

UCH-FC
Q. Ambiental
9993
C.1



FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

**“ANÁLISIS DE LA BIOLIXIVIACIÓN, ALCANCE Y POSIBILIDAD DE
IMPLEMENTACIÓN EN LA INDUSTRIA DEL COBRE EN CHILE”**

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial
de los requisitos para optar al Título de:

Químico Ambiental

Ximena Iris Guzmán Rojas



Director de Seminario de Título: Sr. Camilo Lagos Miranda
Profesor Patrocinante: Dra. Francesca Faini di Castri

Marzo de 2011
Santiago – Chile



INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por el o (la) candidato (a):

XIMENA IRIS GUZMÁN ROJAS

“ANÁLISIS DE LA BIOLIXIVIACIÓN, ALCANCE Y POSIBILIDADES DE IMPLEMENTACIÓN EN LA INDUSTRIA DEL COBRE EN CHILE”

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental

COMISIÓN DE EVALUACIÓN

Sr. Camilo Lagos Miranda
Director Seminario de Título

CL *CLagos*

Dra. Francesca Faini di Castri
Profesor Patrocinante

F Faini

Dr. Paul Jara
Corrector

Paul Jara M

M. Cs. Sylvia Copaja Castillo
Corrector

SCopaja



Santiago de Chile, marzo de 2011



Nacida en Copiapó, hija menor de una profesora de química y un militar, comenzó su vida siendo cuidada por los esfuerzos de su nana, junto a sus dos hermanas. La mayor parte de su enseñanza básica la realizó en el Colegio Buen Pastor, que le entregó además de una buena base, un regalo; su mejor amiga a la fecha. Con un poco de escepticismo al principio, se integró al Liceo Católico Atacama, luego de un tiempo allí sus temores se derrumbaron, encontrando buenas amigas y excelentes profesores. Al llegar a cuarto medio, surgió la necesidad por defender el medioambiente mediante la ciencia y con ello, agradecer a Dios una vida llena de bendiciones, mejorando la tierra que él nos entregó. Así decidió estudiar una carrera ambiental y durante las postulaciones descubrió que existía una carrera que parecía interesante, en la mejor universidad del país, Química Ambiental. Dejando su hogar, decidió arriesgarse por su futuro y con el apoyo constante de sus padres, se mudó a Santiago. Su tía la recibió en su hogar y la apoyó durante todo el tiempo que duró su carrera. Finalmente su tesis demoró más de lo que pretendía, pero durante ese tiempo hizo un diplomado y estudió inglés nuevamente, siempre buscando superarse. Ahora puede decir que terminó una de las etapas más importantes de su vida.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Comisión Chilena del Cobre por darme la oportunidad de realizar mi tesis, en especial a Camilo Lagos por su buena disposición y tiempo entregados.

En la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile agradezco a Margarita Carú y Valentina Abarca, por ayudarme con algunas referencias y material de apoyo. A la profesora Francesca Faini, por aceptar ser mi profesora patrocinante. También a la directora de carrera Sylvia Copaja por su preocupación y apoyo durante toda la carrera, así como a todos los profesores que entregaron su tiempo para enriquecer mis conocimientos.

A mis padres y hermanas por su apoyo, cariño, ánimo para continuar cuando sentía que no sabía lo que quería y por hacer de mis estadías en Copiapó excelentes días.

A mi tía Ximena por su paciencia, cariño, entrega y todos sus esfuerzos para hacerme sentir lo mejor posible.

A mi amigui, amigas del liceo y amigos de la universidad, les doy las gracias por hacerme vivir muy lindos momentos, por acompañarme cuando me sentí sola y apoyarme cuando los necesitaba.



INDICE DE CONTENIDO

Contenido	Página
I. INTRODUCCION.....	1
1.1 Marco Teórico.....	4
1.1.1 Minerales cupríferos.....	4
1.1.2 Cinética de reacción de los minerales.....	7
1.1.3 Proceso productivo del cobre.....	9
1.1.3.1 Minerales oxidados.....	9
1.1.3.2 Minerales sulfurados.....	11
1.1.4 Biotecnología en el proceso productivo del cobre.....	15
1.2 Microorganismos involucrados en sistemas de biolixiviación.....	16
1.2.1 Características generales de los microorganismos utilizados.....	16
1.2.2 Diversidad de microorganismos en sistemas de biolixiviación.....	17
1.2.3 Cultivo de microorganismos.....	20
1.3 Mecanismos de Biolixiviación.....	21
1.3.1 Mecanismo de contacto.....	23
1.3.2 Mecanismo de no contacto.....	25
1.3.2.1 Mecanismo del tiosulfato.....	25
1.3.2.2 Mecanismo del polisulfuro.....	26
1.3.3 Mecanismo de cooperación.....	28
1.4 Factores que afectan el desarrollo bacteriano.....	29
1.5 Técnicas de biolixiviación.....	33



1.5.1	Procesos basados en el riego.....	33
1.5.1.1	Biolixiviación en pilas.....	33
1.5.1.2	Biolixiviación en botaderos.....	36
1.5.1.3	Biolixiviación in situ.....	37
1.5.2	Procesos basados en la agitación.....	37
1.5.2.1	Biolixiviación en tanques agitados.....	37
1.6	Descripción del Problema.....	39
1.7	Objetivos.....	39
1.7.1	Objetivo General.....	39
1.7.2	Objetivos Específicos.....	40
II.	METODOLOGÍA.....	41
III.	RESULTADOS.....	42
3.1	Aplicación de la biolixiviación.....	42
3.1.1	Casos de aplicación nacional por yacimiento minero.....	42
3.1.1.1	Chuquicamata.....	42
3.1.1.2	Lo Aguirre.....	44
3.1.1.3	Cerro colorado y Quebrada blanca.....	44
3.1.1.4	Escondida.....	45
3.1.2	Aplicación internacional.....	46
3.2	Investigación y desarrollo.....	49
3.2.1	Biosigma.....	50
3.2.2	David Holmes.....	51
3.3	Producción.....	52
3.4	Contaminación asociada a fundición y biolixiviación.....	55



3.4.1	Emisiones asociadas a fundición.....	55
3.4.1.1	Emisiones de dióxido de azufre (SO ₂).....	56
3.4.1.2	Emisiones de Material Particulado Respirable (MP10).....	58
3.4.1.3	Emisiones de Arsénico (As).....	59
3.4.2	Residuos líquidos asociados a biolixiviación.....	59
IV.	DISCUSIÓN.....	61
4.1	Ventajas de la biolixiviación.....	61
4.2	Desventajas de la biolixiviación.....	63
V.	CONCLUSIONES.....	65
VI.	REFERENCIAS.....	68



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales especies minerales de cobre de importancia económica, agrupadas según su ubicación aproximada en el yacimiento.....	5
Tabla 2. Velocidad de disolución de las principales especies de cobre, expuestas a una solución diluida de ácido sulfúrico.....	8
Tabla 3. Plantas de biolixiviación en el mundo, operativas actualmente.....	47
Tabla 4. Plantas de Biolixiviación en pilas para minerales secundarios de cobre y mixtos (óxidos y sulfuros) en Chile.....	53
Tabla 5. Plantas de biolixiviación comercial para la recuperación de cobre, desde minerales de sulfuros secundarios en Chile.....	54



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso productivo según el tipo de mineral.....	14
Figura 2. Microorganismos identificados involucrados en la biolixiviación.....	19
Figura 3. Un modelo para el mecanismo de contacto que muestra la lixiviación indirecta de pirita, catalizada por una célula de <i>A. ferrooxidans</i> adherida al mineral....	24
Figura 4. Esquema de los mecanismos de tiosulfato y polisulfuro respectivamente....	27
Figura 5. Esquema que muestra la lixiviación indirecta –no contacto-, la lixiviación por contacto y la lixiviación cooperativa de un mineral sulfuro.....	29



RESUMEN

En los años '80 se aplicó por primera vez en Chile la tecnología de extracción por solvente y electroobtención (SX/EW), en el área de la minería, cuya irrupción significó una revolución en la producción del cobre, y en pocos años llegó a representar un porcentaje importante de la producción total. La tecnología de biolixiviación podría constituir la próxima revolución tecnológica en la producción de cobre, pero se dispone de poca información consolidada de su desarrollo e impacto actual y futuro, relacionada a este metal. Por ello, en este trabajo se recopila información básica de este proceso y con ella es posible justificar que la biolixiviación es un proceso más limpio que la clásica fundición. Por lo tanto, la propuesta es masificar la aplicación de esta tecnología, puesto que su implementación en Chile es real pero baja.



ABSTRACT

In 80's for first time in Chile was applied the solvent extraction and electrowinning technology (SX/EW), in the mining area, that irruption meant a revolution in the copper production, and in a few years become a important percentage of total production. The bioleaching technology could be the next technologic revolution in copper production, but there is few information about its development as its current and future impact, related to this metal. Therefore, this paper collects basic information about this process and it is possible to justify that bioleaching is a cleaner process than classic smelting.

Hence, the proposal is to expand the application of this technology due to that implementation in Chile is real but low.

I. INTRODUCCIÓN

Los avances de la Revolución Industrial permitieron la apertura del comercio nacional al extranjero y con ello en el siglo XIX comenzó la explotación a gran escala de minerales de cobre, basada en la extracción de las especies de alta ley. Unos años mas tardes, la incorporación de los hornos de reverbero permitió procesar los minerales sulfurados y con ello se triplicó la producción de cobre. El ritmo de extracción generó los primeros indicios de agotamiento de los minerales de mayor ley, además la falta en el país de capitales y tecnología adecuada para producir concentrados y explotar minerales de leyes relativamente pobres, dió término a la etapa fácil de extracción minera. Luego, a inicios del siglo XX, con la llegada de las trasnacionales se dispuso de las tecnologías y capitales necesarios para continuar la extracción del cobre (Gana, 1988)

La explotación de los minerales de alta ley genera una gran cantidad de estériles (minerales bajo la ley de corte¹) que no es procesada y se deposita cerca de los yacimientos. Los minerales acopiados quedan expuestos a las condiciones ambientales, así los minerales reducidos son oxidados por el oxígeno del aire y si además en la zona cercana al depósito de estériles hay una fuente de agua, estos se disuelven formando ácidos y contaminando el agua. Este fenómeno se conoce como drenaje ácido de minas.

¹ Es la ley o concentración de mineral mínima explotable, mediante la cual se obtienen beneficios económicos.

Uno de los primeros estudios sobre este fenómeno, se realizó en los años 30 para analizar la contaminación generada en el río Ohio por una mina de carbón bituminoso, en Estados Unidos. El estudio permitió determinar la presencia de microorganismos oxidantes de azufre en las aguas de mina, y que la oxidación del hierro de la pirita ocurría a una velocidad mayor a la esperada por la cinética química (ITGE, 1991).

Durante los años siguientes se realizaron una serie de estudios relacionados con los microorganismos oxidantes encontrados en los drenajes ácidos de mina, se identificaron y nombraron las primeras especies y en 1958 la investigación de Bryner y Jameson fue determinante al establecer que estos microorganismos eran los responsables de la oxidación del hierro de la pirita y sulfuros de cobre (Bryner & Jameson, 1958).

En este mismo año, a la compañía minera estadounidense Kennecott se le aceptó la primera patente en esta área, para el uso de un proceso de lixiviación cíclico, empleando bacterias oxidantes de hierro (Brierley C.L, 2008). Este hecho dio inicio a la aplicación de la biotecnología en la minería, en busca de un potencial económico, lo que más tarde recibió el nombre de biolixiviación.

La biolixiviación es el proceso natural de disolución de minerales por parte de microorganismos y la posibilidad de optimizar este proceso, condujo a su utilización a escala industrial. En el ámbito de la producción económica, la biolixiviación se define como un proceso industrial en el cual se emplean microorganismos para disolver los minerales, liberando un metal de valor presente en un mineral o en un concentrado, que con los métodos convencionales sería muy difícil de extraer. Por lo tanto, es el

proceso convencional de lixiviación catalizado biológicamente, pero aplicado a los minerales sulfurados ante la necesidad de aumentar la cinética de su disolución. De esta manera la biolixiviación es un proceso químico, mediado por el agua y oxígeno atmosférico y un proceso biológico, mediado por microorganismos.

A escala comercial la biolixiviación es aplicada para la recuperación directa de cobre y uranio y como pretratamiento de minerales refractarios para recuperar oro, esto último recibe el nombre de biooxidación. La tecnología de la biolixiviación también ha sido probada en laboratorios de investigación para sulfuros de cobalto, galio, molibdeno, níquel, zinc y plomo (Brierley J.A & Brierley C.L, 2001).

La utilización de bacterias se justifica cuando el mineral sulfurado de un yacimiento cuprífero es de baja ley o tiene menos de un 0,5% de cobre, situación en la que el proceso productivo tradicional de pirometalurgia deja de ser rentable, y se buscan nuevos procesos, más baratos y eficientes (CIMM, 2005). Junto a esto, el aumento de las exigencias en la normativa ambiental, ya sea mediante tratados internacionales o leyes nacionales, ha motivado la búsqueda de alternativas a la fundición, ya sea para cumplir las metas de emisión y/o porque es muy difícil controlar la fundición de minerales complejos, a modo de evitar la emisión de gases tóxicos. Por ello se ha escogido a la biolixiviación como respuesta, pues además de ser técnicamente viable, en ciertas tecnologías presenta ventajas económicas (Domic, 2001).

1.1 MARCO TEÓRICO

1.1.1 Minerales cupríferos

La complejidad de los procesos geológicos que ocurren en la corteza terrestre, hacen que la distribución de los elementos químicos sea heterogénea, generando su enriquecimiento o empobrecimiento. Estos fenómenos pueden originar la concentración selectiva de los elementos en determinadas zonas, con valores que superan la media respecto a la distribución normal de los elementos en la corteza. A estas zonas de concentración se les conoce como yacimientos de mineral.

El origen de los yacimientos de cobre de tipo porfídico, los más abundantes en Chile, se produce por el magma que asciende introduciéndose en las capas superiores de la corteza en forma de intrusivos. Este ascenso se relaciona con los diferentes fenómenos que han ocurrido en la corteza desde millones de años atrás, como el fluido de aguas termales y el movimiento de la placa oceánica (Nazca) bajo la placa continental (Sudamericana). De acuerdo a estos procesos, se forman dos tipos de material mineralizado para los yacimientos de cobre: los sulfuros y los óxidos (Jara, 2008).

En el yacimiento se produce un perfil de concentración de la especie metálica, debido a fenómenos de óxido-reducción. En las capas más profundas o zona primaria, los minerales llamados primarios pobres en contenido metálico, preservan las características de su formación original. Sobre esta zona, se produce el enriquecimiento de la especie metálica que da origen a la zona secundaria. En ello

influyen fenómenos o condiciones presentes en profundidad, como el ambiente reductor, la oxidación hidrotermal y la presión; así como fenómenos superficiales de meteorización y oxidación de yacimientos más expuestos a la acción de aguas y condiciones oxidantes de la superficie. Esto último forma soluciones ácidas de sulfato de cobre que al descender van lixiviando in-situ los minerales, transformándolos en minerales secundarios.

La capa superficial recibe el nombre de zona oxidada y por el lavado al que está expuesta, la especie metálica está menos concentrada que en la zona secundaria, pero más que en la primaria (Domic, 2001).

Los minerales asociados a las zonas descritas, se ejemplifican en la tabla 1.

Tabla 1. Principales especies minerales de cobre de importancia económica, agrupadas según su ubicación aproximada en el yacimiento.

