarrollo y aplicación a la minería de cobre. En el segundo capítulo se relata el **desarrollo y evolución de los procesos hidrometalúrgicos a nivel mundial y su impacto en la minería peruana**. En el tercero se detalla la lixiviación en Pilas específicamente.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 DESCRIPCION DEL PROBLEMA

La Galena o esfalerita (Sulfuro de Plomo) y freibergita, ha sido ratificada como el sulfuro más friable en los componentes de ésta mina por ser enteramente polimetálica, ya que se ha detectado que comúnmente es el Sulfuro que pasa con mayor facilidad a formar parte de las Mallas finas.

Por lo indicado, un gran porcentaje de pérdidas de Plomo ocurre en las mallas finas, lo cual se explica mediante el fenómeno de la segregación en la Clasificación, es decir, la enorme diferencia que existe entre la Densidad Compósito del mineral, que en nuestro caso es de 3.43 y la Densidad de la Galena que es 7.58; lo que constituye la razón principal para que se originara sobre molienda del plomo, lo cual afectaba la flotabilidad desplazándose en promedio 13.0 % al concentrado de Cobre (Cu); 1.80% en promedio al concentrado de Zinc (Zn); y, hasta 0.30% en promedio al Relave Final.

Bajo las consideraciones anteriores se propuso realizar Análisis Granulométricos en el Área de Molienda – Clasificación, iniciando en el Feed del Hidrociclón (Producto de descarga de los Molinos Primario de Barras 9 x 12 y los Secundarios de Bolas 8 x 10 y 10x 12); y se encontró que entre el 48 y 50 % del Plomo Fino (49.89%) se encontraba en la Malla –M 200 Passing; Los cuales se consideran como “Elementos metálicos liberados y listos para flotar” y ésta fue precisamente la causa para que éstos incrementaran su contenido metálico en el Under Flow del Hidrociclón U/F, retornando como carga circulante a los molinos

secundarios de bolas 8 x 10 y 7 x 8.

1.2 FORMULACION DEL PROBLEMA

1.2.1 Problema Principal.

¿En qué medida, puede la extracción por solventes y la electro-obtención de cátodos de cobre?

1.2.2 Problemas Secundarios.

- a. ¿De qué manera logrará la optimizar la extracción por solventes y la electro-obtención de cátodos de cobre.?
- b. ¿En qué porcentaje la extracción por solventes y la electro-obtención de cátodos de cobre?
- c. ¿Cuál es el porcentaje, de disminución de Humedad del Concentrado de Plomo, la extracción por solventes y la electro-obtención de cátodos de cobre?,
- d, ¿En qué medida, se puede reducir la contaminación del medio ambiente, mediante optimización del incrementarse de 2 500 TMSD a 3 000 TMSD de la Unidad Minera Raura.?

1.3. OBJETIVOS DE LA TESIS.

1.3.1 Objetivo General.

Optimizar y mejorar el proceso de mineral incrementando en el tratamiento de mineral la extracción por solventes y la electro-

obtención de cátodos de cobre

1.3.2 Objetivos Específicos.

- a. Disminuir las pérdidas de Plomo (Pb) por sobre molienda, mejorando la calidad del concentrado.
- b. Reducir los desplazamientos del Plomo (Pb) hacia el concentrado de Cobre (Cu).
- c. Disminuir la Humedad del Concentrado de Plomo (Pb), que originaban altas pérdidas por Mermas.
- d. Amenorar el Consumo de Bicromato de Sodio, por la generación de mayores áreas superficiales, el cual es un contaminante del Medio Ambiente.

1.4. HIPOTESIS DE LA TESIS

1.4.1 Hipótesis General.

De incrementarse el tratamiento de mineral la extracción por solventes y la electro-obtención de cátodos de cobre.

1.4.2 Hipótesis Secundaria.

Existe diferencia significativa en el nivel del porcentaje de contenido de cobre en el concentrado obtenido entre el Proceso Normal y el Proceso Propuesto, mediante la confirmación cuantitativa y de certeza utilizando los análisis químicos - metalúrgicos.

1.5 VARIABLES DE LA INVESTIGACION

1.5.1 Variable Independiente.

X = "Uso de una Celda de Flotación Flash"

Indicadores:

X1 = Celda Flotación Flash

X2 = Unidad de Producción

1.5.2 Variable Dependiente.

Y = "Optimización de la Unidad de Producción"

Indicadores:

Y1 = Optimización

Y2 = Unidad Minera Raura.

1.6. JUSTIFICACION E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACION.

1.6.1 Justificación.

Los motivos y causas que dieron origen a realizar el presente Estudio de Investigación, es que la Compañía Minera Raura S.A, tiene una Unidad de Producción Catava (Planta Concentradora), donde se efectúa un procesamiento de Minerales Polimetálicos de Plomo (Pb), Cobre (Cu), Zinc (Zn), y Plata (Ag) por Flotación, razón por el cual se consideró Estudiar e Investigar haciendo uso de una Flotación Rápida de valores de Plomo en el propio circuito de Molienda – Clasificación, de manera que los Circuitos de Flotación posteriores queden habilitados para generar un Bulk de Plomo – Cobre, con menor contenido de Plomo y enriquecido en Cobre, obviamente

CAPITULO II

DESARROLLO HISTÓRICO DE LA TECNOLOGÍA DE LIXIVIACIÓN

2.1 DESARROLLO HISTÓRICO DE LA TECNOLOGÍA DE LIXIVIACIÓN

La tecnología actual de lixiviación de metales preciosos se ha desarrollado ampliamente desde mediados de la década del 70, aunque los principios de lixiviación así como los de extracción de oro mediante cianuración tienen una larga historia. Sin embargo, es en los últimos 20 años que la lixiviación se ha desarrollado hasta llegar a ser un método eficiente para tratar el oro oxidado y los minerales de plata. Ha demostrado ser una forma efectiva para extraer metales preciosos de depósitos pequeños y poco profundos.

Al medio ambiente son más manejables. Una desventaja de la tecnología de lixiviación en pilas actualmente existente es la reducción potencial del porcentaje de extracción de metales que se obtiene del mineral en comparación con lo que sucedería con la lixiviación convencional (Potter, 1981; Hiskey, 1985; y Thorstad, 1987).

El principio real de la lixiviación en pilas tiene una larga historia, como se infirió anteriormente. Por ejemplo: las minas de Hungría reciclaban las soluciones que llevaban cobre a pilas de mineral de baja ley a mediados del siglo XVI (Hiskey, 1985) y los mineros españoles percolaban soluciones ácidas en grandes pilas de mineral oxidado de cobre en Río Tinto en 1752 aproximadamente. Alrededor del año 1900, las operaciones de lixiviación fueron empleando técnicas como los ciclos de lixiviación/reposo para maximizar la recuperación de cobre (Taylor and Whelan, 1942; Thorstad, 1987). La lixiviación de pilas y botaderos de cobre se practica actualmente a nivel mundial en el caso de minerales de baja ley. Adicionalmente, los productores de uranio han

venido practicando la lixiviación en pilas mediante soluciones ácidas y alcalinas desde fines de la década del 50.

La extracción de oro mediante cianuración llegó a ser un proceso comercial a través del trabajo pionero de dos hermanos escoceses, los doctores Robert y William Forrest, conjuntamente con John S. MacArthur, químico autodidacta. Estos hombres, experimentando por años en un laboratorio casero en Escocia, buscaban encontrar un proceso mejorado para recuperar el oro de los minerales complejos (Von Michaelis, 1985). Tuvieron éxito en su búsqueda y en 1887 se les emitió la Patente Británica 14, 174. Posteriormente se emitieron las Patentes Estadounidenses 403,202 y 418,137 para estos tres hombres en 1889 (Hiskey, 1985). El proceso que abarcaban estas patentes incluía la agitación de pulpa ante la presencia de aire, seguido de precipitación con polvo de zinc de la solución filtrada de oro y cianuro (Von Michaelis, 1985).

La lixiviación de minerales de metales preciosos empleando el proceso de cianuración fue inicialmente sugerida por la Dirección de Minas de EE.UU. en 1967 (Thorstad, 1987). La primera aplicación de lixiviación comercial se efectuó a fines de los años 60 por parte de Carlin Gold Mining Company al norte de Nevada (Hiskey, 1985).

Cortez Gold Mines inició la primera operación a gran escala a principios de los años 70 lixiviando dos millones de toneladas de oro de ley marginal (Thorstad, 1987).

A mediados de la década del 70, se perfeccionó la tecnología de lixiviación en pilas de oro con el fin de tratar depósitos arcillosos de baja ley. Las mejoras, tales como la lixiviación en pilas usando aglomeración, fueron puestas en marcha por el aumento de la exploración de depósitos de baja ley ya que el precio del oro aumentaba drásticamente. Muchos de los depósitos descubiertos no pudieron ser procesados mediante las técnicas convencionales de lixiviación porque las arcillas o finos

generados durante la trituración impedían la percolación uniforme de la solución a través de las pilas de mineral (Heinen y otros, 1979; McClelland y Eisele, 1981; y McClelland y otros, 1983). La tecnología de lixiviación en pilas usando aglomeración es aplicable a la mayoría de minerales de oro y relaves de flotación.

Los resultados de las mejoras tecnológicas que se han producido a través de los años 70 y en los años 80 pueden apreciarse en los drásticos aumentos del nivel de producción. Para 1993, la producción de oro de la lixiviación en pilas había aumentado a más del 35 por ciento del total de la producción de oro en EE.UU. desde un estimado de 6% en 1979.

La lixiviación en pilas es una técnica muy antigua para extraer cobre. La primera operación registrada de cobre a gran escala mediante lixiviación fue en Río Tinto, España aproximadamente en 1752 (Taylor y Whelan, 1942).

Los antiguos en realidad pudieron haber utilizado alguna variación de lo que conocemos hoy para recuperar el cobre de las sales solubles. La lixiviación de botaderos de cobre en la parte occidental de EE.UU. se inició poco después del desarrollo de minas a tajo abierto a gran escala por Jackling en 1904 en Bingham Canyon. Todos los componentes necesarios estaban en posición de establecer un ciclo de lixiviación de cobre. Sin embargo, los esfuerzos serios para explotar la lixiviación de botaderos probablemente empezó en las décadas del 30 y 40.

Durante los últimos años, ha habido una tremenda expansión de la lixiviación de botaderos. En el Cuadro A.1 (a-c) (Hiskey, 1993) se presentan algunas notas históricas referentes a las minas de solución de cobre.

Algunas innovaciones técnicas en los últimos años han aumentado la importancia de la minería de soluciones como un proceso para la recuperación de cobre. Entre éstas se incluye:

Avances en extracción por solventes/electrodeposición (SX/EW);

Innovaciones en los procesos de curado con ácido y ácido férrico para los minerales oxidados y mixtos; y,

Mejoras en la construcción de pilas y botaderos.

En 1992, Estados Unidos produjo un total de 1,76 millones de toneladas métricas de cobre. Durante 1992 aproximadamente el 30% de la producción estadounidense provenía de electrodeposición (esto es, 522 755 TM). Se calcula que para fines del presente siglo, aproximadamente el 40% de la producción primaria de cobre en EE.UU. provendrá de las operaciones de lixiviación.

La extracción por solventes ha cumplido una función importante en los intereses actuales de la hidrometalurgia de cobre. En general, las soluciones impuras relativamente diluidas y que contienen cobre se producen en la etapa de lixiviación. La extracción por solventes facilita la producción de un electrolito rico y puro que puede dirigirse hacia la casa de tanques donde el cobre puede ser electrodepositado como cátodos de alta pureza. La extracción por solventes ha hecho posible la producción de cátodos electrodepositados de alta calidad que pueden competir directamente con cátodos electro-refinados. En el pasado, la precipitación con chatarra de hierro era el método de recuperación establecido, esta alternativa producía cobre impuro que requería fundición y una posterior refinación para obtener cobre. La extracción de solventes proporcionó la interfase entre la lixiviación y la recuperación final de metal (Hiskey, 1993).

2.2 PRÁCTICAS ACTUALES Y FUTURAS DE LIXIVIACIÓN EN PILAS EN EL PERÚ

La lixiviación en pilas se emplea en todo el Perú para la producción de metales preciosos y cobre. La lixiviación de metales preciosos se da principalmente en la parte central norteña del Perú. Mientras que la lixiviación de cobre se da principalmente en la parte sureña del país.

Las instalaciones de lixiviación se encuentran ubicadas en diversos entornos climáticos y físicos. Se emplean técnicas de construcción de capas impermeabilizadas tanto expansivas como reutilizables.

Los avances tecnológicos peruanos en lixiviación en pilas se han centrado en la extracción metalúrgica. Las pruebas en pilas que evalúan tamaños de grano, ciclos de lixiviación y la concentración de lixiviantes, son comunes. La mayoría de minas de cobre en Perú emplean métodos de extracción tradicionales de molienda y de concentración para minerales de alta ley. Las técnicas de lixiviación en pilas brindan la oportunidad de extraer productos de los minerales de ley anteriormente marginales.

La lixiviación de metales preciosos en la región norteña central del Perú ha generado una fiebre de oro en nuestros días, donde se encuentran depósitos de oro diseminados a gran escala cerca de la superficie terrestre con poco o ningún «stripping». A pesar de que las técnicas de lixiviación en pilas actualmente se utilizan en varios lugares del Perú, éstas se ampliarán considerablemente en la siguiente década.



Fig. Nº 1: Proceso de Hidrometalurgia

2.3 CARACTERÍSTICAS DE LA LIXIVIACIÓN EN PILAS

Una de las principales características distintivas de la lixiviación en pilas según el concepto TL es el pretratamiento de los minerales. Esta operación consiste generalmente en una trituración del mineral, a un alto grado de fineza –al punto que resultaba imposible su procesamiento posterior con las tecnologías existentes, la aglomeración de los finos en torno a las partículas mayores con agua y ácido sulfúrico concentrado, operación esta última que se conoce bajo el nombre de “curado”. Mediante este proceso se ha logrado elevar la resistencia del material mientras se mantiene una buena permeabilidad del lecho del mineral con el fin de alcanzar alturas de pilas adecuadas, mejorar los índices de recuperación de cobre y acortar los ciclos de lixiviación. En las operaciones modernas la altura de las pilas suele variar entre 2 y 8 metros en contraste con la lixiviación en botaderos donde las alturas son generalmente mucho más altas. En consecuencia, varían también los ciclos de lixiviación y las posibles extracciones de cobre final. En la lixiviación en pilas TL ocurren ciclos de menos de 90 días para minerales oxidados y de 4 a 18 meses para los sulfurados, mientras en la lixiviación en botaderos los ciclos pueden durar entre 2 y 25 años con recuperaciones muy inferiores.

Otra característica de la lixiviación en pilas TL radica en el tipo de minerales que pueden ser procesados. Normalmente se procesan por esta vía óxidos y sulfuros secundarios para minerales de leyes bajas, intermedias o altas en el rango de 0,3 a 1,5%. En la lixiviación en botaderos, en cambio, se tratan minerales de baja ley del orden del 0,1 al 0,5%, incluidos sulfuros primarios. Por otra parte, la lixiviación por agitación se aplica únicamente a minerales finos tales como concentrados, calcinas y colas, para la recuperación de óxidos. La topografía y la preparación del piso es otra característica que distingue a la lixiviación en pilas. El piso, que debe ser esencialmente plano, es impermeabilizado con membranas plásticas para facilitar la recolección

de los lixiviados, evitar pérdidas y prevenir la contaminación de las napas subterráneas de agua. En la lixiviación en botaderos, la situación es distinta. Frecuentemente se explotan botaderos antiguos que se establecieron, sin que se hubiese considerado la posibilidad de una operación de lixiviación, en cañones o laderas que permitieran una disposición fácil de los residuos. Por lo tanto los pisos suelen ser inclinados y no llevar ninguna preparación excepto la necesaria en los perímetros para recoger los líquidos percolados. Relacionado con las características topográficas y mineralógicas está el tipo de tecnología utilizado en las operaciones de transporte y disposición de los minerales. En el caso de la lixiviación en pilas suelen emplearse actualmente correas transportadoras unidas a apiladoras de diseño especial para la formación de las pilas y cargadores frontales o excavadoras para su retiro y traslado. En el caso de la lixiviación en botaderos, los minerales son dispuestos con camiones volquetas y una vez terminado el ciclo de lixiviación los materiales quedan en el mismo lugar.

Como se ha mencionado anteriormente, los procesos hidrometalúrgicos asociados con la electro-obtención para el procesamiento de los sulfuros presentan la ventaja de evitar los problemas ambientales de emisiones de óxidos sulfurados y de polvo que produce la ruta clásica de fundición pirometalúrgica. Naturalmente los procesos hidrometalúrgicos no están exentos de riesgos ambientales aunque estos son más fáciles de prevenir o corregir que los provocados por los gases de las fundiciones. También es necesario prevenir descargas accidentales de licores desde la planta o el sitio de la mina ya sea al subsuelo o al sistema de drenaje de la superficie. Además existen riesgos ambientales asociados al transporte del ácido sulfúrico que consume el proceso. Por otro lado se puede señalar que los procesos de lixiviación presentan un mercado para el ácido sulfúrico que generan las instalaciones de las fundiciones de cobre como parte de las medidas de descontaminación.

Una característica que comparte la lixiviación en pilas TL junto con la

lixiviación en botaderos y la lixiviación *in situ* es la acción aceleradora de bacterias en el proceso de tratamiento de minerales sulfurados, tales como calcocita, covelita, bornita y calcopirita, acompañada de pirita. La presencia de bacterias con acción oxidante de sulfuros tales como *Thiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferrooxidans* ha sido reconocida desde hace bastante tiempo y el potencial de la lixiviación bacteriana es aprovechado actualmente en la mayoría de las modernas operaciones. La viabilidad técnico-económica del proceso de lixiviación bacteriana fue demostrada por primera vez en la mina Lo Aguirre mediante un extenso programa experimental. Las condiciones operacionales del proceso dependen en general de las características particulares de los minerales. Como resultado de estos trabajos experimentales se logró diseñar una metodología de optimización del proceso considerando variables tales como flujos de soluciones, concentración de ácido y pH, nivel de impurezas en las soluciones de lixiviación y altura de las pilas. Desde el punto de vista del mineral el grado de trituración es fundamental para el acceso de las bacterias hasta las partículas mineralizadas. Además es importante asegurar una permeabilidad adecuada de los minerales a las fases gaseosas y líquidas. Esta combinación de alta trituración y buena permeabilidad en realidad es uno de los aspectos claves del proceso de lixiviación en pilas TL.

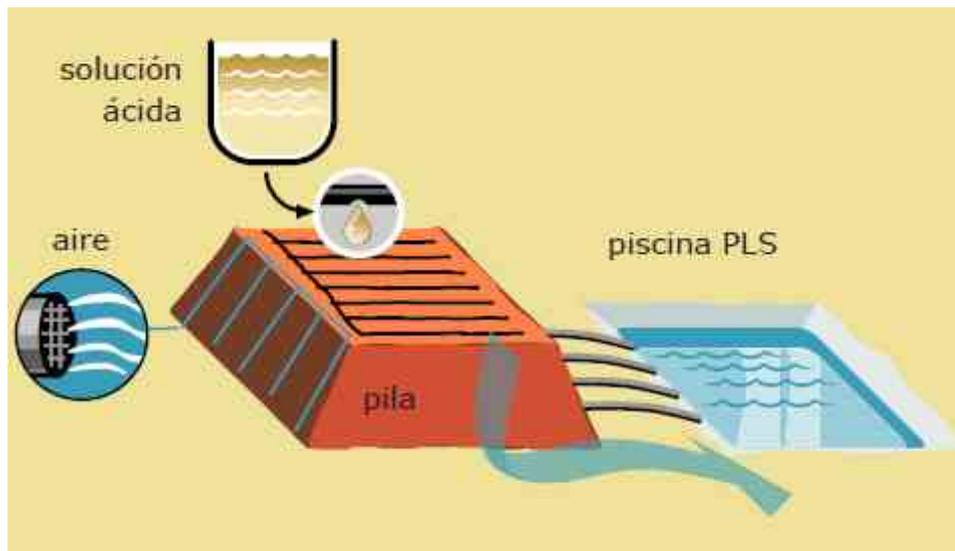


Fig. Nº 2: Proceso de Lixiviación en Pilas



Fig. Nº 3: Pilas



Fig. Nº 4: Lagunas de solución

2.4 LA EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE COBRE SEGÚN LOS PROCESOS DE LIXIVIACIÓN, EXTRACCIÓN POR SOLVENTES Y ELECTRO-OBTENCIÓN

En el período 1990-1998 la producción mundial de cátodos que se originaba en procesos de lixiviación de todo tipo, extracción por solventes y electro-obtención aumentó de 708.000 toneladas a 2.013.000 toneladas. La participación que tuvo la producción de cobre por esta vía en la producción total del mundo occidental de cobre proveniente de mineral pasó en este período del 9,6% al 19,8% (véase cuadro A-4 del anexo). De esta manera, el 46,7% del aumento de la producción mundial de cobre entre ambos años provino de estos procesos hidrometalúrgicos. En el cuadro 1 se presenta una estimación de la producción de cátodos según distintos procesos de lixiviación entre 1990 y 1998. Como puede observarse, la producción de cátodos por la vía lixiviación en pilas, extracción por solventes y electro-obtención se incrementa desde una cantidad muy pequeña en 1990 hasta 1,100,000 toneladas en 1998, alcanzando en este último año el 55% del conjunto de los procesos hidrometalúrgicos considerados. En cambio, la producción hidrometalúrgica de cobre vía otros procesos de lixiviación aumentó sólo en un 37% en términos aproximados. Por lo tanto, en el año 1998, la producción de cobre electro-obtenido vía de lixiviación

en pilas y extracción por solventes habría alcanzado aproximadamente un 11% de la producción mundial de cobre proveniente de mineral.

Cuadro No 1
PRODUCCIÓN MUNDIAL DE COBRE
POR DISTINTOS PROCESOS DE LIXIVIACIÓN, 1990 Y 1998

(en miles de toneladas / año)

	1990	1998
Lixiviación en pilas	43	1 100
Otros procesos de lixiviación	665	900
TOTAL	712	2 000

Fuente: estimaciones en base de datos proporcionados por la Dirección de Estudios de la Corporación Chilena del Cobre.



Fig. 5: Cátodos de cobre

CAPITULO III

DESARROLLO Y EVOLUCIÓN DE LOS PROCESOS HIDROMETALÚRGICOS A NIVEL MUNDIAL Y SU IMPACTO EN LA MINERÍA PERUANA

La hidrometalurgia como disciplina independiente, data del tiempo de los alquimistas (Habashi, 1993).

600 – 900 DC De Re Metallica discute conocimientos de reacciones de reemplazo como la cementación del cobre por el hierro y el uso de agua regia.