Zona Mineralizada	Especie mineralógica	Composición química más frecuente	Cobre (%)
Zona oxidada	Cobre nativo	Cu°	100
	Malaquita	$\text{CuCO}_3 * \text{Cu}(\text{OH})_2$ ó $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$	57,5
	Azurita	$2\text{CuCO}_3 * \text{Cu}(\text{OH})_2$ ó $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$	55,3
	Chalcantita	$\text{CuSO}_4 * 5\text{H}_2\text{O}$	25,5
	Brochantita	$\text{CuSO}_4 * 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ ó $\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$	56,2
	Antlerita	$\text{CuSO}_4 * 2\text{Cu}(\text{OH})_2$ ó $\text{Cu}_3\text{SO}_4(\text{OH})_4$	53,7

	Atacamita	$3\text{CuO} \cdot \text{CuCl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ó $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$	59,5
	Crisocola	$\text{CuO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ó $\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	36,2
	Dioptasa	$\text{CuSiO}_2(\text{OH})_2$	40,3
	Neotocita	$(\text{Cu}_l - \text{Fe}_j - \text{Mn}_k)\text{SiO}_3$	Variable
	Cuprita	Cu_2O	88,8
	Tenorita	CuO	79,9
	Pitch/ Limonita	$(\text{Fe}_i - \text{Cu}_j)\text{O}_2$	Variable
	Delafosita	FeCuO_2	42
	Copper wad	CuMnO_2Fe	Variable
	Copper pitch	$\text{CuMn}_8\text{FeSiO}_2$	Variable
Zona de enriquecimiento secundario	Calcosina	Cu_2S	79,9
	Digenita	Cu_9S_5	78,1
	Djurleita	$\text{Cu}_{1,95-x}\text{S}$	Variable
	Covelina	CuS	66,5
	Cobre nativo	Cu°	100
Zona primaria	Calcopirita	CuFeS_2	34,6
	Bornita	Cu_5FeS_4	63,3
	Enargita	Cu_3AsS_4	48,4
	Tenantita	$\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$	51,6
	Tetrahedrita	$\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$	45,8

Fuente: Domic, 2001

Por lo tanto, el cobre se encuentra asociado mayoritariamente a minerales sulfurados, y en una menor parte a minerales oxidados. Para su extracción desde los minerales que lo contienen, es necesario que éstos pasen por un proceso productivo que busca disolver el mineral. La eficiencia de los procesos dependerá de la cinética o velocidad de disolución de los distintos minerales.

1.1.2 Cinética de reacción de los minerales

Para obtener cobre se debe disolver el mineral, la capacidad para lograrlo depende de la composición química del mineral, pues ésta determinará la velocidad de disolución. La especie mineral determinará la complejidad del solvente a utilizar y con ello su facilidad de disolución. De esta manera los minerales que requieren solventes simples, como el agua o soluciones diluidas de ácido, son de cinética rápida; y los minerales que necesitan un solvente más complejo para lograr su disolución, como soluciones concentradas de ácido, en ocasiones acompañadas por la adición de un agente oxidante y/o la necesidad de condiciones especiales (como una temperatura superior a la ambiental), son de cinética lenta. A medida que aumenta la cantidad de electrones que se deban transferir en la oxidación, mas tardará la disolución y con ello la cinética, en cuanto a la velocidad de disolución del mineral.

Las especies minerales de cobre a disolver, se clasifican en 5 grupos de acuerdo a su cinética relativa, los que se resumen en la tabla 2.

Tabla 2. Velocidad de disolución de las principales especies de cobre, expuestas a una solución diluida de ácido sulfúrico

Cinética relativa	Tiempo de referencia/ Grado de disolución	Especie minerales de cobre en esta categoría
Muy rápida (temperatura ambiente)	Segundos a minutos Disolución completa	Carbonatos (malaquita, azurita), sulfatos (chalcantita, brochantita, antlerita) y cloruros (atacamita)
Rápida (requiere mayor acidez)	Horas Disolución completa	Óxidos cúpricos (tionita) y silicatos (crisocola y dioptasa)
Moderada (requiere oxidante)	Días a semanas Disolución puede no ser completa	Cobre nativo, óxidos cuprosos (cuprita, delafosita) y algunos silicatos y óxidos complejos con magnesio (neotocita, copper wad, copper pitch)
Lenta (requiere oxidante)	Semanas a meses Disolución puede ser completa	Sulfuros simples (calcosina, digenita, djurleita, covelina)
Muy lenta (requiere oxidante)	Años Disolución incompleta	Sulfuros complejos (bornita, calcopirita, enargita, tetrahedrita)

Fuente: Domic, 2001

De manera general, se puede decir que los minerales oxidados tienen una cinética más rápida que los minerales reducidos o sulfurados. Debido a esta diferencia, los minerales oxidados necesitarán un solvente, condiciones, y por ende un proceso más

simple que los minerales sulfurados. Esto implica que ambos minerales requieren procesos productivos diferentes.

1.1.3 Proceso productivo del cobre

De acuerdo con las características químicas de los minerales de cobre, las empresas mineras desarrollan tecnologías y procesos diferenciados para la recuperación de cobre a partir de minerales oxidados y sulfurados. Sin embargo, entre ambos procesos productivos existen algunas etapas en común.

1.1.3.1 Minerales oxidados

Los minerales oxidados son explotados solo a rajo abierto por encontrarse en la superficie y luego son triturados en varias etapas de chancado -generalmente tres- con el objetivo de liberar la especie mineral de interés, en este caso el cobre, y lograr un tamaño uniforme de partícula de hasta ½ pulgada.

En la etapa de aglomeración una mezcla de agua y ácido sulfúrico se aplica al mineral que puede estar en una correa transportadora o en un tanque agitador, haciendo que los finos² se adhieran a los gruesos³, para evitar que las partículas de menor tamaño se dispersen y disminuyan la percolación, y con ello aumenten el tiempo de lixiviación y el consumo de reactivos. Entonces, con el fin de garantizar la máxima permeabilidad para los reactivos de lixiviación, es importante preparar el material mineralizado mediante la aglomeración.

² Partículas de granulometrías inferiores a 0,1- 0,15 mm.

³ Partículas de granulometría menor a 38 mm.

La lixiviación es un proceso de la hidrometalurgia⁴, en el cual se aplica al mineral una solución de ácido sulfúrico y agua, lo que cambia las condiciones de acidez y disuelve rápida y selectivamente el cobre, el cual se separa del mineral. La solución de lixiviación que contiene el cobre disuelto como sulfato de cobre o PLS –del inglés Pregnant Liquour Storage- es desarenada y conducida a una planta de extracción por solvente o SX –del inglés Solvent Extraction-.

La extracción por solvente permite la recuperación selectiva del cobre, su purificación y concentración, mediante la extracción de los iones de cobre por una fase orgánica. Esta fase la constituyen un extractante, generalmente oximas; un disolvente orgánico, comúnmente kerosene y un modificador que mejora el comportamiento del reactivo. Luego la fase orgánica es tratada con una solución ácida, donde los protones reemplazan los iones de cobre en la resina, dejando el cobre en la solución. De este proceso se obtiene una solución pobre en cobre llamada refino, que se recircula al proceso para ser lixiviado nuevamente y una solución ácida purificada y concentrada de cobre que va al proceso de electroobtención o EW –del inglés Electrowinning-.

Esta última etapa recupera el cobre mediante un proceso electrometalúrgico⁵ desde una solución electrolito concentrada, donde se utilizan cátodos de acero inoxidable y ánodos de plomo reutilizables, para producir cátodos de alta pureza de cobre, 99,99% (Vives, 2009).

⁴ Rama de la metalurgia extractiva, en la cual el elemento de interés es extraído desde una solución acuosa que lo contiene.

⁵ Rama de la metalurgia extractiva, en la que el metal de interés es extraído utilizando electricidad.

1.1.3.2 Minerales sulfurados

En el caso de minerales sulfurados se realiza explotación subterránea por la profundidad de los yacimientos y también a rajo abierto para los minerales que se encuentran más cercanos a la superficie. Al igual que para los minerales oxidados, se hacen varias etapas de chancado y además la etapa de molienda.

La etapa de molienda tiene como objetivo alcanzar el tamaño de liberación de partícula, en el que la especie de interés se encuentra libre sin asociaciones, ni oclusiones con la ganga⁶. Aquí se reduce el tamaño de las partículas de mineral hasta un máximo de 0,18 mm. El menor tamaño de mineral para los sulfurados se debe también a que las partículas deben ser livianas para el proceso de flotación y con ello consumen menos energía en la fundición.

La flotación es un proceso físico-químico que busca concentrar la especie de interés mediante la dosificación de reactivos. El proceso general busca separar el cobre de la ganga, por la adherencia de éste en forma de sulfuros simples y/o complejos, a burbujas de aire que emergen desde el fondo de una piscina de flotación. Los reactivos necesarios en este proceso son: colectores como los xantatos, que hacen que las partículas de interés se vuelvan hidrófobas y se adhieran a las burbujas de aire; espumantes como el aceite de pino, que dan resistencia a las burbujas para que no se rompan en el proceso; y los modificadores de pulpa que son de tres tipos, los reguladores de pH como cal o cianuro; los depresores como el cianuro de sodio, que permiten que la ganga sea hidrofílica y se mantenga en la pulpa; y los activadores

⁶ Mineral que forma la roca, no tiene valor económico y acompaña a los minerales metálicos de interés.

como el sulfato de cobre, que refuerzan la acción del colector. El concentrado de sulfuros adherido a las burbujas, que rebasan la piscina de flotación, es recuperado y secado antes de ser llevado a la fundición. El concentrado de sulfuros está conformado por sulfuros de hierro, de cobre y ganga (Vives, 2009).

La fundición es un proceso pirometalurgico⁷ que ocurre en 2 etapas, con una etapa previa de tostación parcial de concentrado, en la que se busca la oxidación parcial del azufre y su eliminación como dióxido de azufre. En la primera etapa llamada fusión, el horno a una temperatura de 1.200°C aproximadamente, se carga con concentrado y fundente⁸ (sílice o dióxido de silicio, SiO₂). La alta temperatura produce el cambio de estado del concentrado de sólido a líquido, permitiendo la separación de sus elementos constituyentes por efecto de la gravedad, así el cobre de mayor densidad que el hierro queda en la fase más pesada llamada mata y el hierro en la fase más liviana llamada escoria, por lo que las fases se pueden separar una de otra.

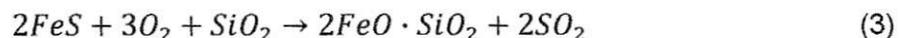
En el horno de fusión, se insufla aire enriquecido con oxígeno para provocar la oxidación del azufre de los sulfuros del concentrado (sulfuro cuproso y ferroso) a dióxido de azufre.

El sulfuro ferroso al reaccionar con oxígeno forma óxido ferroso (1), óxido ferroso diférrico o magnetita (2) y además con la sílice agregada se acompleja el hierro (3). Estos compuestos junto a otros óxidos metálicos, de metales traza como aluminio, magnesio, etc., constituyen la escoria, la que también puede arrastrar partículas con

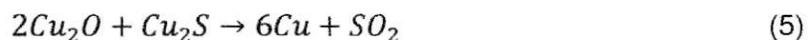
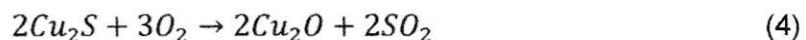
⁷ Rama de la metalurgia extractiva, en que la obtención y refinación de los metales se produce utilizando calor.

⁸ Disminuye el punto de fusión del mineral

cierto contenido de cobre que no hayan alcanzado a reaccionar, por lo que es reprocesada en un horno de limpieza. Las ecuaciones de formación de los constituyentes de la escoria son las siguientes:



En la segunda etapa se sigue inyectando oxígeno para continuar procesando la mata. Una vez que el azufre asociado a hierro se oxida, se comienzan a oxidar los sulfuros de cobre formando óxidos de cobre y dióxido de azufre (4). Los sulfuros y los óxidos de cobre reaccionan entre sí y forman cobre blíster⁹ y dióxido de azufre (5) (CODELCO, 2000).



La reacción total de la segunda etapa es:



La mayor parte los gases de fundición son abatidos, específicamente el dióxido de azufre es captado por las chimeneas para producir ácido sulfúrico, con el objetivo de cumplir las normas de emisión vigentes (Ver sección 3.4.1).

El cobre blíster y otros compuestos que no se alcanzan a oxidar son reprocesados en otros hornos. El producto es cobre RAF o refinado a fuego, el que se moldea con forma

⁹ Cobre producido a partir de la fusión de la mata o eje en los hornos convertidores con una pureza de 99,5%.

de ánodos, que son refinados o purificados por un proceso de electrorrefinación en el que se aplica corriente eléctrica. Se utilizan ánodos de cobre que son consumidos en la reacción, por lo que deben ser repuestos constantemente y cátodos de cobre puro reutilizables, sobre los que se forman los nuevos cátodos de alta pureza.

Los procesos productivos de ambos minerales, se resumen en la Figura 1.

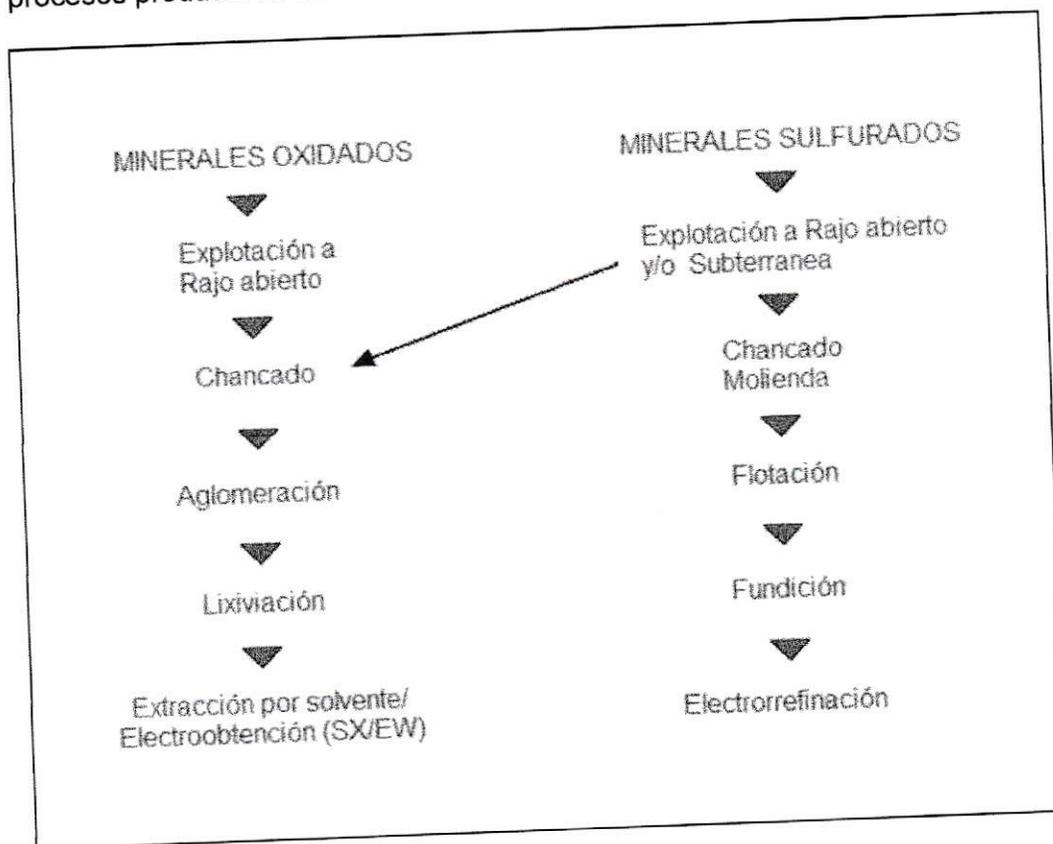


Figura 1. Proceso productivo según el tipo de mineral (Fuente: Elaboración propia)

En la actualidad, la hidrometalurgia es aplicada a ambos minerales, el inconveniente es que para los minerales sulfurados la cinética de disolución es mucho más lenta que la de los minerales oxidados. Por lo tanto, no basta sólo una solución ácida para lograr su disolución, por fuerte que ésta sea, sino que también se requiere un catalizador de la

reacción, rol que asumen las bacterias al aplicar la biotecnología para la extracción del cobre, en un proceso llamado biolixiviación.

1.1.4 Biotecnología en el proceso productivo del cobre

El Convenio sobre la Diversidad Biológica de las Naciones Unidas define biotecnología como “toda aplicación tecnológica que utilice sistemas biológicos y organismos vivos o sus derivados para la creación o modificación de productos o procesos, para usos específicos” (CNDBT, 2003a). La Biotecnología presenta la ventaja de ser una tecnología específica que permite elegir el campo de aplicación más apropiado a las necesidades y requerimientos del país y a la vez, que le ofrezca mayores ventajas competitivas en el mercado internacional. Así en el sector minero, la aplicación biotecnológica de utilidad más inmediata, es el trabajo con bacterias que participan en la biolixiviación de minerales con contenido de cobre (CNDBT, 2003b).

La rama de la biotecnología que busca el estudio y la aplicación del potencial económico, de las interacciones entre el mundo microbiano y el reino mineral, se llama biohidrometalurgia, un subcampo de la hidrometalurgia. La palabra biohidrometalurgia significa: bio porque usa microorganismos como bacterias y arqueas, hidro por llevarse a cabo en medio acuoso y metalurgia que es la ciencia que se ocupa de la producción de metales y el tratamiento de materiales y soluciones que contengan metales.

Esta disciplina se preocupa de dos temas como son la recuperación de metales por biolixiviación y la neutralización y/o purificación de aguas provenientes de los procesos

mineros por medio de tecnologías de bioremediación. El objeto de este estudio es el campo de la recuperación de metales, por ello solo será analizada la tecnología de biolixiviación.

1.2 Microorganismos involucrados en sistemas de biolixiviación

1.2.1 Características generales de los microorganismos utilizados

Los microorganismos que intervienen en los procesos de lixiviación son generalmente autótrofos, aeróbicos y quimiosintéticos. La capacidad autótrofa les permite sintetizar las sustancias esenciales para su metabolismo a partir de compuestos inorgánicos, como la fijación del CO_2 de la atmósfera. Se alimentan de los minerales de los que obtienen energía y realizan esta tarea como parte de sus procesos metabólicos, de esta manera no necesitan de otros seres vivos para su nutrición.

Además son quimiosintéticos, vale decir que son capaces de obtener la energía necesaria para su metabolismo, a partir de reacciones de oxidación de compuestos inorgánicos reducidos, por lo que también se les llama quimioautótrofos o quimiolitótrofos. Mediante la oxidación de minerales producen el ión férrico y ácido sulfúrico, necesarios para las reacciones de biolixiviación. El ión férrico, es un agente fuertemente oxidante, que permite oxidar los minerales de sulfuro de cobre a sulfato de cobre que es soluble. Los microorganismos capaces de oxidar tanto los sulfuros como los iones ferrosos son denominados sulfo y ferro-oxidantes.

Estos microorganismos, también se caracterizan por ser extremófilos, es decir que viven en condiciones extremas, en este caso: pH ácido y altas concentraciones de metales, que son las normales de los minerales.

1.2.2 Diversidad de microorganismos en sistemas de biolixiviación

El estudio en laboratorios de microorganismos asociados a ambientes de lixiviación, permitió la identificación de las primeras especies bacterianas nombradas como *Thiobacillus ferrooxidans* en 1947 por Colmer y Hinkle y *Thiobacillus thiooxidans* en 1922 por Waksman y Joffe (ITGE, 1991). El género *Thiobacillus* se reclasificó hace algunos años y actualmente se conoce como *Acidithiobacillus*, el cual indica: Acidi de acidófilo, que crece en pH ácido; thio, que oxida compuestos de azufre; bacillus, tiene forma de bastón.

En los ambientes naturales asociados a la minería, no sólo se encuentran bacterias quimiolitotróficas, sino también bacterias heterotróficas, arqueas, hongos, algas y protozoarios, todos ellos viviendo en una asociación simbiótica, de mutua cooperación (Ramírez, 2002). La mayoría no participa de manera directa en la oxidación de minerales y no por ello son menos importantes ya que favorecen la acción de los microorganismos que sí actúan directamente como las bacterias y arqueas, al suministrarles nutrientes o disminuyendo concentraciones de inhibidores para su funcionamiento.

Las arqueas al igual que las bacterias son organismos procariontes y unicelulares pero con diferencias tan fundamentales a nivel molecular, que son clasificadas en grupos distintos. Cabe mencionar, que las arqueas del orden *Sulfolobus* son las únicas que oxidan compuestos de azufre (Ramírez, 2002). Sin perjuicio de lo anterior, los microorganismos predominantes y más estudiados son las bacterias, cuya población se encuentra fuertemente influenciada por la temperatura a la que están expuestas, así como por los nutrientes presentes.

La mayoría de los sistemas industriales trabaja a temperatura ambiente, en esta situación es posible encontrar bacterias de las especies *Acidithiobacillus ferrooxidans* (*A.f*), *Acidithiobacillus thiooxidans* (*A.t*) y *Leptobacillus ferrooxidans* (*L.f*), que son las usualmente encontradas en los ambientes mineros. La especie *A.f*, ha sido la bacteria mas estudiada para biolixiviación por su versatilidad al oxidar compuestos sulfurados y el hierro, por lo cual existe mayor información. La nomenclatura thiooxidans, indica que solo oxida compuestos reducidos de azufre; mientras que ferrooxidans, indica oxidante de hierro (CIMM, 2005). Sin embargo existen otras especies de bacterias y arqueas involucradas en la biolixiviación, las que han sido identificadas y clasificadas taxonómicamente en el esquema de la Figura 2, representadas con letra cursiva.

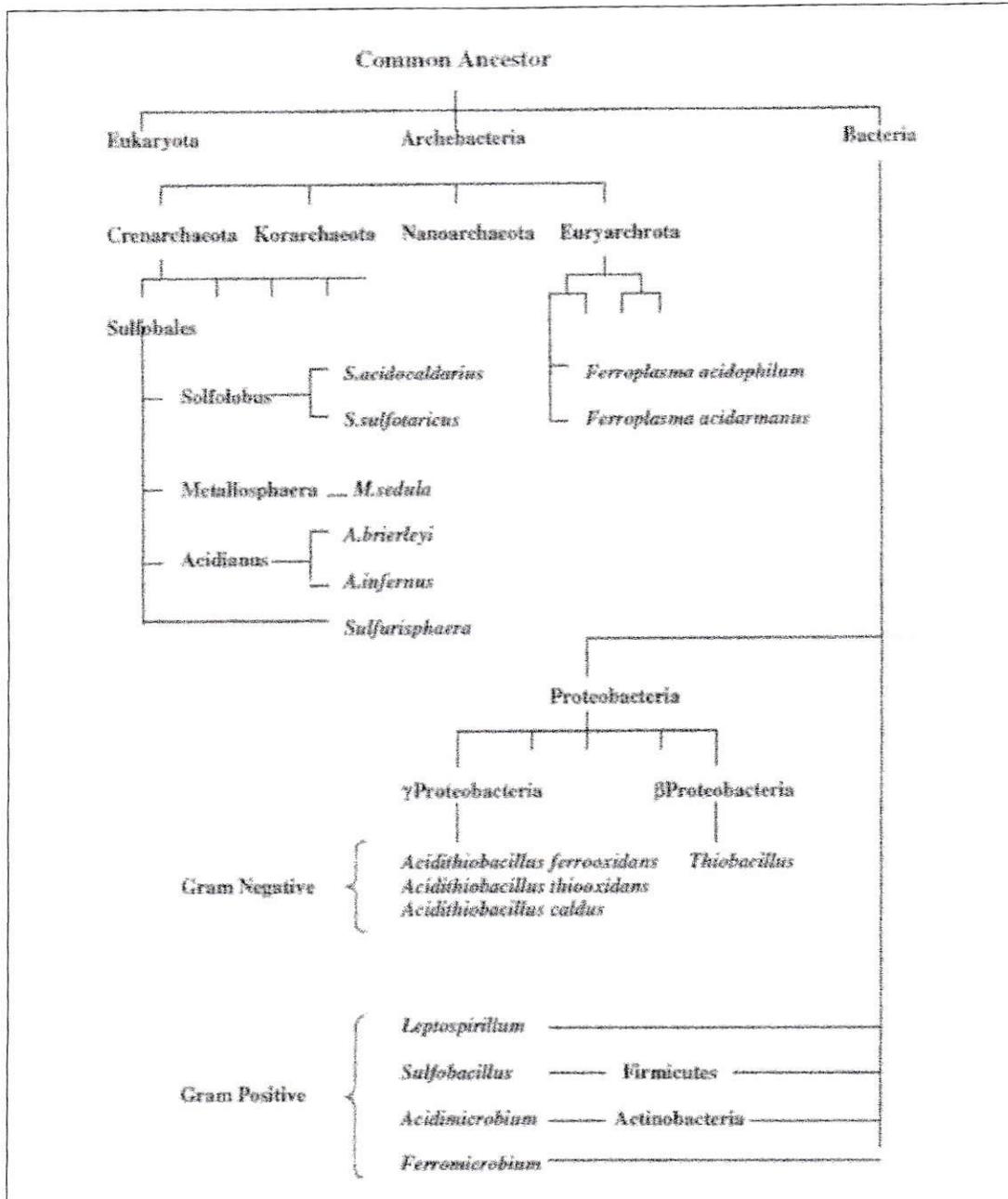


Figura 2. Microorganismos identificados involucrados en la biolixiviación (Pradhan y col, 2008).

La presencia de determinadas especies de bacterias dependerá del mineral biolixiviado, por lo que las condiciones óptimas de operación podrían no ser

exactamente las mismas para todos los recursos mineros, para ello es importante conocer su composición mineralógica. (Vásquez, 1997)

Cada especie de bacteria tiene distintos requerimientos de nutrientes como fuentes energéticas. Por ejemplo, en un medio con ión ferroso es común encontrar *A.f* y en su ausencia, predominan la *A.t* y la *L.f*. Por lo tanto, en la biolixiviación de un mineral, una mezcla de bacterias podría resultar más beneficiosa que una especie pura. Así, los compuestos que no son oxidados por una especie, pueden ser oxidados por otra, evitando una acumulación que podría resultar tóxica.

1.2.3 Cultivo de microorganismos

El remanente de la explotación del mineral de mayor ley y los relaves de flotación quedan cerca de los yacimientos, expuestos a las condiciones ambientales, lo que crea un ambiente propicio para el desarrollo de microorganismos. De los drenajes ácidos que se generan naturalmente, se puede aislar microorganismos para su cultivo¹⁰ en laboratorio, ya sea una especie en particular o una comunidad.

Existe consenso en que los métodos que utilizan cultivos son inadecuados para estudiar la composición microbiana de una comunidad, pues sólo permiten observar una pequeña fracción de los microorganismos que crecen en el sistema natural. El cambio de medio distinto al original, hace que los cultivos sean selectivos y con ello se subestime el número y variedad de microorganismos de una muestra (Vásquez, 1997).

¹⁰ Un cultivo es un conjunto de microorganismos a los que se les ha hecho crecer deliberadamente en un determinado medio y a escala de laboratorio (ITGE, 1991).

Para estudiar los microorganismos presentes en el medio natural, últimamente se ha optado por el análisis de ADN extraído directamente del sistema, lo que es independiente de la facultad del microorganismo para crecer en un medio de cultivo (Vásquez, 1997). Esta tarea se ve facilitada por la existencia y disponibilidad del secuenciamiento del código genético de las especies bacterianas lixiviantes en internet.

1.3 Mecanismos de Biolixiviación

Durante mucho tiempo se reconoció la existencia de dos hipótesis sobre el mecanismo utilizado por la bacteria para disolver los minerales, y en torno a ellas, se generó un debate por definir la importancia de un mecanismo sobre el otro y el rol jugado por los microorganismos en cada uno. Los mecanismos discutidos recibían el nombre de mecanismo directo e indirecto.

Con el fin de resolver este debate, durante los últimos años se han realizado diversos estudios (Sand & Gehrke, 2006; Crundwell, 2003; Boon, 2001) que argumentan y consideran mejor el mecanismo indirecto por sobre el directo e incluso rechazan este último. Algunas de las razones se discuten a continuación, pero primero es necesario saber qué se entendía por mecanismo directo.

Las distintas definiciones del mecanismo directo concuerdan en que la membrana bacteriana interactúa directamente con el sulfuro para disolverlo, usando un

mecanismo enzimático. Por lo tanto la condición indiscutible para que existiera el mecanismo directo, era la adherencia de la bacteria al mineral. El problema para establecer tal adherencia, se relacionaba con la dificultad de hacer observaciones a escala molecular en un sistema de biolixiviación. No es hasta hace poco que los avances en esta área han permitido tener más éxito en las observaciones microscópicas. Gracias a ellas, se ha descartado la adherencia directa bacteria-mineral para dar paso a una nueva hipótesis de adherencia mediada por una biocapa. (Ballester, 2005)

Respecto a la acción de agentes enzimáticos, el modelo integral de biolixiviación propuesto por Sand y su grupo de trabajo, demostró que los únicos agentes que disuelven sulfuros son los protones y el ión férrico. Además, la catálisis del proceso es atribuida al aumento en la concentración de estos agentes lixiviantes producto de la acción bacteriana, y no a la presencia de enzimas u otras sustancias biológicas, cuya aparición no es contemplada en este modelo, ya que hasta la fecha no habían sido detectadas (Sand y col, 2001).

De acuerdo a estos argumentos, ahora es generalmente aceptado que el mecanismo directo no existe y se ha descartado la lixiviación por acción enzimática de la bacteria. Ahora se acepta que la lixiviación se produce en la interface bacteria-mineral por agentes lixiviantes como los iones férricos y los protones, mediante el mecanismo indirecto.

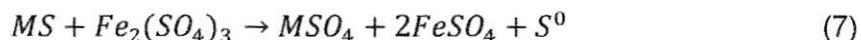
Existen 2 sub-mecanismos indirectos, el mecanismo de contacto y el de no contacto (Sand & Gehrke, 2006). También se acepta un tercer mecanismo de lixiviación

cooperativa propuesto por Tributsch, en el que participan los dos sub-mecanismos recién nombrados.

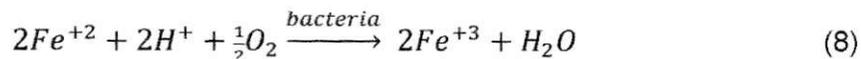
1.3.1 Mecanismo de contacto

Según los estudios de Sand, un factor determinante para que ocurra este mecanismo es la formación de una capa fina de sustancias poliméricas extracelulares¹¹ (SPE) alrededor de la bacteria, pues en ella ocurrirían las reacciones de solubilización del mineral. En esta capa, el ion férrico producido biológicamente, se encuentra acomplejado y provoca una adherencia inicial a la superficie del mineral cargado negativamente, a través de una interacción electrónica. Esto implica que las bacterias sin biopelícula no atacan y menos oxidan al mineral (Sand y col, 2001).