1880 - Se descubre que el oro y la plata pueden ser lixiviados en soluciones cianuradas (Mooiman et al, 2005). La comercialización de estos procesos revolucionaron la industria del oro, y establece el pilar fundamental de la metalurgia extractiva del oro más de un siglo después (Fleming, 1992).

La lixiviación y la electrometalurgia fundaron tempranamente la hidrometalurgia. La disciplina moderna emergió con el desarrollo de la extracción por solvente (SX) y el intercambio iónico (IX) como procesos de separación de uranio en el proyecto Manhattan en 1942.

Más recientemente, los procesos de extracción biológica y el uso de altas temperaturas y presiones han sido agregados al arsenal de operaciones unitarias hidrometalúrgicas, como se ha mostrado en los recientes procesos de extracción de cobre (McElroy y Young, 1999) y níquel (Anthony y Flett, 1997) desde materiales que, anteriormente, sólo podían ser tratados por la vía pirometalúrgica (Mooiman et al, 2005).

En nuestro país, los antecedentes hidrometalúrgicos datan de:

1637 - Primeras experiencias en la hidrometalurgia del tratamiento de aguas de mina en 1637 con Alonso Barba para extraer cobre.

1848 - el químico Pedro Hugón instaló en Arqueta (Cajamarca) una planta de lixiviación (Proceso Augustín).

1890 – Hualgayoc, se iniciaron los primeros ensayos de lixiviación, para que un año más tarde instalarse oficinas de lixiviación en el mismo Hualgayoc y en Bambamarca.

1892 - Se instalan plantas de lixiviación con hiposulfito de sodio en San José (Castrovirreyña), Gazuna (Cajatambo) y en Pilancos (Hualgayoc).

1895 – La compañía Minera Pataz (El Gigante) empezó con el tratamiento de minerales de oro por el método de cianuración. Ya en 1897 funcionaban en nuestro país trece (13) plantas de lixiviación.

1945 - en nuestro país se comience a producir soluciones de sulfato de cinc a partir de minerales sulfurados.

1975 - se empieza aplicar el sistema de intercambio iónico en Cerro Verde.

1975 -1980 Emergen plantas hidrometalúrgicas de envergadura tales como: Cajamarquilla, Cerro Verde, planta de agua de mina de Cerro de Pasco, Yanacocha.

2.1 OBJETIVOS DE LA HIDROMETALURGIA

Incrementar la productividad de las distintas partes del proceso.

Reducir los costos de operación,

Reducir los impactos ambientales y sociales

En caso de la necesidad de una nueva capacidad de planta, desarrollar procesos nuevos, simples, limpios y más económicos.

2.2 TECNOLOGIAS VIGENTES A 1970

La alta demanda del cobre fue un estímulo para la búsqueda de tecnologías que permitieran aprovechar los yacimientos porfíricos con baja ley en los cuales el metal está esparcido en grandes áreas y mezclado con gran cantidad de componentes y roca estéril, como los que se explotan en la actualidad.

El cobre aparece vinculado en su mayor parte a minerales sulfurados, aunque también se lo encuentra asociado a minerales oxidados.

material desde las minas a tajo abierto o subterráneas, lo que requiere la fragmentación y el transporte del material identificado por estudios geológicos realizados en la etapa previa de exploración.

El mineral extraído pasa en primer lugar por un proceso de molienda. En el caso de los minerales oxidados el proceso productivo implica someter el material a una solución de lixiviación, que producirá soluciones de sulfato de cobre, las cuales son sometidas a un proceso de extracción con solventes y posteriormente a un sistema de electro obtención cuyo resultado final son los cátodos de cobre con 99,99 por ciento de pureza.

Los minerales sulfurados pasan primero por el chancado y la molienda, luego por mecanismos de clasificación hasta obtener el concentrado de cobre, que tiene 30 por ciento del metal. Su purificación posterior se realiza en hornos que permiten obtener cobre blister o ánodos con 98 por ciento de pureza. Finalmente la electrorefinación permite transformar los ánodos en cátodos con 99,99 por ciento de pureza. A continuación se muestra una de las tecnologías aún vigentes para el caso del cobre que es la FUNDICIÓN.

2.3 HIDROMETALURGIA MUNDIAL

Panorama	Oportunidad
<ul style="list-style-type: none">• Aprovechamiento de menas de bajo grado o contenido metálico• Legislación más severa en el control de emisiones al medio ambiente• Elevados costos de capital inicial de procesos convencionales• Alta demanda de los mercados emergentes• Reducción de los inventarios de materiales primarios• Reducción del recurso hídrico• Madurez del desarrollo tecnológico de los procesos de flotación, concentración y pirometalurgia.	<ul style="list-style-type: none">• Mayores reservas de material de baja ley por incremento del precio de los metales y disminución de la ley de corte.• Producción limpia con menores emisiones al medio ambiente• Simplicidad de los procesos que requieran una menor inversión de capital comparada con los procesos convencionales• Reuso de soluciones para transferir el metal• La hidrometalurgia, terreno fértil para las innovaciones, todavía tiene espacios para hacer cambios relevantes y romper paradigmas.

Fig. Nº 6: Panorama y oportunidades

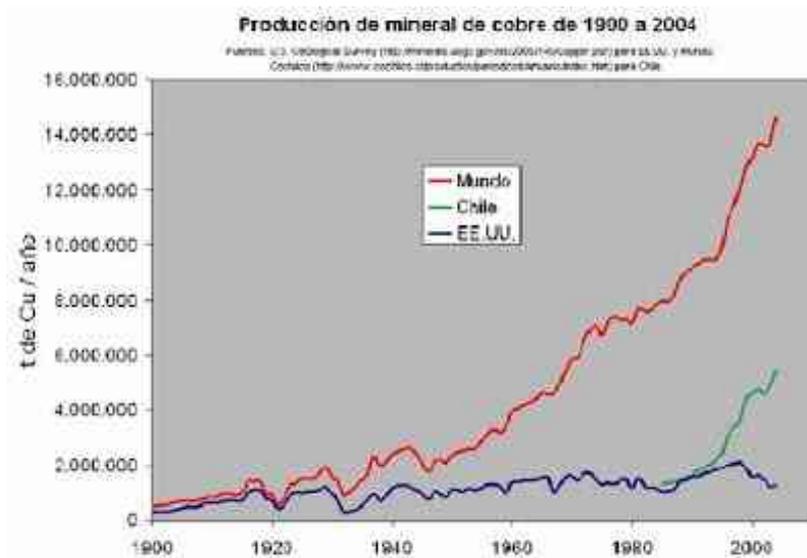


Fig. N° 7: Producción mundial de cobre

Estos dos tipos de mineral requieren de procesos productivos diferentes, pero en ambos casos el punto de partida es el mismo: la extracción del

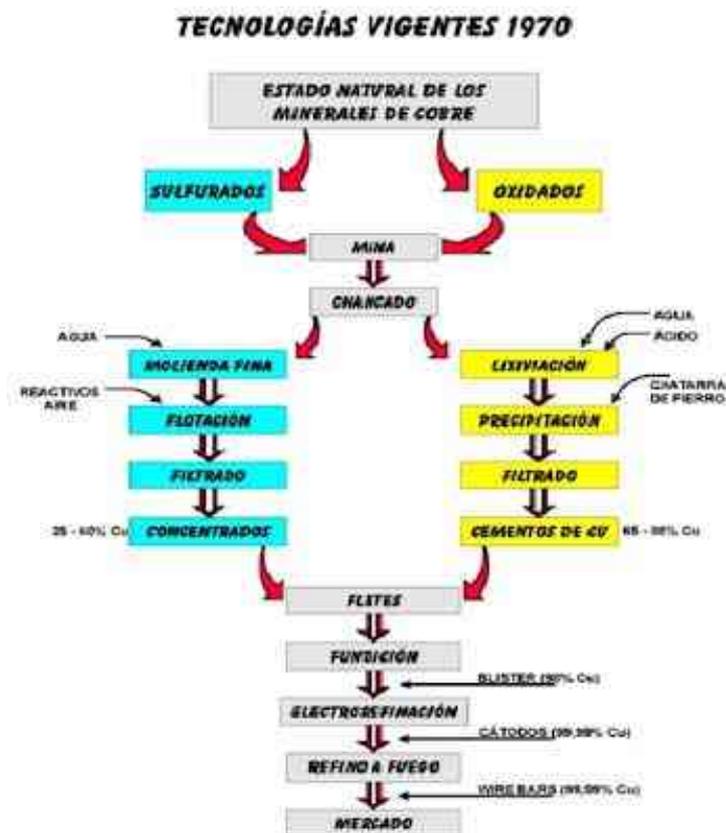


Fig. N° 8: Tecnologías vigentes

2.4 HIDROMETALURGIA (APLICACIÓN CÁTODOS DE COBRE)

Las etapas de la Hidrometalurgia son: En este caso para el cobre, se tiene:

LIXIVIACIÓN: Lixiviación en pilas

PURIFICACIÓN/CONCENTRACIÓN: Extracción por Solventes

PRECIPITACIÓN: Electrodeposición

2.4.1 Lixiviación en Pilas

El mineral procedente de la explotación, a cielo abierto o subterránea, debe ser ligeramente preparado en una planta de chancado y/o aglomeración, para conseguir una granulometría controlada que permita un buen coeficiente de permeabilidad.

Una vez preparado el mineral, se coloca en montones de sección trapezoidal y altura calculada para proceder a su riego con la solución lixivante. Tras percolar a través de toda la pila, se recolectan los líquidos enriquecidos (solución rica) que se llevan a la planta de proceso de recuperación de la sustancia mineral (Cobre). Una vez concluido el período de lixiviación (2 a 3 meses) los ripios son llevados a los botaderos.

2.4.2 Extracción por solventes

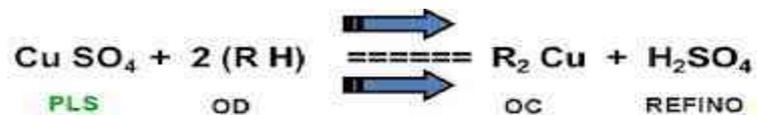
Se entiende al proceso de separación o extracción de materiales diluidos (iones) contenidos en medios líquidos (solución acuosa), mediante el empleo de medios de extracción también líquidos (solución orgánica).

Comprende las siguientes etapas: Extracción y Reextracción (Descarga).

a) Etapa de extracción

Es la recuperación selectiva del Cu^{2+} por medio de la solución orgánica desde las soluciones acuosas ácidas producto de la etapa de lixiviación (PLS).

La solución rica proveniente de las pilas es mezclada con la fase orgánica (orgánico descargado), para extraer SELECTIVAMENTE el cobre obteniendo una solución pobre en cobre, llamada refino, que es reciclada a la etapa de lixiviación en pilas. Se obtiene en esta etapa una fase orgánica cargada, que es avanzada a la siguiente etapa. Se produce la siguiente reacción:



Donde:

PLS = Pregnant Leach Solution (Sulfato de Cobre+Ácido);

OD = Orgánico descargado;

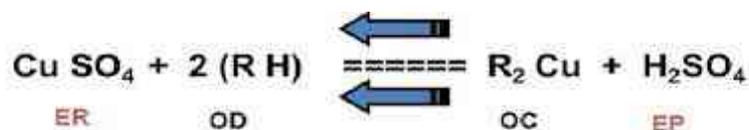
OC = Orgánico cargado.

b) Etapa de reextracción (descarga)

El orgánico cargado se pone en contacto con el electrolito pobre proveniente del proceso de electrodeposición, de alta acidez (150-200 g/l de H_2SO_4). El cobre pasa de la fase orgánica a la fase acuosa, obteniéndose una fase orgánica descargada que se recicla a la etapa de extracción y un electrolito rico que avanza hacia la electrodeposición.