La adherencia electrónica inicial de la bacteria al mineral, ocurre para iniciar la oxidación química del sulfuro metálico por el ataque del ión férrico, de acuerdo a la siguiente ecuación general:



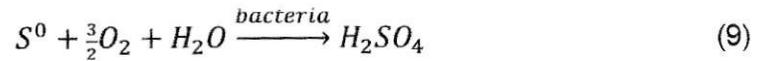
Para que el ataque al mineral siga ocurriendo es necesario la regeneración del agente oxidante, tarea realizada por las bacterias y los protones:



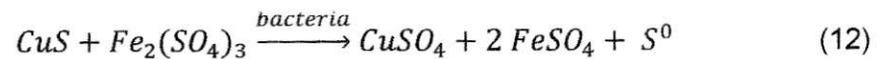
De esta manera la concentración del ion férrico en solución aumenta y se favorece el ataque químico al mineral.

¹¹ Exopolímeros que permiten la formación de biopelículas, las que están conformadas principalmente por lipopolisacáridos.

El azufre elemental es otro producto de la disolución del mineral, el que también es oxidado por bacterias para regenerar el ácido sulfúrico:



La producción de ácido mantiene las condiciones ambientales ideales para las bacterias, además de acelerar la lixiviación. Los ejemplos de mecanismo indirecto para calcopirita, calcosina y covelina son:



El mecanismo de contacto puede ser representado por el siguiente esquema.

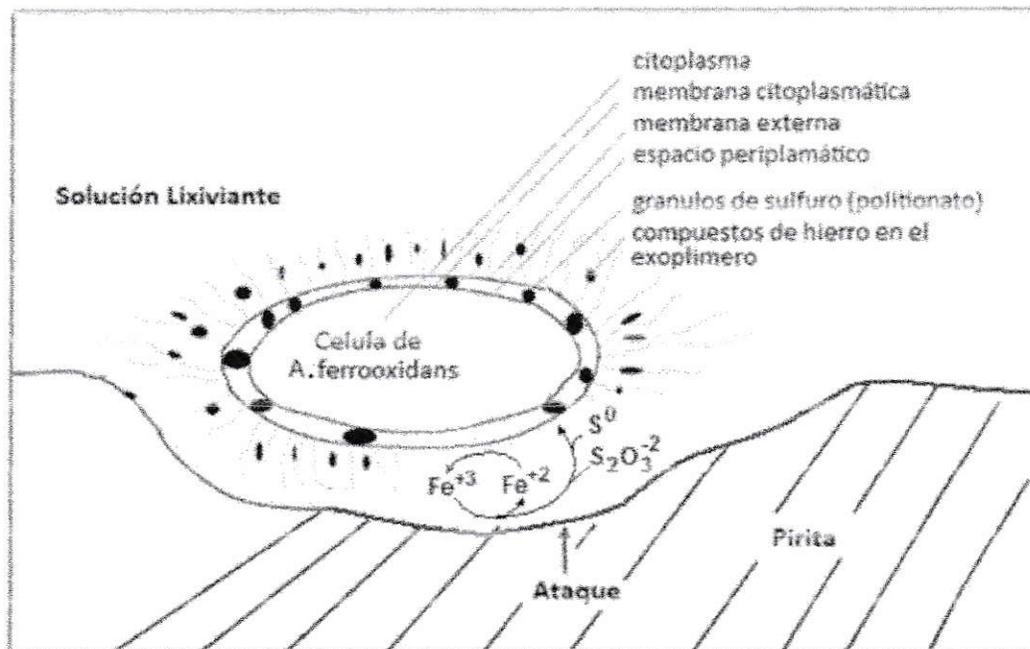


Figura 3. Un modelo para el mecanismo de contacto que muestra la lixiviación indirecta de pirita, catalizada por una célula de *A. ferrooxidans* adherida al mineral (Sand & Gehrke, 2006).

1.3.2 Mecanismo de no contacto

La solubilización de metales se lleva a cabo por la interacción del mineral con productos metabólicos de las bacterias libres en el medio lixivante, tal como los iones férricos y los protones (Ballester, 2005). A diferencia del mecanismo de contacto, aquí no se necesita la adherencia de la bacteria para lixiviar.

De acuerdo a los intermediarios formados en la solubilización de sulfuros, Sand estableció dos submecanismos, donde la ocurrencia de uno u otro depende del mineral a lixiviar. Para ello, el autor clasificó los minerales en dos grupos según su estructura electrónica, cristalina y su capacidad de disolución en ácido.

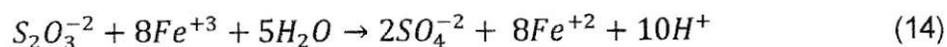
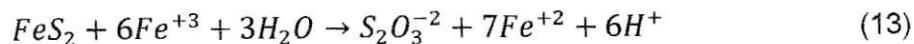
La obtención de metales se logra por la disolución de minerales mediante la extracción de electrones desde las bandas de valencia (bandas electrónicas de mayor nivel energético). Existen minerales con bandas de valencia formada por enlace metal-metal (disulfuros) y metal-sulfuro, cuya disolución conducen a la formación de diferentes intermediarios, que dan el nombre a los siguientes mecanismos (Sand y col, 2001).

1.3.2.1 Mecanismo del tiosulfato

Los disulfuros no son solubles en ácido solamente, necesitan de un agente oxidante capaz de romper previamente los enlaces metal-metal, para entonces poder disolver el mineral mediante el ataque al enlace metal-azufre, este agente es el ion férrico.

Producto del ataque al enlace metal-metal, en la estructura cristalina de minerales disulfuro como pirita (FeS_2), molibdenita (MoS_2) y volframita (WS_2), se produce como

intermediario de reacción el tiosulfato, mediante las siguientes reacciones (Sand & Schippers, 1999).

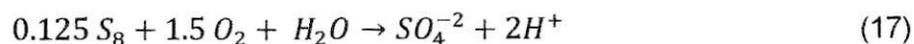
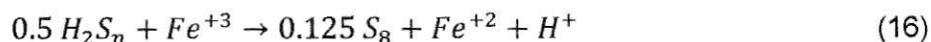
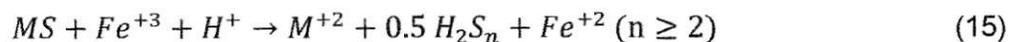


El intermediario de oxidación tiosulfato ($S_2O_3^{-2}$), luego es oxidado vía tetratiónato y otros politionatos, hasta sulfato como producto final. Para que ocurra este mecanismo es indispensable la presencia de bacterias hierro-oxidantes, para regenerar el ion férrico como se vio en la ecuación 4.

El aporte de este mecanismo a la disolución de minerales cupríferos, es la formación de ácido sulfúrico y en el caso específico de la pirita, mineral muy común en los yacimientos nacionales, esta además aporta con ion ferroso.

1.3.2.2 Mecanismo del polisulfuro

Los sulfuros solubles en ácido, es decir que pueden ser oxidados por protones además de ión férrico, son minerales como covelina (CuS), esfalerita (ZnS), galena (PbS), calcopirita (CuFeS₂). La ruptura del enlace metal-sulfuro se produce por la transferencia de electrones desde el sulfuro a los agentes oxidantes, produciendo como intermediarios el polisulfuro (Sand & Schippers, 1999).



Vía radicales, el polisulfuro genera como producto anillos octaméricos de azufre elemental (S_8), el que posteriormente puede ser oxidado por bacterias sulfo-oxidantes a sulfato.

Un esquema para representar el modelo de no contacto, mediante los mecanismos del tiosulfato y polisulfuro se presenta a continuación.

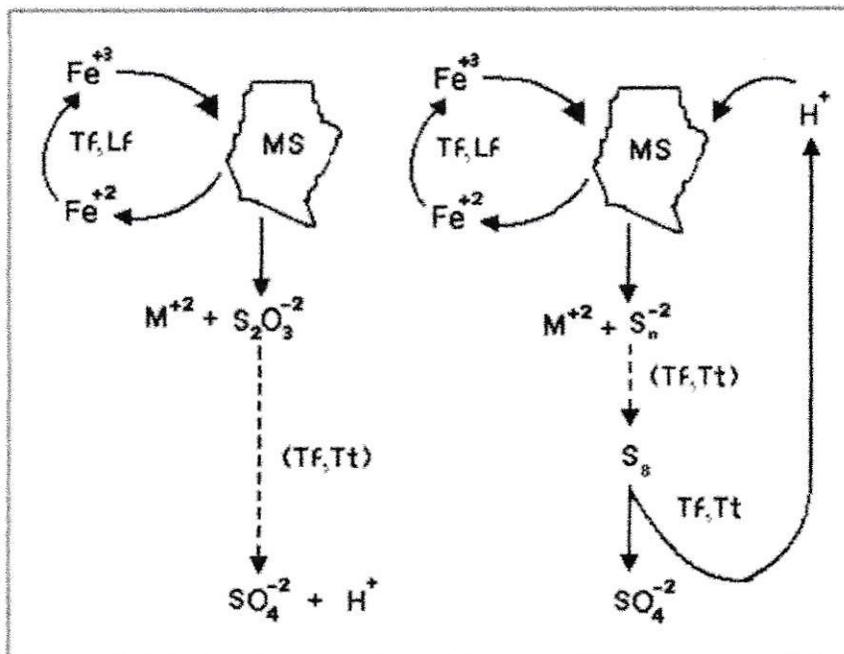


Figura 4. Esquema de los mecanismos de tiosulfato y polisulfuro respectivamente. MS = metal sulfuro; M^{+2} = ión metálico; $S_2O_3^{-2}$ = tiosulfato; S_n^{-2} = polisulfuro con largo (n) de cadena; S_8 = sulfuro elemental; Tf, Lf, Tt = reacciones mediadas por *T. ferrooxidans*, *L. ferrooxidans*, y/o *T. thiooxidans*; (Tf, Tt) = posible reacción enzimática (Sand & Schippers, 1999).

1.3.3 Mecanismo de Cooperación

La disolución de minerales se lleva a cabo por la cooperación del mecanismo de contacto y el de no contacto – o indirecto, como lo nombra el autor-. Mientras las bacterias se encuentran adheridas a la superficie por las SPE, liberan especies químicas energéticas que son aprovechadas por las bacterias suspendidas en el medio lixivante (Tributsh, 2001).

Esta situación en que existen bacterias cercanas a la superficie y otras en el medio, se genera por la saturación de la superficie del mineral mediante las etapas de adherencia a éste. En un primer momento existe una alta adherencia de bacterias a la superficie, la que luego se satura, aumentando la cantidad de bacterias libre en el medio. Estas aprovechan el hierro ferroso producto de la lixiviación por contacto, aumentando la concentración de ion férrico en el medio, favoreciendo las condiciones lixiviantes. Finalmente, se establece la cooperación entre bacterias cercanas y no a la superficie, y con ello sus cantidades relativas tienden a la igualdad (Ballester, 2005).

Según Tributsh todos los tipos de lixiviación que ocurren en un sulfuro metálico se representan mediante el siguiente esquema.

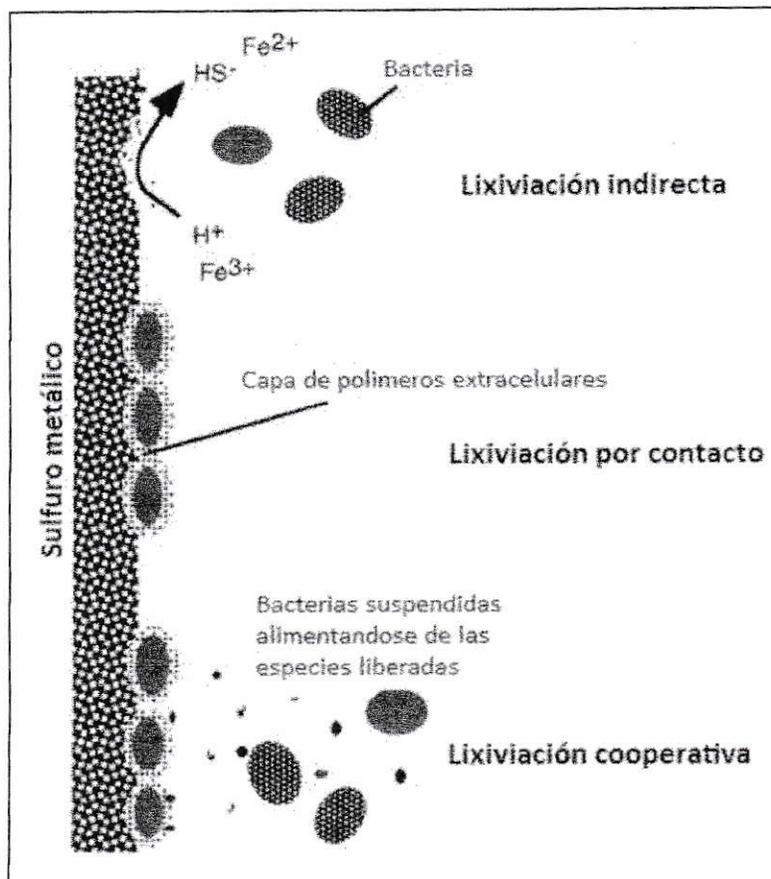


Figura 5. Esquema que muestra la lixiviación indirecta –no contacto-, la lixiviación por contacto y la lixiviación cooperativa de un mineral sulfuro (Tributsh, 2001).

1.4 Factores que afectan el desarrollo bacteriano.

El papel que juegan los factores ambientales, biológicos y fisicoquímicos, sobre el crecimiento y desarrollo de las bacterias es fundamental en el rendimiento de la extracción de metales por biolixiviación. El control de estos factores es muy importante para asegurar las condiciones óptimas en el proceso, las cuales pueden variar de especie a especie. Como en los sistemas de biolixiviación actúa una mezcla de

microorganismos, a continuación se establecen los factores comunes a todos ellos. Los factores que influyen en la respuesta de los microorganismos encargados de la biolixiviación según Pradhan y el ITGE son:

- pH: Son bacterias acidófilas, es decir crecen en medios ácidos, siendo incapaces de desarrollarse a un pH mayor de 3.0. El pH define qué especies de bacterias se desarrollarán en el medio.
- Oxígeno y dióxido de carbono: Como la mayoría de las bacterias lixiviantes en la naturaleza son aeróbicas, necesitan un ambiente con oxígeno para sobrevivir. El aire, aporta el oxígeno (O_2) y dióxido de carbono (CO_2) necesarios para la lixiviación, por lo que es importante asegurar la aireación independiente de la técnica utilizada. El oxígeno es utilizado como agente oxidante por los microorganismos en ambientes de lixiviación. El dióxido de carbono es utilizado como fuente de carbono para la síntesis de nutrientes como proteínas, lípidos y carbohidratos.
- Nutrientes: Como todos los seres vivos, estos microorganismos también requieren de fuentes nutricionales para su óptimo desarrollo, que pueden obtener del mismo mineral, como amonio, fosfato, azufre, iones metálicos como el magnesio, etc. El magnesio, es necesario para la fijación de dióxido de carbono y el fósforo es requerido para el metabolismo energético.