Es la etapa donde el Cobre conseguido por la fase orgánica en la etapa de extracción es transferido a una solución acuosa fuertemente ácida (180 g/L de ácido) llamada "electrolito descargado o electrolito pobre". Esta solución aumenta su concentración de Cobre de 30 a 45 gramos por

litro y es utilizada luego como "electrolito rico" en el proceso de electrodeposición. Se produce la siguiente reacción: (Observar el sentido de la flecha)



Donde:

ER = Electrolito Rico; OD = Orgánico descargado;

OC = Orgánico cargado; EP = Electrolito Pobre

2.4.3 Electrodeposición

Bajo la denominación “electrodeposición de cobre” se entiende a la obtención de cátodos de cobre de alta pureza, los cuales se producen sumergiendo dos electrodos: cátodo (-) y ánodo (+), en una solución electrolítica de sulfato de cobre.

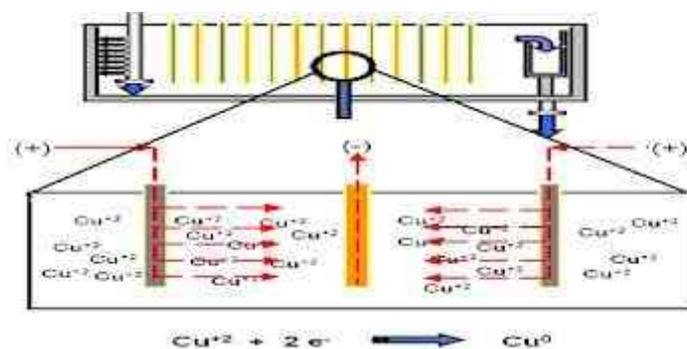


Fig. N° 9: Celda electrolítica

A continuación se muestra un diagrama de flujo resumiendo las etapas de la Hidrometalurgia aplicado a la obtención final de cátodos de cobre:

EXTRACCIÓN POR SOLVENTES

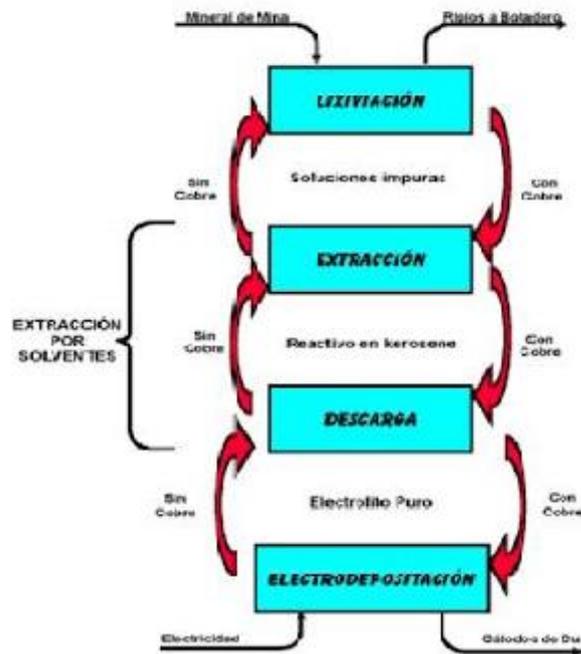


Fig. Nº 10: extracción por solventes

PRODUCCIÓN DE COBRE DE MINA VIA CONCENTRADOS Y LIXIVIACIÓN EN CHILE Y EL MUNDO OCCIDENTAL, 1990, 1995 Y 1998					
	Producción en el año			Aumento en el periodo	
	1990	1995	91-95	96-98	91-98
(en miles de toneladas)					
MUNDO OCCIDENTAL					
Cobre de concentrados	6 566	7 170	8 157	512	975
Cátodos de LX - SX - EW	708	1 050	2 012	382	1 304
TOTAL	7 274	8 220	10 169	894	2 279
CHILE					
Cobre de concentrados	1 462	2 111	2 575	645	1 117
Cátodos de Lixiviación en pilas TL - SX - EW	14	203	646	109	743
Cátodos otros procesos LX - SX - EW	109	170	162	61	63
Total cátodos de LX - SX - EW	123	373	1 108	250	806
TOTAL	1 585	2 484	3 683	895	2 102
(en porcentajes)					
PARTICIPACIÓN DE LA PRODUCCIÓN MUNDIAL DE CÁTODOS LX-SX-EW EN LA PRODUCCIÓN MUNDIAL TOTAL DE COBRE DE MINA	9,5	10,2	19,9	42,7	46,7
PARTICIPACIÓN DE CHILE EN LA PRODUCCIÓN DEL MUNDO OCCIDENTAL					
Producción total de cobre de Chile/Producción mundial total de cobre	21,5	30,0	36,0	100,6	63,0
Producción total LX-SX-EW de Chile/Producción mundial total de cobre	1,7	4,5	10,9	28,0	35,2
Producción total Lixiv TL-SX-EW de Chile/Producción mundial total de cobre	0,2	2,5	9,3	21,1	33,9
Producción total Lixiv TL-SX-EW de Chile/Producción mundial SX-LX-EW	2,0	16,6	47,0	49,6	71,6

Fuente: elaboración en base de datos proporcionados por la Dirección de Estadística, Comisión Chilena del Cobre.

En el siguiente cuadro se puede observar que la producción de cobre refinado obtenido por hidrometalurgia, se ha estado incrementando gradualmente, a este año 2010 debe representar casi el 22% de todo el cobre producido (20.7 Millones de Tm) y ello demuestra la importancia que está teniendo la hidrometalurgia por dos razones fundamentales sus menor

consumo de energía, menores costos implicados y un proceso más limpio con el medio ambiente.

Tabla Nº 1: Producción mundial de cobre refinado

PRODUCCIÓN MUNDIAL DE COBRE REFINADO				
Expresado en millones de Tm de cobre				
	1990	2000	2005 (E)	2010 (E)
Pirometalúrgica	10,2	12,5	14,5	17,0
Hidrometalúrgica	0,6	2,3	3,0	3,7
Producción Total	10,8	14,8	17,5	20,7

Fuente: Ministerio de Energía y Minas

Tradicionalmente la principal fuente de recursos minerales en el Perú ha sido la Cordillera de los Andes.

Existe una vasta y variada riqueza geológica reconocida por la comunidad internacional, la mayor parte aún por explorar y explotar.

El potencial de la minería peruana se refleja en la producción de: oro, plata, plomo, zinc, molibdeno, estaño y nuevos yacimientos de hierro y uranio.



Fig. N° 11: Ubicación de yacimientos de cobre en el Perú

Los minerales producidos en el Perú son de gran demanda en el mercado mundial actual. Estados Unidos, China, Suiza, Japón, Canadá y la Unión Europea son los principales destinos de sus exportaciones mineras.

En cuanto reservas de mineral, el Perú es el segundo país con mayores reservas de cobre en el mundo; en Latinoamérica primero en Zn, Pb y Sn, segundo en Ag y Mo. (US Geological Survey – USGS figures).

2.5 PANORAMA DEL COBRE EN EL PERU

En cuanto al cobre (Cu), las reservas probadas y probables son: 90,813 Miles TMF.

Producción Anual Cu 2009: 1,275Miles TMF.

Tabla N° 2: Reservas Cupríferas en el Perú

RESERVAS CUPRÍFERAS / MILES DE TMF		
DEPARTAMENTO	PROBABLES	PROBADAS
MOQUEGUA	11,316	6,225
TACNA	2,708	13,184
AREQUIPA	9,811	3,038
ANCASH	8,441	3,789
APURIMAC	3,250	7,998
CAJAMARCA	1,202	7,596
CUSCO	3,474	1,849
LAMBAYEQUE	3,690	642
LA LIBERTAD	481	673
JUNIN	217	114
PASCO	216	110
ICA	218	65
LIMA	95	154
HUANCAVELICA	50	136
PUNO	8	27
PIURA	9	9
HUANUCO	5	10
AYACUCHO	2	1
Total general	45,194	45,620

Fuente: Ministerio de Energía y Minas

Cuadro N° 2: Principales Proyectos Cupríferos

PRINCIPALES PROYECTOS CUPRIFEROS		
TOROMOCHO	CAÑARIACO	PIWAYA
RIO BLANCO	CONSTANCIA	ZAFRANAL
LA GRANJA	MAGISTRAL	AGUAS VERDES
MICHICULLAY	QUELLAVECO	MOLLETAMBO
LA MORADA	PULCAGAGA	UTUPARA
LOS CHANCAS	MAR COBRE	TRAPICHE
LAS BAMBAS	LA MANCHA	COTABAMBA
QUECHUA	EL CHORRO	HAKIRA
ANTAPACCAY	PALCA	KATANGA
TIA MARIA	CHAPI	BALLENA
MINA JUSTA		

Fuente: MEM-2010

A continuación se detalla los proyectos cupríferos que se encuentran ubicados principalmente en la zona norte y sur de nuestro país.

PERU NORTE Cu – Au Franja de Pórfidos

Siendo el proyecto “La Granja” el que tiene la mayor producción estimada de 800 Mt (millones de toneladas) de una ley de 0.61% de cobre.

La Granja está ubicada en la región peruana de Cajamarca, en el distrito de Querocoto, en la provincia de Chota. El lugar está aproximadamente a 1,000 kilómetros de la ciudad capital, Lima, y para acceder desde allí se requiere un viaje de hasta nueve horas - dependiendo de las condiciones del clima y de la carretera-, primero en avión y luego por tierra.

El proyecto, de 7,400 hectáreas, se encuentra a 2,000 metros sobre el nivel del mar y la temperatura promedio es de 17.1°C. La precipitación promedio anual es de 989 milímetros cúbicos.



Fig. Nº 12: Proyectos zona norte

Fuente: MEM-2010

PERU SUR Franja pórfidos de Cu Paleoceno

Los pórfidos cupríferos son esencialmente depósitos minerales de baja ley y gran tonelaje. Se denominan pórfidos porque frecuentemente, pero no exclusivamente, se asocian con rocas ígneas intrusivas con fenocristales de feldespato en una masa fundamental cristalina de grano fino.