- Fuente de Energía: Los microorganismos utilizan como fuente primaria de energía el ion ferroso y el azufre inorgánico. En la lixiviación de mineral el ión ferroso (Fe^{+2}) es producido biológicamente, por ello no es necesario añadirlo.
- Temperatura: Los microorganismos se clasifican según el rango de temperatura en el cual pueden sobrevivir. Así las mesófilas sobreviven en un rango óptimo de 30-40°C, las moderadamente termófilas a una temperatura cercana a los 50°C, y las extremadamente termófilas sobre los 65°C. Si la temperatura del medio en que se encuentren los microorganismos es menor a 5°C, se vuelven inactivos volviendo a cumplir su función si aumenta la temperatura, pero si la temperatura del medio sobrepasa el óptimo, los microorganismos se mueren.

Es importante considerar que la reacción de oxidación de los minerales sulfurados es exotérmica, es decir libera calor al medio lo que produce el aumento de la temperatura. El control de la temperatura será posible, en la medida que el diseño de la técnica de biolixiviación ocupada, así lo permita.

- Presencia de Inhibidores: Durante el proceso de biolixiviación, se van acumulando en la solución de lixiviación, metales pesados que componen los distintos minerales, elementos como el zinc, arsénico y hierro, los que en ciertas concentraciones resultan tóxicos para los microorganismos. También los compuestos orgánicos se pueden comportar como inhibidores de la acción bacteriana, al adsorberse en la interface mineral - solución. La presencia de estos compuestos existe cuando se lixivia un concentrado proveniente de la flotación.

Las concentraciones tóxicas o elevadas, se pueden disminuir al diluir la solución lixivante.

- **Potencial redox (Eh):** Como las bacterias están involucradas en la catálisis de la oxidación de especies de azufre reducido, la medida del potencial redox es un indicador de la actividad microbiana, y por ello mientras mayor sea el potencial medido, mayor será esta actividad. El potencial óptimo es de 600 a 800 mV.
- **Tamaño de partícula:** El tamaño de partícula y área superficial son sinónimos de concentración de sustrato a oxidar. A menor tamaño de partícula de mineral, mayor es el área superficial expuesta en donde está el sólido disponible y puede actuar el microorganismo. Así se logra una mayor efectividad en la lixiviación, comparado con una partícula de mayor tamaño, en la que el material interno que no está expuesto es mayor y solo reaccionará una vez que el externo se haya disuelto.
- **Formación de compuestos insolubles:** La alta concentración de ion férrico, sulfatos y/o hidróxidos en solución, junto a un aumento del pH provocan la precipitación de estos iones en forma de jarositas (un sulfato de potasio y hierro hidratado, $KFe_3^{3+}(SO_4)_2(OH)_6$) sobre la superficie mineral, lo que impide la acción de los agentes oxidantes sobre una superficie que debiera estar expuesta. Además disminuye la disponibilidad de ion férrico para la lixiviación por no contacto. En la lixiviación de calcopirita se forma una capa de pasivación, formada por jarositas e intermediarios de sulfuro de cobre menos reactivos que

este mineral -mineral refractario¹²-, lo que limita la difusión del agente lixivante al sólido. Este es el principal problema en la lixiviación de calcopirita, sin embargo, se resuelve aumentando la temperatura del proceso para disolver la capa.

1.5 Técnicas de Biolixiviación

Las diferencias entre las técnicas de biolixiviación dependen del lugar de aplicación, la metodología ocupada, la ley de cobre y el tamaño de partícula del mineral, principalmente.

Una categorización amplia según C.L. Brierley (2008), es la separación de las técnicas según el método en que se basan para hacer la lixiviación, como los procesos de lixiviación basados en el riego y los basados en la agitación.

1.5.1 Procesos basados en el riego

1.5.1.1 Biolixiviación en pilas

Esta técnica permite procesar material recién extraído de la mina –run of mine, ROM- y mineral chancado, minerales de ley intermedia, sulfuros secundarios y primarios, en grandes volúmenes (del orden de toneladas). La extracción de cobre desde minerales

¹² Son los minerales que forman una capa pasiva sólida de sulfuros en la superficie del mineral, limitando el contacto con reactivos y la difusión.

secundarios como la calcocita (Cu_2S) y la covelina (CuS) por biolixiviación en pila, es ampliamente practicada en todo el mundo.

Generalmente las pilas se construyen con material previamente chancado, de 19 mm o menos, que es llevado por correas transportadoras al área o patio de acopio, lugar donde se forma la pila. En el trayecto el mineral es curado, irrigado con una solución de ácido sulfúrico concentrado o puede ser previamente aglomerado en tambores rotativos con agua acidificada para acondicionar el mineral a los microorganismos y también para fijar las partículas finas a las partículas más grandes de mineral.

Luego el mineral se apila en las áreas o canchas de acopio que están especialmente diseñadas. Los patios son revestidos con polietileno de alta densidad (HDPE) y se instala un sistema de drenaje con tuberías de plástico perforadas, que permiten capturar la solución lixiviada desde la base. También se instala una red de líneas de aire de plástico perforado, mediante la cual el aire es forzado por ventiladores externos a la pila, lo que asegura la disponibilidad de aire a los microorganismos.

Una vez preparada la base, el mineral se apila ordenadamente con apiladores automatizados formando un terraplén o pila de 6-8 m de altura. Las pilas pueden ser dinámicas, si después de la lixiviación el mineral se remueve para enviarlo al botadero y la base de la pila se reutiliza; o permanentes, si las nuevas pilas se cargan sobre las anteriores. El sistema de pilas permanentes permite no trasladar el material ya lixiviado a un botadero final, ya que el área de lixiviación se convierte en botadero al terminar los ciclos de riego.

Sobre la pila se instala un sistema de riego por goteo o aspersores los que riegan la pila con una solución de ácido sulfúrico, agua y microorganismos. Los microorganismos crecen naturalmente en la pila pero a objeto de mejorar el rendimiento de la operación, es que en una etapa previa de laboratorio se aíslan los microorganismos más adecuados a las condiciones existentes en la pila y se hacen crecer para luego introducirlos en el mineral o inocular¹³, sembrándolos mediante aspersores.

La solución ácida que se infiltra a través de la pila va disolviendo el cobre contenido en los minerales sulfurados, formando una solución de sulfato de cobre (CuSO_4) que es recogida por el sistema de drenaje, y llevada fuera del sector de las pilas en canaletas impermeabilizadas hasta la planta de extracción por solvente. Aquí se recupera el cobre de la solución para luego formar los cátodos en la etapa de electroobtención, mientras que el ácido es refinado y recirculado para el riego de las pilas.

Se estima que para lograr un máximo de recuperación de cobre de 80-90% se requieren de 250-350 días de biolixiviación. Las principales ventajas de la biolixiviación en pila son el bajo capital y costos de operación, la ausencia de emisiones tóxicas y la minimización o la completa eliminación de cualquier descarga de agua porque se reciclan todas las soluciones (Pradhan y col, 2008).

¹³ Implica transferir microorganismos desde un medio óptimo de cultivo a un medio natural.

1.5.1.2 Biolixiviación en botaderos

Con esta técnica se procesa lastre¹⁴, mineral ROM, minerales de baja ley de cobre (menor a 0,5 %), ya sean sulfuros secundarios y/o primarios. Como el contenido de cobre en estos minerales es tan bajo como para cubrir los costos de la flotación y fundición, los grandes fragmentos de mineral son arrojados a los botaderos. Los volúmenes de mineral en botaderos, pueden superar los de las pilas.

En la superficie del botadero se aplica una solución de ácido sulfúrico y agua, la que lixivía y es capturada en la base impermeabilizada. Los microorganismos crecen naturalmente dado que se dan las condiciones óptimas para su crecimiento.

Debido al gran tamaño de las partículas de mineral, el área de contacto entre microorganismo-mineral disminuye, y sumado a una baja aireación, pues no se instalan líneas de aire, la acción microbiana disminuye afectando la eficiencia del proceso. Es por ello que la biolixiviación de cobre en los botaderos se mide en décadas, debido a la baja tecnología aquí aplicada. Sin embargo, por esto último es un método muy económico.

Los minerales son lixiviados donde fueron colocados para su eliminación, y desde la base, la solución de lixiviación es dirigida a los procesos de extracción con solvente y electroobtención para la posterior producción de cátodos de cobre. Al igual que la biolixiviación en pilas, el ácido también es refinado y recirculado a la parte superior del botadero.

¹⁴ Lastre o estéril, mineral que se extrae junto al mineral de mayor ley, pero que no es económicamente rentable para ser procesado, por estar bajo la ley de corte.

1.5.1.3 Biolixiviación in situ

La biolixiviación in situ, trata el mineral en la mina, previa fractura de ésta por tronadura, permitiendo a la solución fluir libremente. El volumen del mineral de interés es variable, pues depende del tamaño del yacimiento.

Este método se aplica a minas abandonadas y minas subterráneas, donde los depósitos de mineral no pueden ser extraídos por los métodos convencionales, por ser minerales de baja ley o de pequeños depósitos o ambos. Por ello, no es rentable su extracción, lo que hace que su aplicación sea mínima, además de las implicancias ambientales que conlleva la utilización de soluciones ácidas en un área de suelo no impermeabilizado.

1.5.2 Procesos basados en la agitación

1.5.2.1 Biolixiviación en tanques agitados

Las partículas necesarias para esta técnica deben tener el menor tamaño posible, pues deben estar en suspensión en la solución lixivante del tanque. Esto demanda el tratamiento de los minerales ROM por chancado y molienda, lo que hace a esta técnica rentable sólo para minerales de ley intermedia a alta y para concentrados de mineral (actualmente se aplica a calcopirita), en cantidades moderadas debido a la inversión necesaria en equipos y costos de operación (Acevedo, 2000). El volumen de mineral a tratar, queda limitado por el tamaño del reactor, por lo que es conveniente utilizar un arreglo de reactores.

Los minerales son depositados en un tanque de acero inoxidable de gran tamaño, equipado con agitadores mecanizados y con la introducción de aire por ventiladores, lo que asegura la disponibilidad de oxígeno y dióxido de carbono para los microorganismos. Es necesario inocular estos reactores con los microorganismos para lograr la biolixiviación que opera en un proceso continuo.

La mezcla de reacción formada en un tanque de biolixiviación esta compuestas por: la solución acuosa ácida, partículas de mineral suspendidas, microorganismos suspendidos y/o adheridos a mineral, y burbujas de aire. Lo ideal, es que esta mezcla compleja sea homogénea y no se produzcan gradientes de concentración, a modo de asegurar que las variables (nutrientes, temperatura, pH, etc), sean las mismas en cualquier punto de la mezcla.

Además de la homogeneidad, la agitación busca aumentar las tasas de transferencia de gases (CO_2 y O_2) y calor a la zona de reacción bacteria-mineral. Por ello es importante elegir un agitador que asegure estos objetivos y requiera la menor potencia. Respecto al calor generado, éste se produce por reacciones exotérmicas de minerales como la pirita, por ello es importante contar con sistemas de refrigeración si se trabaja con microorganismos mesófilos; pero generalmente, se trabaja con termófilos moderados y/o extremos, lo que hace necesario altas temperaturas de operación (50-80 °C). La mayor temperatura, favorece la cinética de las reacciones y en otros países, este fin ha llevado a implementar algunas tecnologías de lixiviación en tanques a mayor presión de la atmosférica. Sin embargo, la técnica referida en este punto, es a presión ambiental.

Actualmente, esta técnica es de aplicación común en el pretratamiento de minerales refractarios de oro para disolver la capa de pasivación de sulfuros que impide que el cianuro disuelva el oro. Su aplicación comercial para minerales de cobre, es incipiente en el extranjero y está en etapa de prueba en Chile (Ver sección 3.1).

1.6 Descripción del problema

En Chile, existe un agotamiento de los recursos mineros oxidados y por otro lado una gran disponibilidad de recursos sulfurados menores a la ley de corte que no han sido explotados, además de la acumulación de lastre y relaves de flotación. A pesar de la disponibilidad de minerales sulfurados de baja ley, su procesamiento es económicamente inviable por el proceso convencional de fundición, al obtener bajas tasas de recuperación de cobre, además de generar importantes emisiones de dióxido de azufre (SO₂) y arsénico (As).

1.7 Objetivos

1.7.1 Objetivo general

Analizar las técnicas de biolixiviación en general y su alcance actual sobre la industria del cobre chilena en particular, para establecer material base que permita incentivar la masificación de la biolixiviación por parte de las empresas del rubro, como un proceso

más económico y menos contaminante (en cuanto a emisiones) que los actuales métodos de flotación y fundición.

1.7.2 Objetivos específicos

- Describir las características y potencialidades de las técnicas de biolixiviación de cobre.
- Estudiar los casos exitosos de aplicación de esta tecnología en Chile y en el extranjero.
- Analizar el estado de la investigación y desarrollo en técnicas de biolixiviación.
- Estimar la producción actual vía procesos de biolixiviación.
- Establecer la contaminación asociada a fundición para comparar con la generada por biolixiviación y establecer la normativa asociada.
- Proponer una orientación estratégica a las decisiones en innovación para el uso de tecnología alternativa, mediante el establecimiento de ventajas y desventajas.¹¹
- Plantear desafíos futuros a esta tecnología.

II. METODOLOGÍA

Primero se hizo la búsqueda de información bibliográfica y electrónica disponible sobre el tema, para revisar el material seleccionado y estudiarlo. Se extrajo información estratégica, en el sentido de masificar la implementación de esta nueva tecnología.

A modo de hacer un estudio completo, la información se analizó por categorías de acuerdo a: técnicas, características, alcances, producción actual, costos de producción e inversión y gastos en innovación de la biolixiviación, entre otros.

Se sostuvieron reuniones semanales con el director de tesis, para realizar correcciones y establecer los temas por abordar. En el contexto de la investigación realizada para Cochilco, se realizó una entrevista a la Dra. Cecilia Demergasso, directora del Centro de Biotecnología de la Universidad Católica del Norte y una visita a BioSigma, para conocer sus enfoques investigativos.

Finalmente se dio un enfoque ambiental a la información, ya que la biolixiviación establece una alternativa de producción no emisora, a la clásica fundición.

III. RESULTADOS

3.1 Aplicación de la biolixiviación

3.1.1 Casos de aplicación nacional por yacimiento minero

3.1.1.1 Chuquicamata

La biolixiviación en Chile comenzó a experimentarse en la mina Chuquicamata perteneciente a la División Norte de CODELCO (II Región), a comienzos de los 70' en pilas de mineral de ley marginal, desde donde era posible recuperar cobre mediante ciertas bacterias. Del estudio en terreno, se logró aislar y hacer cultivos de estas bacterias para posteriormente esparcirlas en solución sobre la pila de mineral, potenciando el proceso de biolixiviación que se daba por las bacterias naturalmente presentes (CIMM, 2005).

La factibilidad técnica y económica del proceso de biolixiviación fue un tema importante de probar en el año 1997 y a raíz de esto, CODELCO y BHPBilliton se unieron en una alianza estratégica –join venture- y formaron una sociedad constituida en partes iguales llamada Alliance Copper Limited (ACL). CODELCO aportó con su experiencia en extracción con solvente y electroobtención, mientras que BHPBilliton contribuyó con su conocimiento en la tecnología de biolixiviación con marca¹⁵ BioCOP®, de concentrados de cobre en tanques agitados. Esta alianza permitió tener en operación

¹⁵ Por marca se entiende a "todo signo -palabra, etiqueta con diseño o su combinación- utilizado para distinguir en el mercado, productos, servicios, establecimientos industriales y comerciales". Es un derecho de propiedad industrial, su registro le da al titular el derecho exclusivo de utilizarla para identificar bienes o servicios, durante un periodo de 10 años renovables indefinidamente por periodos iguales. Para permitir su uso por parte de terceros, el titular de la marca puede hacer contratos de licencia, por los que obtiene ganancias (INAPI).

una planta piloto en la división Chuquicamata durante 4 años, tiempo en el cual los estudios realizados permitieron validar la tecnología (CODELCO, 2002). El principal logro fue encontrar una solución a la explotación de yacimientos con un alto contenido de arsénico, pues esta tecnología deja el arsénico en una especie estable (arseniato de fierro, que precipita in-situ durante el proceso hidrometalúrgico) como para ser dispuesto como relave (Minería Chilena, 2005). Con la tecnología probada, el paso siguiente fue la creación de una planta prototipo de biolixiviación con una capacidad de producción de 20000 toneladas de cátodos por año, la que obtuvo la resolución de calificación ambiental favorable por parte de la Corema- II Región, en el año 2005.