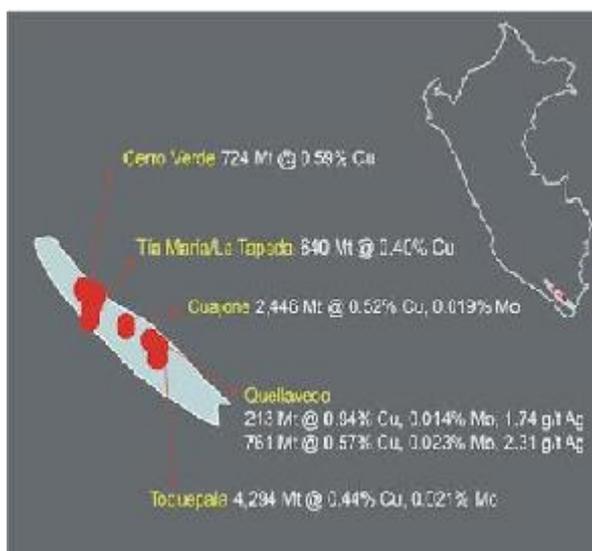


Fig. Nº 13: Proyectos zona sur

Fuente: MEM-2010

APURIMAC Pórfido-Skarn Cu (Eoceno-Oligoceno)

Resaltando el Proyecto Las Bambas con una producción estimada de 1 132 Mt de minerales de cobre con una ley aproximada de 0.77% Cu y además 0.020% Mo

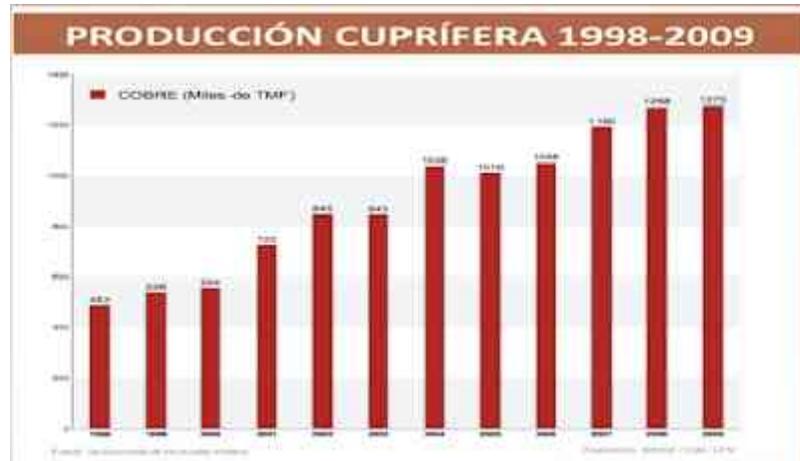
El Proyecto Minero Las Bambas fue el primer proyecto de Xstrata en el Perú y tiene una gran trascendencia en el ámbito internacional. Se ubica a 72 kilómetros del Cusco, entre las provincias de Cotabambas y Grau, departamento de Apurímac, a más de 4.000 metros sobre el nivel del mar.



Fig. Nº 14: Proyecto zona Apurimac

Fuente: MEM-2010

Cuadro N° 3: Producción Cuprífera 1998 - 2009



Fuente: Declaraciones de los titulares mineros

Elaboración: MINEM/DGM/DPM

Como podemos observar en la gráfica anterior referente a la producción de cobre sigue en aumento cada año y debido a la gran cantidad de proyectos y reservas en nuestro país dicha producción cuprífera seguirá creciendo.

2.6 FUTURO DE LA HIDROMETALURGIA

El aumento de capacidad en las plantas de tratamiento va en la dirección de reducir los costos operativos, como única alternativa de supervivencia frente a los cada vez más bajos precios de los metales básicos.

Poniendo como ejemplo el cobre, este metal ha llegado a caer hasta valores impensables del orden de 0,60 USD por libra. Según cifras de dominio público, los mayores productores mundiales, con procesos convencionales molienda/flotación tienen costos de producción del orden de 0,55-0,70 USD por libra.

Los productores de cobre vía hidrometalúrgica presentan en cambio costos de producción de 0,30-0,50 USD por libra, y debe tenerse en

cuenta que la producción unitaria de las plantas hidrometalúrgicas en términos generales es inferior a la cuarta parte de la producción en plantas convencionales, lo que nos da una idea clara de la gran diferencia de costo operativo entre la vía convencional y la hidrometalúrgica.

Podría decirse que la Hidrometalúrgia está en sus comienzos, por lo que es de esperar que los costos de producción se vean reducidos en un plazo breve, con la introducción de mejoras en los procesos de lixiviación, extracción por solventes y electrodeposición (se debe continuar haciendo pruebas metalúrgicas e investigación para ir mejorando estos procesos que involucran a la hidrometalurgia).

Hace tan sólo unos años que han empezado a desarrollarse procesos de biolixiviación que van a permitir, una vez puestos a punto, reducir drásticamente los costos de producción.

La Hidrometalúrgia, es hoy ampliamente aplicada para el tratamiento de numerosos metales como el oro, cobre, zinc, níquel, cobalto, entre otros, y la Biometalúrgia puede jugar un papel de importancia, en su desarrollo futuro.

Parece que en este segundo milenio, estamos a las puertas de una nueva era donde un proceso más limpio como la Biometalúrgia puede devolver la confianza de la sociedad en la actividad minera, que en estos momentos "verdes" goza de tan mala prensa.

Hoy día está sobradamente demostrado que las actividades industriales, necesarias para la supervivencia de nuestra sociedad, no son en absoluto incompatibles con la conservación de nuestro hábitat, están en boca de todos, el Medio Ambiente.

CAPITULO III

RESULTADOS

3.1 DESCRIPCIÓN

El esquema general del proceso se puede observar en la Fig. 1. El mineral procedente de la explotación, a cielo abierto o subterránea, debe ser ligeramente preparado en una planta de chancado y/o aglomeración, para conseguir una granulometría controlada que permita un buen coeficiente de permeabilidad.

Una vez preparado el mineral, se coloca en montones de sección trapezoidal y altura calculada para proceder a su riego con la solución lixivante. Tras percolar a través de toda la pila, se recolectan los líquidos enriquecidos (solución rica) que se llevan a la planta de proceso de recuperación de la sustancia mineral (sal o metal). Las aguas sobrantes del proceso vuelven a ser acondicionadas para ser recicladas hacia las pilas. También en algunos casos es preciso añadir agua nueva, para reponer las fuertes pérdidas de evaporación del circuito.

Se denomina cancha de lixiviación a la superficie de apoyo de la pila donde se coloca la impermeabilización. Cuando la cancha es recuperada para reutilizarla con un nuevo mineral se trata de lixiviación en PILAS DINAMICAS, mientras que si el terreno no es recuperado y, por lo tanto, el mineral agotado queda en el depósito como nueva base para otra pila, se está en la lixiviación en PILAS ESTATICAS o PERMANENTES.

La solución rica (S.R. o P.L.S.: pregnant leach solution) es generalmente impura y diluida y deberá ser purificada y concentrada antes de recuperar el metal. En la hidrometalurgia del cobre, eso se realiza mediante la extracción por solvente seguida por la electrodeposición

del cobre. La solución rica sólo contiene 4 - 6 g/l Cu y 1 - 2 g/l H₂SO₄ y es impura (5 g/l Fe, SiO₂, Al₂O₃ coloides, sólidos en suspensión, ...).

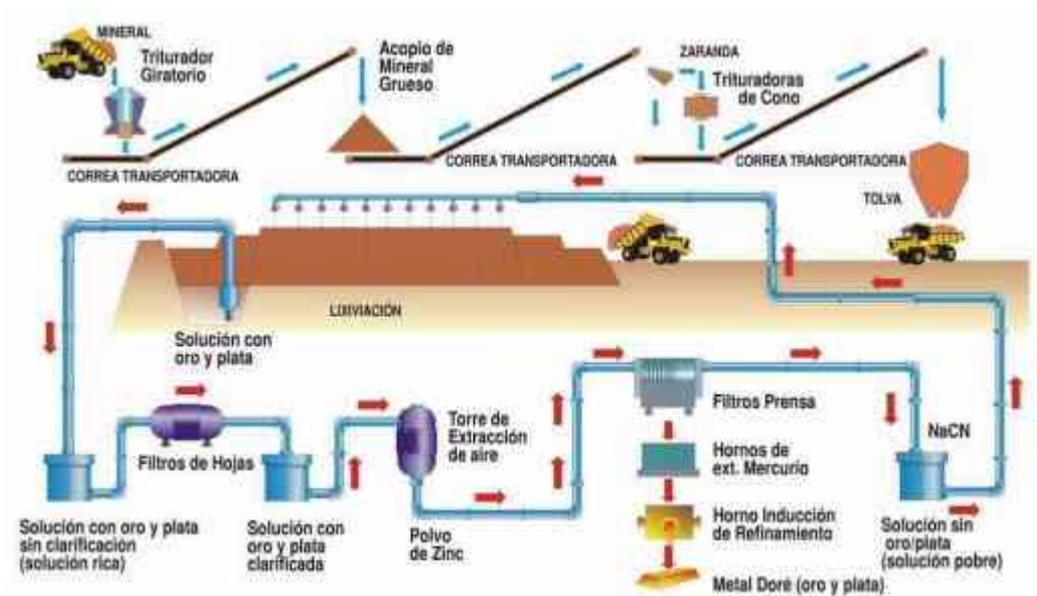
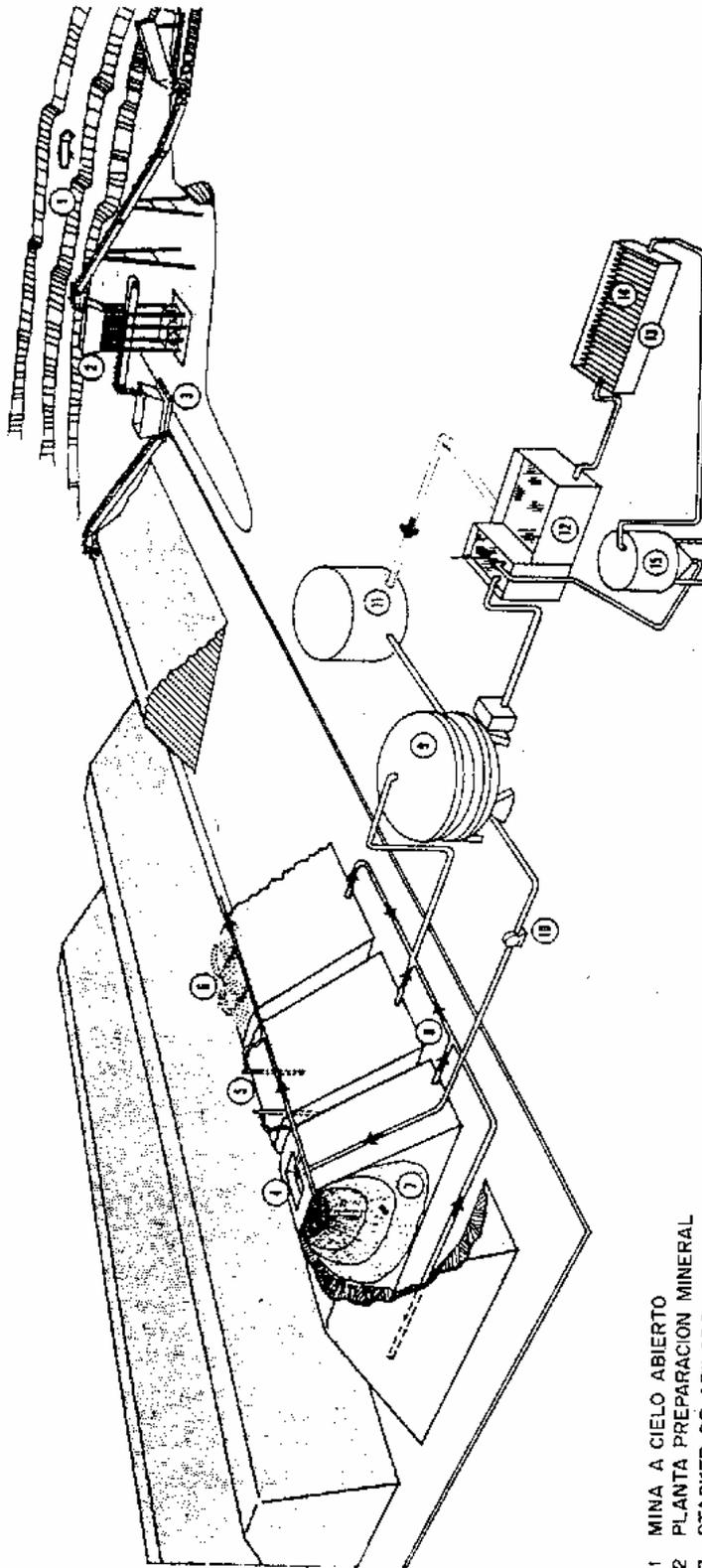


Fig. 15: Proceso de Lixiviación de cobre en pilas



- 1 MINA A CIELO ABIERTO
- 2 PLANTA PREPARACION MINERAL
- 3 STACKER DE APILADO
- 4 ALIMENTACION DEL LIXIVIANTE POR CANAL
- 5 " " " " POR TUBERIA
- 6 " " " " POR ASPERSION
- 7 PILAS DE MINERAL PREPARADO
- 8 CANALES DE EXTRACCION DEL LICOR ENRIQUECIDO
- 9 TANQUE PRINCIPAL DE LICOR MADRE Y DE AJUSTE
- 10 RECIRCULACION POSIBLE

11 a 15 PLANTA EXTRACCION DEL PRODUCTO

Figura Nº 16: Esquema de lixiviación en pila

3.2 CONSTRUCCIÓN DE LAS PILAS

El diseño de las pilas debe tener en cuenta los siguientes factores:

La calidad del patio o base de apoyo (impermeable).

Las facilidades de riego y recolección o drenaje del efluente.

La estabilidad de la pila seca y saturada en agua.

Los tanques (piscinas) de soluciones ricas y pobres.

La forma de apilamiento o deposición del material Lixiviable (Compactación, homogeneidad, ...).

3.2.1 Preparación de la base de las pilas

Se necesita disponibilidad de amplias superficies de terreno relativamente llanas (menos de 10% de pendiente). La cancha debe ser considerada con su sistema de impermeabilización, para controlar las pérdidas de soluciones y evitar contaminaciones del medio ambiente. El sistema consiste en:

Una base firme y consolidada, debidamente preparada

Una capa de lecho granular sobre el que apoyar suavemente la lámina

La lámina o capa de impermeabilización

Un conjunto de drenaje o capa de recolección de líquidos

Una capa protectora del sistema

Generalmente, las membranas o láminas de impermeabilización del patio son geomembranas de origen sintético (láminas de plástico: polietileno de alta densidad o PVC de 1 a 1.5 mm o polietileno de baja densidad de 0.2 a 0.3 mm de espesor) pero también pueden ser materiales arcillosos compactados sobre el propio terreno, hormigón, asfalto, etc.. Se pueden disponer de membranas o sellados simples, dobles o triples, de acuerdo con

el número de capas impermeables o membranas que se hayan utilizado.

Una parte importante de la construcción de la pila es el sistema de recolección de la solución rica, que, en general consta de grava o material filtrante sobre la lámina y tuberías perforadas drenantes de plástico.

3.2.2 Técnicas de apilamiento del mineral

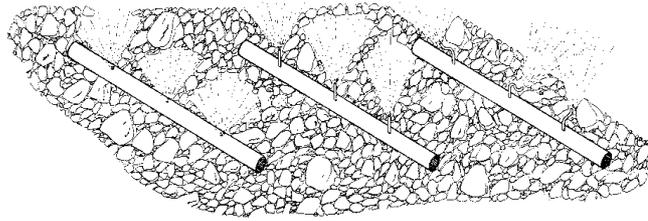
El uso de cargadores frontales y camiones (Fig. N° 18a) a sido desplazado, en los últimos proyectos, por apiladores autopropulsados de bajo perfil de carga, como en el caso de Lince, para tonelajes de 5000 a 10000 tpd (Fig. N° 18b). Para tonelajes mayores, 17500 tpd en Quebrada Blanca por ejemplo, se ha adoptado el sistema de correas cortas y móviles (grass hoppers) que se articulan flexiblemente en secuencia para transportar el mineral desde el aglomerador hasta el apilador móvil que construye la pila (Fig. N° 18c). Para tonelajes aún mayores, como en El Abra 125000 tpd, se implementaron otros tipos de equipos (apiladores sobre orugas, ...).

La altura de la pila fluctúa entre 2.5 m para sistemas de camión y cargador frontal, hasta 10 m para apiladores.

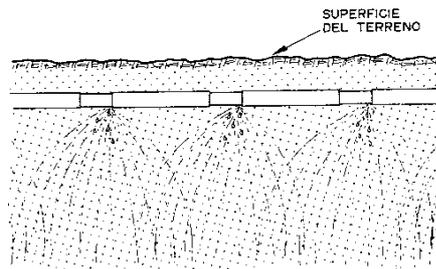
3.2.3 Riego de la pila

El riego de las pilas se puede realizar fundamentalmente por dos procedimientos: por aspersión o por distribución de goteo, este último siendo recomendable en caso de escasez de líquidos y bajas temperaturas (Fig 3.13 a y b). En la industria, se utiliza generalmente una tasa de riego del orden de 10 - 20 litros/h.m².

El riego tiene que ser homogéneo.

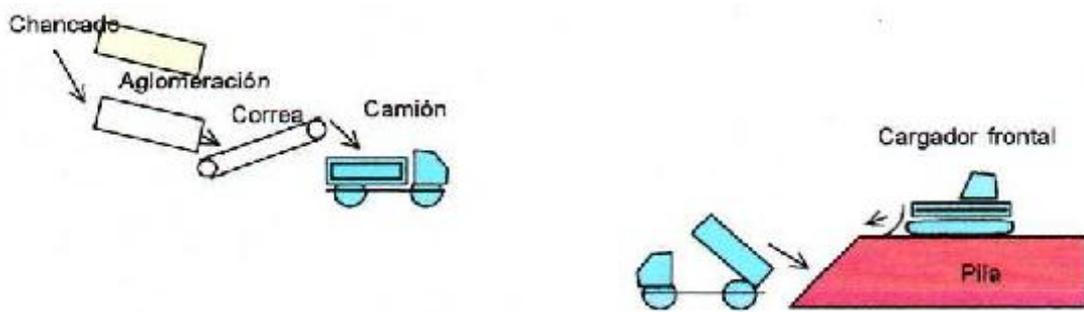


a) Por aspersión

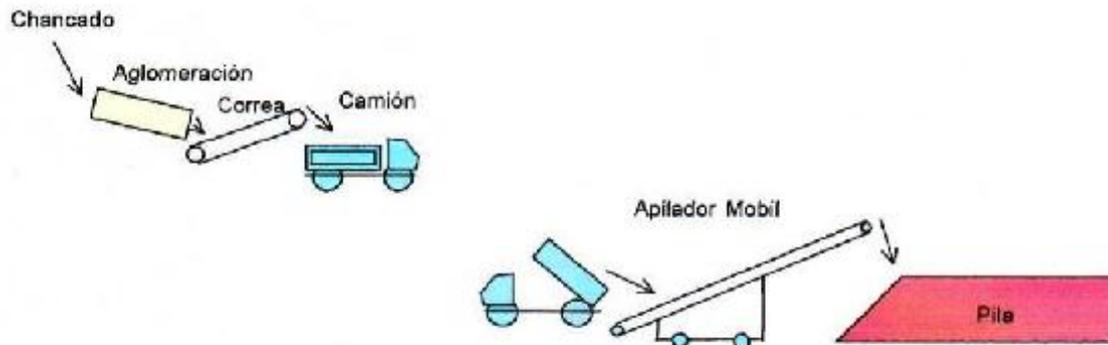


b) Por goteo

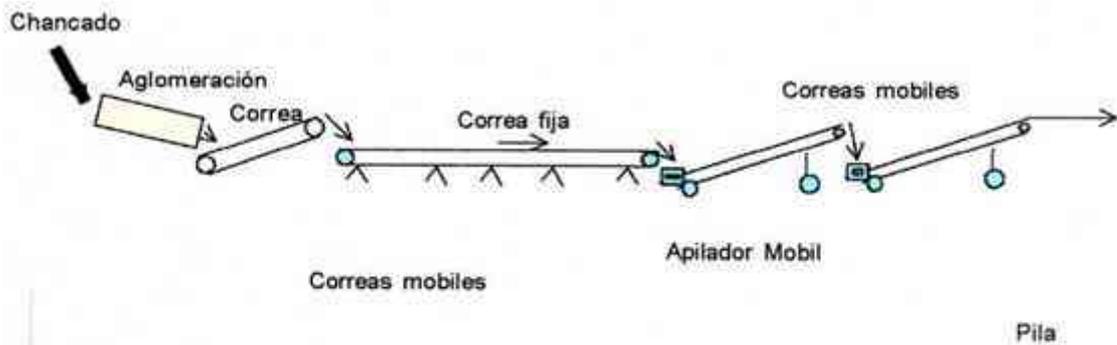
Figura N° 17: Técnicas de irrigación de las pilas



(a) Producciones pequeñas, baja inversión



(b) Producciones pequeñas - medianas. Mejora la permeabilidad de la pila.



(c) Producciones medianas - grandes. Menor costo operación.

Fig. Nº 18: Técnicas de apilamiento del mineral

3.3 OPERACIÓN DE LAS PILAS

Al inicio de la operación, se deben disponer como mínimo de dos pilas, comenzándose con el riego de la primera de ellas. En un principio se obtendrá una alta concentración (C_{mx}) en la solución, que irá descendiendo hasta un valor por debajo de la concentración media (C_{md}) de diseño. En este momento se pone simultáneamente en operación la segunda pila, con dos sistemas posibles :

- Lixiviación de las dos pilas con obtención de una única solución rica final.
- Lixiviación de la primera pila con producción de solución

intermedia (pobre), que se recicla a la segunda pila nueva en donde se obtiene la solución rica (Fig. 3.15). Este segundo sistema se generalizo, ya que permite alargar el tiempo de lixiviación de las pilas y/o disminuir el caudal de solución rica y entonces el tamaño de la planta de SX.

Cuando la primera pila alcanza el valor mínimo económico, se procede al lavado con agua fresca y drenaje hasta el agotamiento, yendo esta solución al depósito o piscina de solución estéril para recirculación al sistema. Al mismo tiempo se pone en operación una nueva pila.

Según las disponibilidades de área, la pila agotada se puede cargar y transportar a un vertedero cercano (PILA DINAMICA o REMOVIBLE) o puede servir de base para la formación de una nueva pila (PILA PERMANENTE).

La tendencia se desplaza al uso de pilas permanentes, para evitar los costos asociados a los movimientos de materiales residuales y aminorar las pérdidas de solución por filtración a través de la lámina de plástico. Por ejemplo, en Tintaya, se planea subir hasta 6 pisos de 3 m cada uno.

Si el tiempo de lixiviación no es suficiente, la recuperación baja. Es un problema, porque no es posible aumentar el tiempo sin aumentar el área de la cancha de lixiviación.