El próximo objetivo era la creación de una planta a escala industrial, con capacidad de 100 a 150 mil toneladas de cátodos de cobre por año, para el procesamiento de concentrados de la mina Ministro Alejandro Hales (ex mansa mina). Pero, en el año 2006 se disolvió la alianza ACL y CODELCO compró las acciones a BHP Billiton, por lo que la empresa pasó a llamarse EcoMetales Limited. Como la tecnología BioCOP® está patentada por BHP, en la venta se retiró su licencia, los equipos y tecnologías asociados a este proceso, quedándose CODELCO con los demás activos de la planta, los que podía emplear para desarrollar otros procesos distintos a BioCOP®, tecnología que según el acuerdo de fin de la alianza, no puede ser utilizada por CODELCO para fines comerciales hasta el año 2016. Actualmente, EcoMetales procesa polvos de fundición de las fundiciones Chuquicamata y Ventanas (EcoMetales).

BioCOP® es una marca asociada al área de la biominería, que registra un proceso desarrollado por BHP Billiton en Sudáfrica y aplicado en Chile. Su objetivo es procesar concentrados de minerales sulfurados de cobre con un contenido importante de

arsénico, impureza que impide la vía de la pirometalurgia, utilizando bacterias termófilas que disminuyen los tiempos de recuperación de cobre.

3.1.1.2 Lo Aguirre

En 1986 se inició la aplicación comercial de la biolixiviación a minerales sulfurados remanentes de la lixiviación primaria de minerales oxidados y mixtos de cobre, en la mina Lo Aguirre de la Sociedad Minera Pudahuel Ltda, ubicada en la Región Metropolitana. Al comienzo de sus operaciones, los minerales oxidados y mixtos de cobre caracterizaban el yacimiento de la mina, pero paulatinamente comenzó a disminuir el contenido de óxidos del mineral recién extraído, hasta que en 1987 éste era tan bajo, que desde ese mismo año se comenzó a aplicar la biolixiviación en pila ya no como una lixiviación secundaria, sino como la única alternativa de lixiviación para los minerales extraídos por la minera, caracterizados por un alto contenido de sulfuros de cobre con una ley de 1-2 % de Cu (Acevedo, 2002). La mina se clausuró en 1996 debido al agotamiento del yacimiento.

3.1.1.3 Cerro Colorado y Quebrada Blanca

En los años 1993 y 1994 nacieron 2 proyectos mineros en la I Región: Cerro Colorado y Quebrada Blanca, respectivamente. Con ellos se impuso el desafío de implementar la biolixiviación en condiciones adversas de altura geográfica y de temperatura ambiente. (Domic, 2001).

La planta Cerro Colorado de BHPBilliton, desde un principio fue diseñada para realizar biolixiviación de minerales oxidados y sulfurados, compuestos principalmente de

crisocola y calcosina, respectivamente. El proceso de producción en Cerro Colorado incluye la extracción de mineral a rajo abierto, chancado, aglomeración, lixiviación en pilas dinámicas, extracción por solventes y electro-obtención, así el mineral sulfurado se disuelve por acción bacterial y el mineral oxidado por la acción de la solución acida. (Minergía, 2006)

La planta Quebrada Blanca perteneciente a Aur Resources Inc, inició sus operaciones para la biolixiviación de sulfuros secundarios de cobre con calcosina mayoritariamente. Su proceso de producción incluye las mismas etapas que se hacen en Cerro Colorado, pero para hacer la aglomeración y el riego de pilas las soluciones se calientan con el objetivo de aumentar la temperatura de las pilas, favorecida por cubiertas de plástico.

Para seguir cumpliendo con las metas de producción, en el año 2003 incorporaron la lixiviación en botaderos, que aporta con el 25% de su producción por biolixiviación (Hydro Copper, 2007). El año 2007 la planta adquirió la tecnología GEOLEACH™ utilizada para extraer cobre de sulfuros primarios y secundarios. Este proceso incluye la aglomeración, formación de pila y control de aireación e irrigación de ácido con el fin de mantener el calor y las condiciones adecuadas para las bacterias dentro de la pila, lo que busca aumentar la recuperación de cobre. Actualmente esta tecnología se encuentra en etapa de prueba, en una planta piloto (GeoBiotics, 2010a).

3.1.1.4 Escondida

La minera Escondida con BHPBilliton como dueño mayoritario, también implementó el proceso de biolixiviación en sus instalaciones. Esta minera produjo el primer cátodo de

cobre mediante biolixiviación en pilas, el año 2006 y tiene una producción estimada de 180000 toneladas de cátodos anuales. Durante los años de operación, Escondida y Escondida Norte han acumulado 1500 millones de toneladas de mineral sulfurado de baja ley, con lo que se estima una vida útil de 20 años para el nuevo proyecto de biolixiviación. Este necesitó una inversión de US\$ 870 millones que considera la construcción de una nueva planta de electroobtención, una planta desalinizadora de agua de mar y el tendido de cañerías para transportar el agua obtenida a la planta de biolixiviación (Minera Escondida, 2006).

Otras compañías mineras en Chile también han desarrollado con éxito la biolixiviación en sus plantas, como las que se nombraran en las Tablas 4 y 5 (sección 3.3).

3.1.2 Aplicación internacional

Siendo los mayores productores mundiales de cobre, nuestro país tiene un papel protagónico en el desarrollo de la biolixiviación, especialmente en pilas, por lo que somos un referente para otros países en esta tecnología. La principal razón es lo económico que resulta en cuanto a inversión e insumos, además de la disponibilidad de minerales con bajo contenido de cobre.

Si bien los otros países no destacan en producción de cobre, si destacan en inversión para la investigación, por ello tecnologías como la biolixiviación en tanques agitados ha sido mayormente estudiada en el extranjero, especialmente para el oro (biooxidación) y a raíz de la practica con este metal, se ah buscado extender su aplicación a

concentrados de cobre. La tecnología de biolixiviación en pilas para minerales sulfurados de cobre ah tenido una mayor aplicación que el uso de tanques. Las principales plantas de biolixiviación existentes en el mundo, el metal obtenido y la tecnología aplicada se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Plantas de biolixiviación en el mundo, operativas actualmente

Proyecto, Ubicación	Tipo & Producción	Tecnología Aplicada	Inicio operación
Fairview, Sudáfrica	Oro, 55 t/día	BIOX, tanque agitado	1986
Sao Bento, Brazil	Oro, 150 t/día	BIOX, tanque agitado	1990
Wiluna Mine, Australia	Oro, 158 t/día	BIOX, tanque agitado	1993
Ashanti, Ghana*	Oro, 960 t/día	BIOX, tanque agitado	1994
Tamboraque, Perú	Oro, 60 t/día	BIOX, tanque agitado	1999
Mount Leyshon, Australia	Cobre, 1370 t/día	Biopila	1992
Girilambone, Australia	Cu, 2000 t/día	Biopila	1993
S&K Copper Project, Myanmar	Cobre, 15000 t/día	Biopila	1998
Cerro Verde, Perú	Cu, 15000	Biopila	1996

Fuente: Brierley J.A & Brierley C.L, 2001; Goldfields, 2010.

El proceso BIOX®, se aplica a minerales refractarios de oro como un pretratamiento en el cual las bacterias reaccionan con los sulfuros que encapsulan el oro, dejándolo disponible para su posterior procesamiento. La planta Ashanti en Ghana, es la más grande en el mundo que utiliza tecnología BIOX.

Otras tecnologías en etapa de prueba son GEOCOAT™ y Bactech/Mintek. GEOCOAT™ consiste en un proceso aplicado a concentrados de sulfuros refractarios de oro y también a concentrados de otros metales sulfurados como cobre, níquel, cobalto y zinc. Al igual que la tecnología GEOLEACH™, ésta se realiza en pilas con parámetros controlados y con material previamente aglomerado, la diferencia es el material tratado (GeoBiotics, 2010b). Respecto a la aplicación para el cobre, existe una planta piloto en Brasil y se planea la construcción de una planta comercial para el 2011, un proyecto de oro y cobre en Australia (Geobiotics, 2010a).

La tecnología Bactech/Mintek ah sido probada en una planta piloto en Industrias Peñoles (México), la que está asociada con el centro tecnológico Mintek (Sudáfrica) y la empresa de tecnología para procesamiento de minerales Bactech (Canadá). Al año 2001 la planta había producido 10 toneladas de cátodos de cobre de alta pureza utilizando concentrados de calcopirita (Business News Americas, 2001). Hasta el momento, la planta piloto no se ah concretado en una a escala comercial para procesar cobre, sin embargo existen derechos concedidos a Mongolia, China, Siberia y Corea para comercializar esta tecnología aplicada a concentrados de oro. La tecnología Bactech/Mintek se realiza en tanques agitados, usa bacterias mesófilas ya que bordea temperaturas de 35 a 50°C y necesita que el mineral se encuentre finamente molido

para evitar la pasivación de la calcopirita o de minerales refractarios de oro (Bactech, 2010).

3.2 Investigación y desarrollo

La investigación relativa a la biolixiviación se basa en el estudio de las bacterias y las condiciones necesarias para su desarrollo, así como la búsqueda de factores ideales para optimizar el proceso mismo de la biolixiviación.

Sobre el estudio de las bacterias, en un principio se comenzó a estudiar su bioquímica y biología molecular, para formar un conocimiento base. Actualmente las investigaciones se centran en entender la genética molecular de los microorganismos, con el objetivo de optimizar genéticamente las bacterias en busca de un mejor rendimiento en la lixiviación (Kusano y col, 1992). El estudio de transferencia de genes, se ha llevado a cabo por técnicas de electrotransformación y conjugación, las cuales no han tenido éxito (Kusano y col, 1992; Peng y col, 1994a, Liu y col, 2000, Peng y col, 1994b). La dificultad radica en volver a insertar los genes mutados, que se replican en otra especie (generalmente *E. coli*), en el ADN de las bacterias acidófilas.

Los avances en biolixiviación, se pueden representar mediante investigaciones llevadas a cabo por centros científicos como BioSigma y por científicos en particular, estos últimos siempre respaldados por una institución, tal como se describe a continuación.

3.2.1 BioSigma

En un esfuerzo del Gobierno de Chile por implementar la biotecnología en los sectores económicos claves como la minería, nace el programa Genoma Chile el año 2001 para financiar parte de los proyectos de investigación presentados en este contexto. En este marco se crea BioSigma S.A, una alianza estratégica –join venture- entre CODELCO (66,7%) y Nippon Mining & Metals Co. Ltd (33,3 %), que comenzó sus actividades el 2002. En el programa de biominería de Genoma Chile que contribuyó con US\$ 2 millones, esta alianza realizó un proyecto de investigación de biolixiviación que abarcaba desde su optimización hasta estudios genéticos de los microorganismos involucrados. Uno de los resultados obtenidos de la investigación hasta el 2006, fue el aislamiento, secuenciamiento e identificación del genoma de 3 bacterias altamente eficientes en la oxidación de hierro y azufre de los minerales de cobre, que optimizan los tiempos para la recuperación de cobre. Estas bacterias fueron bautizadas con nombres del mapudungún Wenelen (pionera) recientemente patentada, Licanantay (la atacameña) y Yagan (la fueguina), estas últimas en espera de sus patentes (Portal Minero, 2009).

El resumen de la patente¹⁶ de la bacteria Wenelen expresa: “la presente invención se relaciona con una bacteria aislada, quimiolitotrófica de la especie *Acidithiobacillus ferrooxidans* denominada Wenelen, su uso en la lixiviación de minerales o concentrados de especies metálicas sulfuradas y procesos de lixiviación basados en el

¹⁶ Una patente es un derecho de propiedad industrial, que permite al titular utilizar y explotar su invención e impedir que terceros la utilicen, fabriquen, distribuyan o vendan, sin su consentimiento. Es concedida por el Estado, a través del Instituto Nacional de Propiedad Industrial y se otorga a nivel nacional por un periodo de 10 ó 20 años, dependiendo de la patente solicitada. Una vez concedida la patente en el país donde se realizó la invención, esta se puede patentar en otros países (INAPI).

uso de la bacteria, o mezclas que la contengan. Esta cepa Wenelen tiene una actividad oxidante aumentada, especialmente en el caso de la calcopirita, en comparación con otras bacterias conocidas. Debido a lo anterior, esta bacteria presenta un gran interés para aplicaciones de la biominería” (INAPI). Esta bacteria también ha sido patentada en China, Japón y Sudáfrica.

Hasta el momento BioSigma ha solicitado 15 patentes de invención relativas a bacterias y métodos relacionados a la biolixiviación.

3.2.2 David Holmes

El éxito de la aplicación de una nueva tecnología depende claramente de su eficiencia, la que puede ser aumentada mediante el manejo de diferentes factores. Este objetivo ha sido perseguido en las investigaciones destinadas a mejorar el proceso de biolixiviación. Una de ellas ha sido la dirigida por el Dr. David Holmes en el Centro de Bioinformática y Biología Genómica de la Universidad de Santiago. Su investigación se basa en el estudio de fragmentos del genoma de la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans*, tarea facilitada por el conocimiento de la secuencia completa de su genoma, realizada en Estados Unidos. Con la ayuda de programas computacionales se hace la identificación de algunos genes, para luego determinar su función en el comportamiento de la bacteria. Conociendo la función de un determinado gen sería posible cambiar y aumentar la capacidad de biolixiviación de la bacteria, lo que favorecería la producción de cobre y con ello la economía del país, lo que plantea un importante desafío para el futuro (Bioplanet, 2004).

3.3 Producción

Parte importante de la economía nacional depende de la producción de cobre. Si bien la participación en el PIB nacional de la minería del cobre bordea el 6% aproximadamente en precios constantes de 2003, en términos del aporte al fisco, CODELCO y ENAMI representan aproximadamente el 15% del total de ingresos fiscales (COCHILCO, 2009). Por ello es importante mantener las metas de producción, lo que se hace cada vez más difícil debido al agotamiento de los recursos de mayor ley de cobre y minerales oxidados, dejando para la explotación los recursos de menor ley de cobre y los minerales sulfurados. Ante este panorama, es muy importante el aporte que hacen las nuevas tecnologías como la biolixiviación, en la producción total de cobre.

Para calcular la producción de cobre por el proceso de biolixiviación, es preciso analizar los datos de producción estimados en este caso, por un autor internacional y otro nacional en las tablas 4 y 5 respectivamente. Además para los cálculos de porcentaje, se debe considerar que el total de producción de cobre mina¹⁷ fue de 5330,3 miles de toneladas para el año 2008 (Cochilco, 2009).

¹⁷ Producción de cobre mina se considera al cobre fino contenido en concentrados.

Tabla 4. Plantas de Biolixiviación en pilas para minerales secundarios de cobre y mixtos (óxidos y sulfuros) en Chile

Planta / Dueño	Producción de cátodos de cobre (TM/año)	Estado operacional
Lo Aguirre/ Sociedad Minera Pudahuel Ltda.	15000	1980- 1996
Cerro Colorado/ BHPBilliton	115000	1993- Presente
Ivan-Zar/Compañía Minera Milpro	10000- 12000	1994- Presente
Punta del Cobre/ Sociedad Punta del Cobre, S.A	7000- 8000	1994- Presente
Quebrada Blanca/Teck Cominco Ltd.	75000	1994- Presente
Andacollo Cobre/ Aur Resources	21000	1996- Presente
Dos Amigos/ CEMIN	10000	1996- Presente
Zaldivar/ Barrick Gold Corp.	150000	1998- Presente
Lomas Bayas/ XSTRATA plc	60000	1998- Presente
Lince II/ Antofagasta PLC	27000	1996- 2009
Escondida/ BHPBilliton	180000	2006- Presente
Spence/ BHPBilliton	200000	2007- Presente
Producción total	828000	

Fuente: Brierley, 2008. Estado operacional modificados a la actualidad.

Los datos de producción, considerando sólo las plantas en operación actualmente, permiten calcular una producción de 828 miles de toneladas de cobre fino por año mediante biolixiviación, lo que representa un 15,5 % de la producción total de cobre.

Tabla 5. Plantas de biolixiviación comercial para la recuperación de cobre, desde minerales de sulfuros secundarios en Chile.

Operación	Producción (TM/año 2008)	Operador	Grado Cobre	Duración
Quebrada Blanca	82000	Teck	0.3	1994-Presente
Chuquicamata	85000	CODELCO	0.3	1994-Presente
Andacollo	22500	Teck	0.58	1996-Presente
Dos Amigos	10000	Cemin	2.5	1996-Presente
Los Bronces	46400	Anglo American	0.45	2006-Presente
Minera Escondida	182000	BHP Billiton	0.3 - 0.7	2006-Presente
Minera Spence	128000	BHP Billiton	1.12	2007-Presente
Producción total	555900			

Fuente: COCHILCO, 2009

La Dra. Cecilia Demergasso en datos entregados a Cochilco, estima que actualmente a través de la tecnología de la biolixiviación se recuperan 555,9 miles de toneladas de cobre fino anualmente, lo que sobre el total de producción anual de cobre representa el 10,4%. Se debe tener en cuenta que este último estudio considera menos plantas que el primero, ya que incluye sólo las que en aquel momento estaban en operación.

3.4 Contaminación asociada a fundición y biolixiviación

3.4.1. Emisiones asociadas a fundición

En la fundición se generan emisiones directas que son del proceso propiamente tal (fusión y conversión del mineral) y emisiones indirectas asociadas a la generación energética en esta etapa, ya sea mediante combustibles o energía eléctrica.

En las emisiones indirectas, destacan los gases de efecto invernadero especialmente el dióxido de carbono (CO_2), cuyos valores bordean la tonelada métrica (para el año 2007), según el anuario de estadísticas del cobre y otros minerales (Cochilco, 2008).

Las emisiones directas son principalmente de dióxido de azufre (SO_2) y en menor cantidad de material particulado (MP) y arsénico (As). En cantidades anuales, las emisiones de SO_2 son del orden de 10 a 100 miles de toneladas, las de MP aproximadamente 0.5 miles de toneladas y las de As entre 0.05 a 0.5 miles de toneladas (Codelco, 2009).

Comparando ambos tipos de emisiones, las directas son mil veces mayor a las indirectas, además el efecto global del CO_2 en la atmosfera y no local, resta importancia para un análisis más profundo en esta oportunidad.

Las emisiones directas, varían de acuerdo a la tecnología utilizada (tipo de horno), el contenido de azufre y arsénico del mineral y en el caso del material particulado principalmente según el modo de carga del concentrado.

Actualmente, en Chile existen 7 fundiciones: Chuquicamata de la División CODELCO Norte, Potrerillos de la División Salvador, Caletones de la División el Teniente, Ventanas de la División Ventanas, todas divisiones de CODELCO. Así como también la fundición Chagres de Anglo American, Hernán Videla Lira de ENAMI y AltoNorte de Xstrata. Todas estas fundiciones ya han cambiado los hornos de reverberos altamente contaminantes, por hornos flash y por convertidores teniente, que permiten un proceso continuo entre las etapas de fusión y conversión del mineral, disminuyendo las emisiones fugitivas.

El SO_2 , el MP y el As tienen la potencialidad de generar problemas ambientales locales en zonas circundantes a fundiciones, los que pueden derivar en declaración de zonas latentes o saturadas por un determinado contaminante, por ello es importante su análisis y normativa.

3.4.1.1 Emisiones de dióxido de azufre (SO_2)

El dióxido de azufre es considerado un contaminante atmosférico porque es un precursor de la lluvia ácida, además de producir efectos crónicos y agudos en la salud de las personas, por ser un broncoconstrictor. Para prevenir o disminuir estos efectos en la población, es necesario regular mediante normas las emisiones de SO_2 , tanto como su concentración en el aire.

Las emisiones de SO_2 provienen de la combustión de combustibles fósiles (petróleo y carbón) y en gran parte de la fundición de minerales que contienen azufre, como se reveló con estudios realizados el año 1990 por el Ministerio de Minería, demostrando

que más del 90% de las emisiones de dióxido de azufre en el país, provenían de instalaciones mineras. Esto hizo necesario reglamentar las operaciones de tales fuentes, mediante la norma de emisión D.S 185/92 del Ministerio de Minería, vigente actualmente, que reglamenta el funcionamiento de establecimientos emisores de anhídrido sulfuroso, material particulado y arsénico en todo el país. Este decreto permitía que la comisión interministerial establecida, propusiera normas primarias de calidad del aire al Ministerio de Salud y normas secundarias de calidad del aire al Ministerio de Agricultura, para los contaminantes reglamentados en este decreto. La norma secundaria divide el país en zonas y es en el sur donde se aplica una norma más exigente que en la zona norte, en beneficio de las áreas agrícolas (Minminería, 1992).

En el año 2002 se promulgó el D.S 113 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República, que establece una norma primaria de calidad de aire para el dióxido de azufre. En esta norma se establecen niveles de concentración de SO₂ que generan situaciones de emergencia y para regular esta situación mediante decretos se establecen planes de prevención o descontaminación, previa declaración de zona latente o saturada, respectivamente (Minsepreg, 2002).

A través de los años, los planes de descontaminación establecidos en zonas pobladas circundantes a fundiciones, han permitido reducir las emisiones en un 80% (Ecoamerica, 2007), esto ha permitido cumplir la norma de calidad, cuyo valor anual establece un límite de 80 ug/m³¹⁸.

¹⁸ 80 µg de SO₂ en 1m³ de aire en condiciones normales de presión(1 atm) y temperatura(25°C)

Los planes de descontaminación establecen plazos para el cumplimiento de la norma en los lugares donde esta es sobrepasada (zona saturada). Para lograr este objetivo, se aplican distintas alternativas como el reemplazo por tecnología menos contaminante, aplicación de planes meteorológicos predictivos pues la incidencia de episodios críticos dependerá de las condiciones climáticas, implementación de plantas de tratamiento de ácido sulfúrico (Ecoamerica, 2007). En la etapa de fusión, dentro del convertidor el teniente, se emiten gases que en su mayoría contienen SO_2 . Este es evacuado por chimeneas que captan cerca de un 90% del SO_2 . En ellas se producen las reacciones de oxidación que forman el ácido sulfúrico.

3.4.1.2 Emisiones de Material Particulado Respirable (MP10)

El Material particulado respirable genera problemas en la salud relativos al sistemas respiratorio y cardiovascular.

La norma de calidad primaria para MP10 al igual que el SO_2 , es propuesta en el D.S 185/92, la que se promulga en el año 1998 por D.S 59 (Minsepreg, 1998). No existe norma de calidad secundaria para MP10.

Respecto a los planes de descontaminación estos permitieron reducir en un 67% las emisiones de MP10 para el año 2007 en las zonas declaradas como saturadas. Esto se logró mediante el cambio de los hornos, implementación de nebulizadores para disminuir el levantamiento de partículas, mejoras en el manejo del material.

3.4.1.3 Emisiones de arsénico (As)

El arsénico inorgánico, presente en el aire como partículas, es considerado por la Agencia Internacional de Investigaciones del Cáncer (ICRA) como un cancerígeno comprobado. Por ello surgió en Chile la necesidad de reglamentar su emisión, mediante el D.S 165/99 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República que establece una norma de emisión para la regulación del contaminante arsénico emitido al aire.

Era esperable que por los efectos a la salud provocados por el arsénico, se hubiese dictado una norma primaria de calidad del aire, lo que si ocurrió por D.S 477/94. Sin embargo, ésta fue derogada el mismo año, por ser considerada una norma muy estricta por las empresas, argumentando que en esa época no se habían realizado los correspondientes análisis de costo-beneficios exigidos por la naciente Ley General de Bases del Medio Ambiente (Mardones, 2005). La falta de consenso por los estudios faltantes y/o representativos, genera que en la actualidad no exista tal norma y nuestra salud pueda estar siendo afectada.

3.4.2 Residuos líquidos asociados a biolixiviación

La diferencia principal entre lixiviación y biolixiviación, es el uso de bacterias en esta última para disolver el mineral, además de la solución ácida utilizada en ambas. Sin embargo en la lixiviación de minerales oxidados el ácido aplicado reacciona con el mineral o es consumido por este, lo que hace necesario la aplicación de ácido. Mientras que en la biolixiviación el ácido agregado al mineral, tiene el objetivo de

otorgar un ambiente ideal a las bacterias, las que utilizan como medio de reacción la superficie de mineral y mediante una cadena de reacciones redox forman ácido, haciendo de la biolixiviación un sistema autoabastecido en cuanto a ácido.

Por lo tanto, al igual que en la lixiviación de minerales oxidados se generan residuos líquidos pero principalmente debido al ácido formado por la disolución del mineral, en este caso mediante las bacterias.

Luego que el mineral es disuelto, el cobre contenido en el PLS es separado de la solución con extracción por solvente, quedando el refino (solución ácida pobre en cobre), la que es recirculada para el curado o aglomeración de nuevo mineral. Luego en la electroobtención el cobre de la solución electrolito es separado de la solución mediante celdas electrolíticas, quedando una solución con impurezas las que pueden precipitar formando barro anódico, el cual por su contenido metálico diverso es comercializado. La solución ácida pobre en cobre al igual que en la extracción por solvente, también es recirculada para biolixiviar.

Desde la etapa de lixiviación en adelante todas las soluciones son recirculadas. El agua utilizada en las distintas etapas del proceso productivo es consumida para solubilizar el mineral, evaporada por ejemplo al secar los relaves de flotación, acumulada en tranques de relave (como una mezcla de residuos mineros y agua) y si es descargada a sistemas naturales, previamente se limpia para cumplir así con el decreto supremo 90 (DS N°90/2000 Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales) que aplica para residuos industriales líquidos.

IV. DISCUSIÓN

De acuerdo a los casos de aplicación nacional, la investigación en el campo, la producción y la contaminación de fundiciones, se pueden establecer ventajas en la implementación de la biolixiviación para argumentar a favor de esta tecnología como reemplazo a la fundición. También se establecen las desventajas, así como su posible solución.

4.1 Ventajas de la biolixiviación

A continuación se presentan ventajas técnicas, económicas y ambientales de la biolixiviación, las que pueden o no, ser obtenidas por comparación con la fundición.

- Se utilizan bacterias extremófilas a nivel industrial debido a su capacidad de crecimiento en medio ácido, a los escasos requerimientos de nutrientes e infraestructura necesarios, ya que no requieren fuentes orgánicas de energía ni mantenimiento de temperaturas elevadas.
- Requiere poca inversión de capital, ya que las bacterias pueden ser aisladas a partir de aguas ácidas de minas y se puede utilizar las mismas canchas de lixiviación utilizadas para minerales oxidados.
- Las operaciones bio-hidrometalúrgicas presentan bajos costos en comparación con los procesos convencionales, debido a que se necesita menos infraestructura y control del proceso.

- Con esta tecnología, no se emiten gases ni polvo, evitándose este tipo de contaminación que sí produce la pirometalurgia, que genera emisiones con altos contenidos de dióxido de azufre (SO_2) y arsénico (As), por el tratamiento de sulfuros en fundiciones. Por lo tanto, permite ahorrar en tecnología de abatimiento, como sistemas o chimeneas de alto costo.
- Permite el tratamiento de las reservas de minerales con baja ley de cobre que no pueden ser económicamente procesados por los métodos tradicionales.
- Se pueden tratar concentrados que contengan altos niveles de metales, sin implicar riesgos para la salud humana por emisiones tóxicas que si se podrían generar en la fundición de ciertos minerales.
- La acción de las bacterias permite lixiviar los minerales sulfurados a temperatura y presión ambiente en la presencia de oxígeno, obtenido del aire.
- Durante el proceso se genera parte del ácido y el calor requeridos en la lixiviación. El ácido se genera como producto de las reacciones de oxidación y el calor se libera por la oxidación de la pirita, a veces presente en la matriz de mineral, lo que aumenta cerca de 7°C la temperatura en el medio.
- Los microorganismos crecen y se reproducen sin la necesidad de adicionar una fuente de carbono, pues la obtienen del dióxido de carbono del aire.

4.2 Desventajas

La introducción de una tecnología basada en biolixiviación representa un importante adelanto, que no está exento de problemas principalmente sobre el manejo y mantención de las condiciones óptimas del proceso. Lo importante es que existen maneras de solucionar o evitar inconvenientes, lo que dependerá en gran parte de la inversión disponible para el proyecto, así como de la capacidad de internalizar las externalidades del proceso para hacerlo rentable.

- Es importante controlar variables como la temperatura, aireación, pH, tamaño de partículas, para asegurar las condiciones óptimas de funcionamiento de las bacterias, pero esto resulta difícil en técnicas de mayor envergadura como los botaderos y las pilas.
- A bajas temperaturas la acción de las bacterias disminuye y con ello la recuperación de cobre. Sería necesario invertir en un sistema que pueda aumentar la temperatura en la matriz de mineral, para garantizar recuperaciones mayores de cobre, sobretodo en biolixiviación en tanques. Además, en el caso específico de la lixiviación bacteriana de calcopirita, a bajas temperaturas se forma la capa de pasivación que disminuye el rendimiento del proceso, por lo que es necesaria una mayor temperatura.
- Los tiempos para una recuperación significativa de cobre, son más largos para tecnologías que permiten poco control de las variables, como la biolixiviación en botaderos. Por lo tanto, los tiempos de recuperación disminuyen en la medida que se utilicen tecnologías que permiten un mayor manejo, como la biolixiviación en tanques agitados.

- La producción de ácido por parte de las bacterias, podría tener graves consecuencias ambientales en el suelo, si se utiliza técnica in-situ o botadero no controlado. Para solucionar la generación de ácido por causa de las bacterias, y para hacer más eficientes los procesos de biolixiviación, se ha impulsado la búsqueda de soluciones a nivel genético de la bacteria.