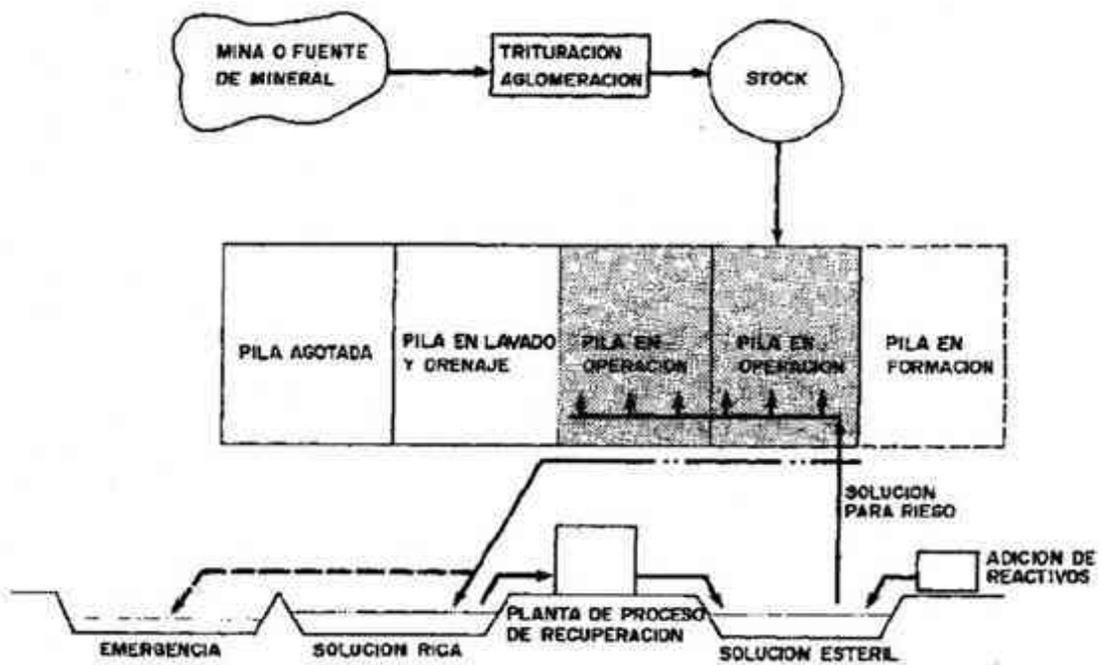


Fig. N° 19: Esquema de un sistema de lixiviación en pilas

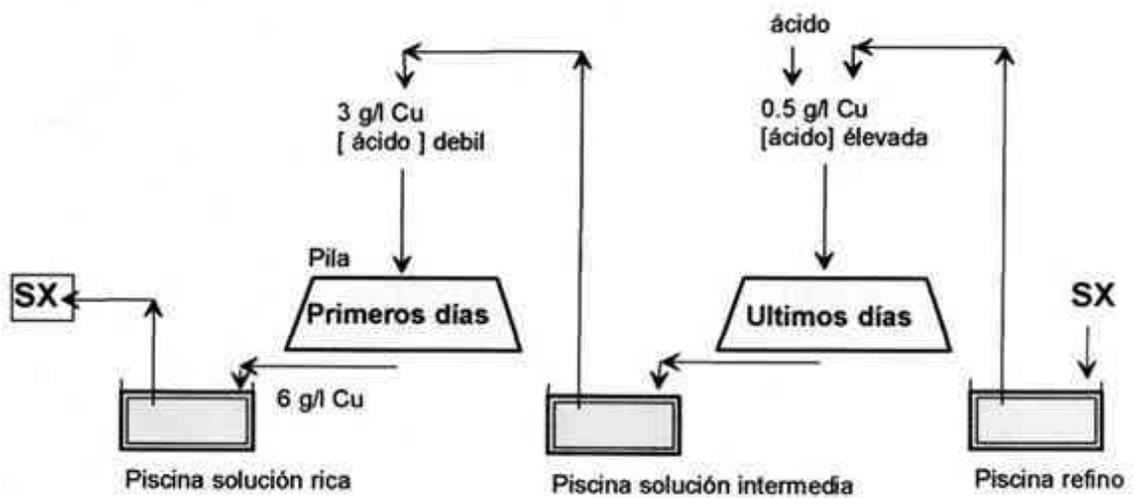


Fig. N° 20: Reciclaje de una solución lixivante en contra - corriente

3.4 CHANCADO DEL MINERAL

El chancado del mineral debe cumplir con tres objetivos :

- (1) Ser lo suficiente fino para que la mayoría de la especie metálica valiosa este expuesta a la acción de la solución lixivante.

Por ej. : 100 % bajo 3/4"

- (2) No puede producir demasiado partículas finas para no alterar la permeabilidad de la pila. (Por convención, se llama fina toda partícula bajo 100 mallas) "Material arcilloso"

Por ej. : partículas finas < 10%

- (3) El mineral chancado debe ser el más homogéneo posible, todas las partículas siendo comprendidas en un estrecho rango de tamaño (Fig. 3.16).

Tabla Nº 2: Escala de tamaños de partículas, en pulgadas, mallas Tyler y mm.

16/16"	8/8"	4/4"	2/2"	1"	25.4 mm	FRACCION GRUESA
3/4"					19.0 mm	
8/16"	4/8"	2/4"	1/2"		12.7 mm	
3/8"					9.5 mm	
4/16"	2/8"	1/4"			6.4 mm	FRACCION MEDIA
3/16"					4.8 mm	
2/16"	1/8"				3.2 mm	
.						FRACCION FINA
.						
4 mallas					4.75 mm	
.						
.						
100 mallas						

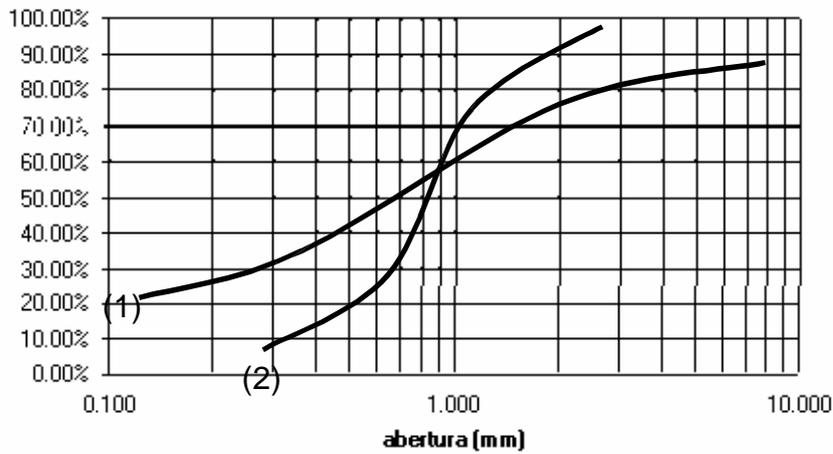


Figura N° 21: Curvas de distribución granulométrica de un producto de la etapa de chancado. La curva (1) es más homogénea que la curva (2).

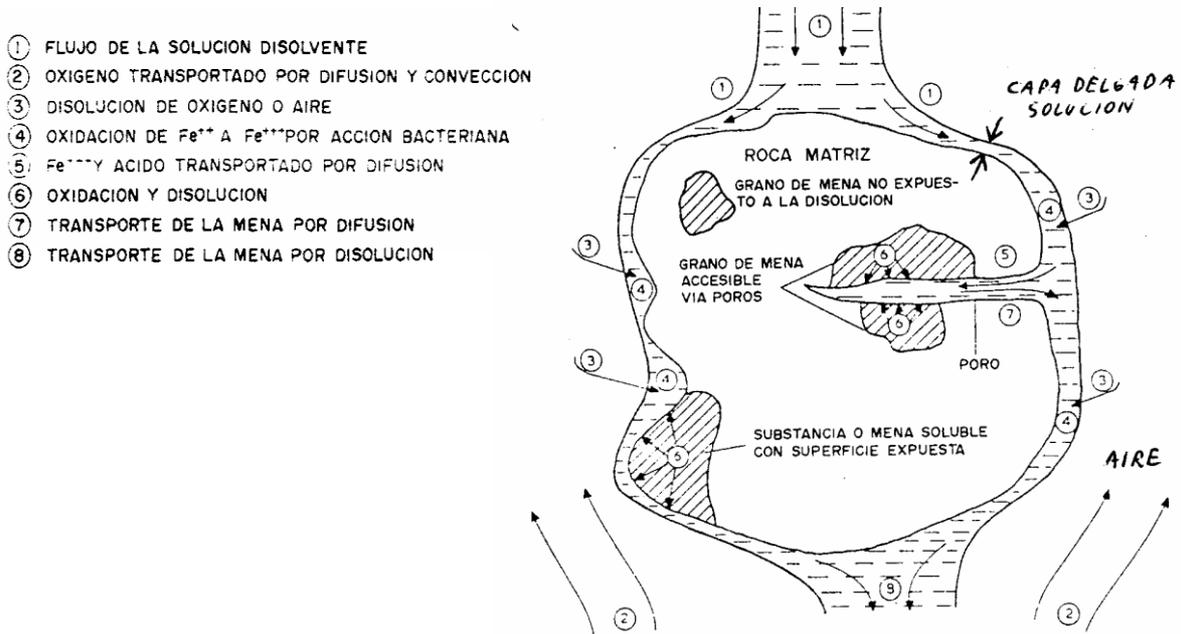


Figura N° 22: Concepto de la lixiviación TL (capa delgada).

3.5 AGLOMERACIÓN

3.5.1 Lixiviación TL (Thin Layer)

Este concepto revolucionó la industria de lixiviación del cobre. Consiste en impedir la acumulación de solución en la pila. Al contrario de la lixiviación en bateas, la pila no se inunda. La solución escurre sobre las partículas de minerales, formando una capa delgada de líquido (Fig. N° 7)

3.5.2 Permeabilidad del lecho

Se necesita que el lecho de partículas que conforman la pila sea bien permeable, para asegurar una buena percolación y dispersión de la solución lixivante en la pila, sin escurimiento preferencial. También, las pilas podrían derrumbarse si había acumulación de agua en la pila.

La permeabilidad del lecho de mineral es mayor si :

Las partículas son de tamaño suficientemente grande

No hay acumulación de partículas finas

El tamaño de las partículas es homogéneo en la pila

No hay compactación de la pila por maquinaria pesada

3.5.3 Proceso de aglomeración

De lo anterior, se deduce que se tiene que reducir la cantidad de partículas finas en la pila para aumentar su permeabilidad. Hoy en día, el proceso más empleado para solucionar el problema de los finos es la aglomeración.

El **proceso de aglomeración** consiste en esencia en la adhesión de partículas finas a las gruesas, que actúan como núcleos o la aglomeración de los finos con los finos, a partir de la distribución de tamaños en la alimentación (Fig. N° 8).

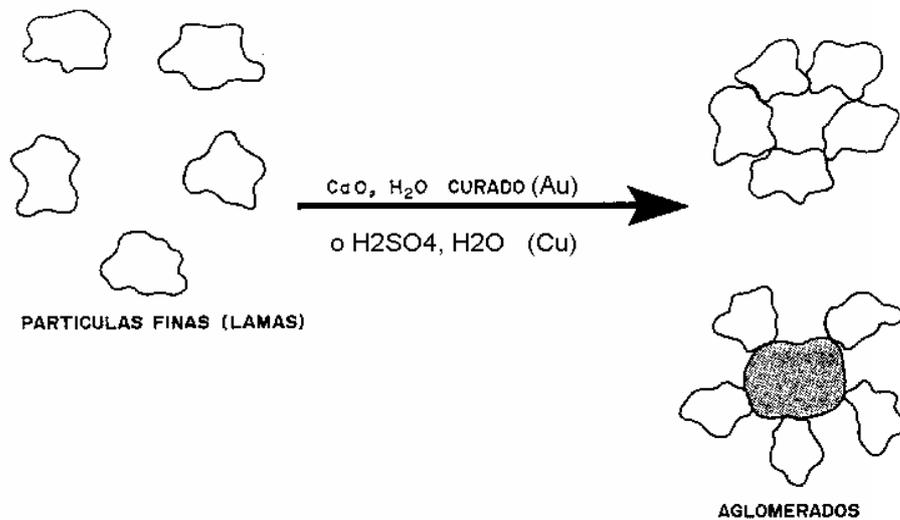


Figura N° 23: Concepto de aglomeración.

Aglomeración por humedad

El proceso más simple de aglomeración es humedecer el mineral con líquido, hasta alcanzar un contenido de agua que origine una tensión superficial suficiente, para que al colisionar las partículas entre sí, los finos se adhieran a los tamaños gruesos. Se forma un puente líquido entre las partículas.

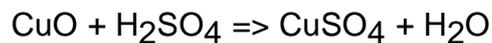
El cálculo teórico de la humedad óptima es casi imposible y depende de muchos factores como la mineralogía del mineral, contenido de finos, arcillas, ... Puede ser de 6 - 8 % para minerales muy limpios, hasta un 10-15 % H₂O para materiales normales.

Aglomeración por adherentes

Existen ciertos materiales que pueden mejorar la adherencia de las partículas finas a las gruesas, prolongando esta unión tanto en la manipulación como en la operación de lixiviación.

En el caso de la lixiviación del cobre, la aglomeración (o curado) se realiza con el mismo lixivante ácido en un tambor rotatorio (Fig. N° 9). Primero, se humecta el mineral (+/- 4%) con agua o solución pobre (refino). Después, se agrega ácido sulfúrico concentrado (+/- 30 kg/t o 3%), este ácido ataca el mineral y genera compuestos cementantes entre las partículas.

Además de la aglomeración, ocurren reacciones químicas conduciendo a la formación de sulfatos de cobre y hierro (curado propiamente tal). Estas reacciones son exotérmicas y generan mucha calor. Por ejemplo :



Después de la aglomeración en el tambor rotatorio, se deja reposar el mineral durante 24 h en la pila, para que se completen las reacciones químicas y que se adhieren entre sí las partículas en la misma pila.

En el caso de la aglomeración de minerales de oro y plata, los aglomerantes son normalmente el cemento y la cal. Estos reactivos mejoran la adhesión de las partículas entre sí, y también aumentan el pH del mineral para su posterior cianuración.

Equipos

El equipo más común es el tambor aglomerador. Consiste en un cilindro inclinado girando a baja velocidad, ocasionando el deslice (cascada) y la aglomeración del mineral previamente mojado con agua y/o adherentes (Fig N° 9). Se practica también la aglomeración en depósitos (stock), en cintas transportadoras y en platos.

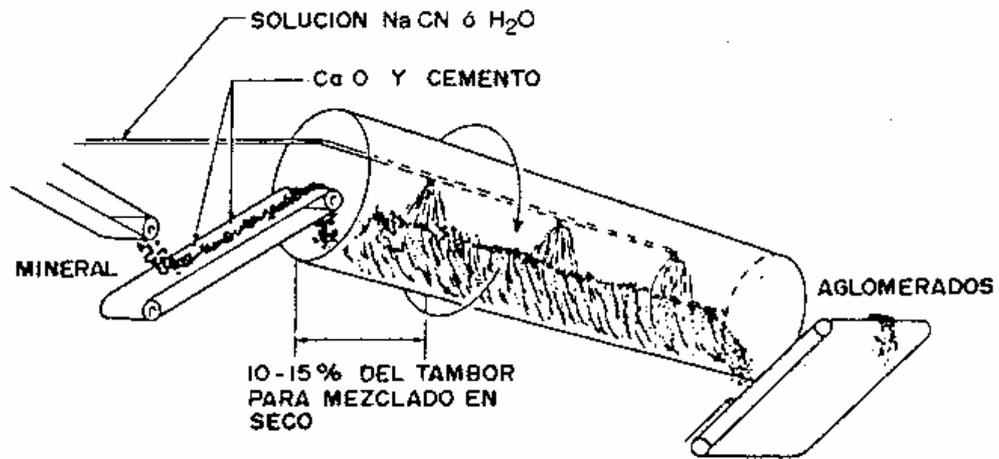


Figura N° 24: Aglomeración en tambor rotatorio.



Figura N° 25: Equipo de Aglomeración en tambor rotatorio.

3.6 VARIABLES DEL PROCESO

Se pueden estudiar el efecto de varias variables operacionales sobre la recuperación del metal valioso y la cinética realizando pruebas de laboratorio en columnas.

Las principales variables son :

La granulometría

La altura de la pila

La tasa de riego [l/h.m²] o [l/h.T]

La concentración en ácido de la solución de riego

El tiempo de lixiviación

Depende de la cinética (lix. química: 1 a 2 meses; lix. bacterial : 3 a 12 meses).

Todos estos factores están relacionados entre si.

Por ejemplo, si se aumenta la altura de la pila, la concentración en ácido del primer metro es buena, pero baja a medida que la solución percola en la pila y el cobre de los estratos inferiores no se lixivian bien. Se puede aumentar la concentración en ácido de la solución de lixiviación, para salir de la pila con +/- 3 g/l [H⁺], pero más ácido se da a la ganga y más se come, así que se va a incrementar el consumo de ácido. Otra posibilidad es aumentar la tasa de riego, pero existe un riesgo de inundar la pila.

3.7 DISEÑO DE LAS PILAS

En este párrafo, se considera el diseño de una operación mediana de lixiviación de óxidos de cobre, por ejemplo Xstrata Tintaya (Región Cuzco).

3.7.1 Datos

Capacidad de la planta : 48000 tCu/año = 4000 tCu/mes
= 133 tCu/día

Ley del mineral : 0.95 % CuT
(0.80% Cu soluble + 0.15% Cu insoluble)

Fierro : 5%

Consumo de ácido : 3.5 kg ácido/kg Cu producido

Recuperación en la pila : 80% CuT en 2 meses (le da las pruebas piloto) Granulometría : 100% < 3/8"

Altura de la pila : 5 m (parámetro de diseño)

Densidad aparente del mineral en la pila : 1.45 t/m³ (material chancado).

3.7.2 Capacidad de la planta de chancado

Se recupera 80% x 9.5 kg Cu/TMS = 7.6 kg Cu/TMS (TMS = Tonelada Métrica Seca).

Entonces, se tiene que procesar:

$$\frac{133000 \frac{Kg}{día}}{7.6 \frac{Kg}{TMS}} = 17500 \frac{TMS}{día}$$

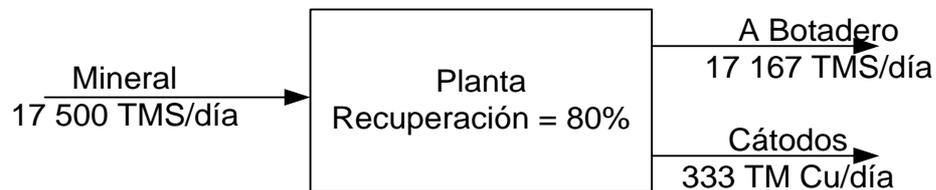


Figura N° 10, Diagrama de flujo simplificado de una planta de lixiviación de cobre.

3.7.3 Superficie de terreno

El ciclo de lixiviación de una pila de mineral es de 2 meses. Entonces, el stock de mineral en la planta es de 17500 TMS/día x 60 días = 1.050.000 TMS.

Si se consideran pilas rectangulares (aproximación) de 5 metros de altura, se puede almacenar $1.45 \text{ TMS/m}^3 \times 5 \text{ m} = 7.25 \text{ TMS/m}^2$.

La superficie de las pilas en funcionamiento es de:

$$\frac{1050000 \text{ T}}{7.25 \frac{\text{T}}{\text{m}^2}} = 144827 \text{ m}^2$$

Pero todos los días, hay por lo menos una pila en carga, otra en descarga y se necesita espacio para el movimiento de las máquinas. La práctica indica que esos espacios ocupan un 10% de la superficie de las pilas en funcionamiento. Se necesita entonces una superficie total de terreno de $144827 \text{ m}^2 \times 110\% = \mathbf{159310 \text{ m}^2}$.

Eso corresponde a un área de 400 m x 400 m, o 200 m x 800 m, o 100 m x 1600 m.

CONCLUSIONES

La velocidad de disolución de cobre está limitada por la difusión del ion cúprico a través de la capa de residuo de la lixiviación desde la zona de reacción hacia la solución, tanto para soluciones diluidas como concentradas.

La velocidad de disolución de cobre es mayor en soluciones diluidas que en soluciones concentradas dado que el coeficiente de difusión del ion cuprico disminuye en un 60 % al utilizar soluciones concentradas.

La velocidad de disolución de cobre es independiente de la concentración de ácido sulfúrico en el rango de 15 a 30 [gr/lit].

El consumo de ácido por cobre producido aumenta al aumentar la concentración de ácido en solución sin aumentar la velocidad de disolución del cobre ni su recuperación. Basado en este resultado debería existir una concentración de ácido menor a 15 [gr/lit] que mantenga la velocidad de disolución de cobre minimizando el consumo de ácido.

RECOMENDACIONES

Para el riego de una pila podemos tener muchas alternativas, aspersores, y mangueras. Para lo cual con sus ventajas y desventajas; sin embargo lo más importante, es cual te permite tener mejor eficiencia de precipitación, homogeneidad, facilidad para la instalación y sobre todo menor costo.

Mi recomendación acerca del uso del riego por goteo es el de buscar la mejor alternativa, experimentar, puede ser que este tipo de mangueras trabaje bien en la mina, y puede ser que en otra no, pero es responsabilidad del metalurgista la búsqueda del mejor sistema de riego.

Con respecto al consumo de ácido sulfúrico, he leído en trabajos que han sido presentados en congresos mineros metalúrgicos y de acuerdo a mi experiencia puedo ver que el comportamiento de la curva de recuperación y cantidad de cobre en la solución con el tiempo es muy parecido; a sí mismo sugiero que el riego a diferentes concentraciones de ácido sulfúrico es una alternativa que debe ser evaluada previamente para la aplicación en la pila.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Martin Col & al (RAHCO), " Manejo de Materiales en Proyectos de Lixiviación ", Minería Chilena N°191, pp 109-123, Mayo 1997.

Marcos Gonzalez, "Curado-Aglomeración-Lixiviación", Curso de capacitación, Universidad de Atacama, Copiapó, 1999.

John Marsden & Lain House, " The Chemistry of Gold Extraction ", Ellis Horwood Limited, 2002.

Paul E. Queneau & al, " Hydrometallurgy - a short course ", TMS-AIME Continuing Education Committee.

Andrés Reghezza, " Aspectos Tecnológicos de la Lixiviación ", Universidad de Concepción, Concepción, 1997.

Gabriel Zárate, " Beneficio de Minerales de Cobre ", in Minería Chilena N°159, pp 37 – 57, Septiembre 1994.

"Minería Química ", Instituto Tecnológico Geominero de España ITGE, 2001.

Muhtadi, O., 1998, «Heap Construction and Solution Application», en: Introduction to Evaluation, Design and Operation of Precious Metal Heap Leaching Projects, D. Van Zyl, I. Hutchison y J. Kiel, (eds.) SME, 1998.

Murr, L.E., 2000, «Theory and Practice of Copper Sulphide Leaching in Dumps and In situ», Minerals Science and Engineering, v. 12, No. 3, p.121-189.

Nash, W.G., 1912, «Precipitation of Copper From Mine Waters», Mining and Scientific Press, v.104, No. 5, p. 213-214.

Newmark, N.M., 1965, «The 5th Rankine Lecture - Effects of Earthquake in Dams and Embankments, «Geotechnique, Vol. 5, No. 2, Junio.

Potter, G.M., 1981, «Design Factors of Heap Leaching Operations»,
Mining Engineering, v. 33, No.3, p. 277-281.