V. CONCLUSIONES

La biolixiviación tiene una historia de aproximadamente 40 años en nuestro país, sin embargo su aplicación comercial aún es incipiente y por ello representa un porcentaje bajo de la producción anual de cobre en el país (10 a 15%). Las razones de su lento crecimiento, en comparación a otros procesos implementados en la minería (SX/EW, continuidad entre fusión y conversión por convertidor modificado el teniente, planta de tratamiento de ácidos), se deben a las limitaciones preventivas existentes al aplicar una nueva tecnología, relacionado a la falta de información y práctica en las operaciones. Por ello, en cuanto aumenta la experiencia en la aplicación de esta tecnología, las barreras deberían disminuir, así como el riesgo percibido por la empresa. Además de las limitaciones establecidas por los propios dueños, existen limitaciones asociadas al mercado como el aumento del costo energético para el funcionamiento de los equipos, la disminución gradual de la ley de mineral, y la disminución del precio del cobre en el mercado, asociado a las fluctuaciones de la economía mundial y a una mayor oferta. A esto, se suma la creciente demanda ambiental, que establece regulaciones más exigentes para los nuevos proyectos y mayor fiscalización para los que ya están en operación (Lawrence & Poulin, 1995).

El mercado y la demanda ambiental establecen limitaciones a las tecnologías convencionales, y por lo tanto exigen nuevas tecnologías más eficientes, económicas y ambientalmente limpias, como es la biolixiviación. Esta puede reemplazar el proceso de fundición, evitando la emisión de gases y partículas contaminantes al aire, lo que constituye un beneficio ambiental.

El desafío entonces, es aumentar la aplicación comercial de la biolixiviación en base a que hace décadas, existen investigaciones científicas tanto internacionales como nacionales, que avalan la tecnología además de estudios en plantas pilotos a escala industrial para probar la factibilidad técnica y económica del proceso, dando excelentes resultados. Por ello es tan importante la cooperación internacional que se logra mediante las alianzas estratégicas, convenciones internacionales, colaboración entre centros científicos; pues la experiencia y conocimiento de países extranjeros sobre la biolixiviación de oro, es un referente para evaluar si estos métodos y técnicas, podrían ser empleados para la biolixiviación de cobre.

Para que la aplicación comercial e industrial de una nueva tecnología sea exitosa, debe basarse en un desarrollo sustentable que involucra lo económico, ambiental y social. De esta manera los desafíos apuntan a: mejorar la eficiencia de la biolixiviación, por ejemplo mediante el manejo genético de los microorganismos involucrados para aumentar las tasas de recuperación de cobre; realizar una explotación racional de los recursos, para asegurar su disponibilidad futura; reutilizar materiales de baja ley que se habían dispuesto como lastre para disminuir la explotación de mineral fresco; lograr eficiencia en los insumos mediante su recirculación, o la utilización de agua desalinizada de mar; minimizar los impactos ambientales preocupándose por ejemplo que el material que es dispuesto en botaderos, o como relaves quede con especies químicamente estables, como el caso del arsénico. Algunos de estos desafíos ya se han concretado, pero lo ideal es que sean aplicados en todas las plantas operativas y futuras.

Respecto al rol del estado, este se ha limitado a implementar programas para incentivar la biotecnología en la minería como el programa Genoma, mediante un financiamiento parcial de los proyectos. El desafío es mejorar la participación del estado en la tecnología de biolixiviación, como un órgano que no solo incentive por medios económicos, sino que por medios informativos, como es la difusión de información sobre la misma tecnología y sus ventajas sobre la convencional.

Actualmente, se han logrado grandes avances en la tecnología de biolixiviación, sin embargo su aplicación comercial aún no es amplia. En base a los beneficios y avances de esta tecnología, más empresas deberían optar por esta tecnología como una alternativa menos contaminante a la fundición de minerales sulfurados.

VI. REFERENCIAS

Acevedo, F. 2000. The use of reactors in biomining processes. *Electronic Journal of Biotechnology*. **3**: 1-11 [en línea] <<http://www.scielo.cl/pdf/ejb/v3n3/a04.pdf>> [Consulta: 11 junio 2010]

Acevedo, F. 2002. Present and future of bioleaching in developing countries. *Electronic Journal of Biotechnology*. **5**: 196-199 [en línea] <<http://www.ejbiotechnology.equipu.cl/index.php/ejbiotechnology/article/view/485/953>> [Consulta: 23 Mayo 2010]

BacTech. 2010. Bioleaching: A Game Changing Technology in the Tailings Reclamation Industry [en línea] <<http://www.bactechgreen.com/s/Overview.asp>> [Consulta: 12 noviembre]

Ballester, A. 2005. Mecanismo de la biolixiviación. *En* F. Acevedo, J.C. Gentina (eds.), *Fundamentos y Perspectivas de las Tecnologías Biomíneras*. pp 9-24.

Boon, M. 2001. The mechanism of direct and indirect bacterial oxidation of sulphide minerals. *Hydrometallurgy*. **62**: 67-70.

Brierley, C.L. 2008. How will biomining be applied in future?. *Transactions of nonferrous metals society of China* **18**: 1302-1310.

Brierley, J.A., Brierley, C.L. 2001. Present and future commercial applications of biohydrometallurgy. *Hydrometallurgy* **59**: 233-239.

Bryner, L. C., Jameson, A.K., 1958. Microorganisms in leaching sulfide minerals. *Applied and Environmental Microbiology* **6**: 281-287 [en línea] <<http://aem.asm.org/cgi/reprint/6/4/281>> [Consulta: 05 mayo 2010]

Business News Americas. 2001. Producen primeros cátodos grado A en planta piloto. [en línea] <http://www.bnamericas.com/news/metales/Producen_Primeros_Catodos_Grado_A_en_Planta_Piloto> [Consulta: 11 noviembre, 2010]

Centro de Investigación Minera y Metalúrgica (CIMM). 2005. Biolixiviación, la nueva minería. [en línea] <http://www.infoindustriaperu.com/articulos_pdf/mineria/metalurgia/008.pdf> [Consulta: 01 septiembre 2009]

Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). 2008. Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales. pp 17, 71.

Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). 2009. Biolixiviación: desarrollo actual y sus expectativas. Dirección de Estudios y Políticas Públicas. Estudio (registro de propiedad intelectual n° 187.464) pp 22

Comisión Nacional del Medio Ambiente-Región Metropolitana (CONAMARM). 1998. Guía para el control y prevención de la contaminación industrial. Rubro Fundiciones. pp 11-17. [en línea] <http://www.sinia.cl/1292/articles-39915_recurso_1.pdf> [Consulta: 02 junio 2010]

Comisión Nacional para el Desarrollo de la Biotecnología (CNDB). 2003a. Chile: la biotecnología como herramienta para el desarrollo y el bienestar. Política nacional para el desarrollo de la biotecnología. pp 12. [en línea] <http://www.dinama.gub.uy/bioseguridad/images/Contenido/PDFdePaises/Chile/chile%20politica_biotecnologia.pdf> [Consulta: 10 septiembre 2009]

Comisión Nacional para el Desarrollo de la Biotecnología (CNDB). 2003b. Informe al Presidente de la República. pp 7. [en línea] <<http://infoagro.net/shared/docs/a2/BioteChile.pdf>> [Consulta: 12 septiembre 2009]

Corporación Nacional del Cobre (CODELCO). 2000. Proceso productivo. Fundición. Profundización [en línea] <<http://www.codelcoeduca.cl/proceso/fundicion/fundicion.asp>> [Consulta: 12 junio 2010]

Corporación Nacional del Cobre (CODELCO). 2002. Alianza CODELCO-BHP Billiton: lidera biolixiviación de cobre. Informe Sustentable 20. [en línea] <<http://www.codelco.cl/desarrollo/20/agenda20.asp>> [Consulta: 5 junio 2010]

Corporación Nacional del Cobre (CODELCO). 2009. Reporte de Sustentabilidad [en línea] <<http://www.codelco.cl/desarrollo/reporte/2009/index.html>> [Consulta: 15 diciembre 2010]

Crundwell, F. 2003. How do bacteria interact with minerals?. Hydrometallurgy. **71**: 75-81.

Domic, Esteban M. 2001. *En Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y aplicaciones*. 1ª ed. Capítulos 2, 7, 10 y 11.

Ecoamerica. 2007. Descontaminación atmosférica en centros mineros [en línea] <http://www.ecoamerica.cl/pdf_notas/67/eco67_32-37.pdf> [Consulta: 20 diciembre 2010]

EcoMetales Limited. Historia [en línea] <http://ecometales.qdos-grafica.cl/nuestra_empresa/historia/> [Consulta: 15 febrero 2009]

Gana, Juanita. 1988. La minería del cobre en Chile. *Ambiente y Desarrollo* 4: 19-25. [en línea] <http://www.cipma.cl/RAD/1988/1-2_JuanitaGana.pdf> [Consulta: 20 octubre 2009]

GeoBiotics. 2010a. Projects. [en línea] <<http://www.geobiotics.com/projects/index.html>> [Consulta: 23 noviembre, 2010]

GeoBiotics. 2010b. Technologies [en línea] <<http://www.geobiotics.com/technologies.html>> [Consulta: 23 noviembre, 2010]

GeoBiotics. 2010c. Confidential Gold-Copper Project, Australia. Commercial-scale GEOCOAT Plant [en línea] <<http://www.geobiotics.com/projects/australia-geocoat.html>> [Consulta: 20 Junio, 2010]

Goldfields. Technology. Página corporativa [en línea] <http://www.goldfields.co.za/com_technology.php> [Consulta: 04 de Diciembre]

Instituto Nacional de Propiedad Industrial (INAPI). [en línea] <www.inapi.cl> [Consulta: 07 diciembre 2009]

Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE). 1991. Minería Química. Capítulo XIII Biolixiviación. pp 487-540.

Jara, J. Joaquín. 2008. Curso de inducción a la minería: Desde el descubrimiento del yacimiento a la operación minera. Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO).

Kusano, T., Sugawara, K., Inoue, C., Takeshima, T., Numata, M., and Shiratori, T. 1992. Electrotransformation of *Thiobacillus ferrooxidans* with plasmids containing a *mer* determinant. *Journal of Bacteriology* 174: 6617-6623

Lawrence, R.W y Poulin, R. 1995. The demand for biotechnology in mining in the 21ST century. *En International Biohydrometallurgy Symposium* (1°, 19-22 de Noviembre. Viña del Mar, Chile) pp 185-195

Liu, Z., Guiliani, N., Appia-Ayme, C., Borne, F., Ratouchniak, J., Bonnefoy, V. 2000. Construction and characterization of a *recA* mutant of *Thiobacillus ferrooxidans* by marker exchange mutagenesis. *Journal of Bacteriology* **182**: 2269–2276.

Mardones Fuentes, Claudia Andrea. 2005. Factores claves en la relación investigación y políticas públicas en Chile -análisis del modelo matemático de licitación para Junaeb y el Proyecto Fondef de estimación de riesgos y costos de reducción del arsénico en el aire para el diseño de una normativa-. Resumen Estudio de Caso (Magister en Gestión y Políticas Públicas). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Física y Matemáticas. pp. 26- 35. [en línea]
<<http://www.dii.uchile.cl/~webmgpp/estudiosCaso/CASO88.pdf>> [Consulta: 10 junio 2010]

Minera Escondida. Proyecto Biolixiviación de Sulfuros produjo primer cátodo. [en línea]. Noticias del 29 Junio de 2006. <http://www.escondida.cl/mel/noticias/2006/29_Junio_2006.asp> [Consulta: 12 noviembre 2009]

Minería. 2006. El proceso productivo. [en línea] **64:12**
<<http://www.mineria.cl/pdf/64.pdf>> [Consulta: 18 octubre 2009]

Minería Chilena. Alianza CODELCO-BHP Billiton se materializa en Planta Industrial de Biolixiviación [en línea]. 02 de septiembre de 2005.
<http://www.mch.cl/noticias/imprimir_noticia.php?id=627> [Consulta: 25 noviembre 2009]

Ministerio de Minería (Minminería). 1992. Decreto Supremo N° 185 Reglamenta funcionamiento de establecimiento emisores de anhídrido sulfuroso, material particulado y arsénico en todo el territorio de la república [en línea]
<http://www.sernageomin.cl/pdf/reglamentos_seguridad_minera/DS185_RegEstablecimientoAnhídridosulfuroso.pdf> [Consulta: 03 de noviembre 2010].

Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República (Minsepreg). 1998. Establece norma de calidad primaria para material particulado respirable MP10, en especial de los valores que definen situaciones de emergencia [en línea]
<<http://sinca.conama.cl/uploads/documentos/73881f634e74a87884b626007d5e585f.pdf>> [Consulta: 17 de noviembre 2010].

Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República (Minsepeg). 2002. Decreto Supremo N°113 Establece norma primaria de calidad de aire para dióxido de azufre (SO₂).

Peng, J-B., Yan, W-M., Bao, X-Z. 1994a. Expression of heterogenous arsenic resistance genes in the obligately autotrophic biomining bacterium. *Applied and Environmental Microbiology* **60**: 2653-2656

Peng, J-B., Yan, W-M., Bao, X-Z. 1994b. Plasmid and transposon transfer to *Thiobacillus ferrooxidans*. *Journal of Bacteriology* **176**: 2892-2897.

Portal Minero. Biosigma patentó la bacteria Wenelén [en línea]. 12 de Junio de 2009 <http://www.portalminero.com/editor_prensa/notas/1244815200.htm> [Consulta: 06 diciembre 2009]

Pradhan, N., Nathsarma, K.C., Srinivasa Rao, K., Sukla, L.B., Mishra, B.K. 2008. Heap Bioleaching of chalcopyrite: a review. *Minerals Engineering* **21**: 355-365.

Quebrada Blanca. 2007. Quebrada Blanca, 12 años de biolixiviación en altura [en línea]. *En International Copper Hydrometallurgy Workshop* (4°, 16-18 Mayo, Viña del Mar, Chile) <http://downloads.gecamin.cl/cierre_eventos/hydrocopper2007/prsnctns/00062_00334_pr.pdf> [Consulta: 29 octubre 2009]

Ramírez Roca, Pablo Sergio. 2002. Estudios proteómicos y genómicos del metabolismo de compuestos azufrados en el microorganismo acidófilo quimilitotrófico *Acidithiobacillus Ferrooxidans*. Tesis (Doctor en Ciencias con mención en Microbiología). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias. pp 1-23

Sand, W y Schippers, A. 1999. Bacterial leaching of metal sulfides proceeds by two indirect mechanisms via thiosulfate or via polysulfides and sulfur. *Applied and Environmental Microbiology*. **65**: 319-321. [en línea] <<http://aem.asm.org/cgi/reprint/65/1/319?maxtoshow=&hits=10&RESULTFORMAT=&fulltext=adapted&searchid=1&FIRSTINDEX=680&resourcetype=HWFID>> [Consulta: 16 marzo 2010]

Sand, W., Gehrke, T., Jozsa, P-G., Schippers, A. 2001. (Bio)chemistry of bacterial leaching – direct vs. indirect bioleaching. *Hydrometallurgy* **59**: 159- 175

Sand, W. y Gehrke, T. 2006. Extracellular polymeric substances mediate bioleaching/biocorrosion via interfacial processes involving iron(III) ions and acidophilic bacteria. *Research in Microbiology*. **157**: 49-56.

Steiner, A. y Sáez, A. 1991. Auditoría ambiental: Cómo detectar "cuellos de botella ambientales" en la empresa. *Revista Ambiente y Desarrollo* **7 (N°2)**: 4. [en línea] <http://www.cipma.cl/RAD/1991/2_Steiner-Saez.pdf> [Consulta: 21 Julio 2010]

Tributsh, H. 2001. Direct versus indirect bioleaching. *Hydrometallurgy* **59**: 177-185

Vásquez Pérez, Luz Mónica. 1997. Diversidad de los microorganismos quimiolitotróficos presentes en sistemas de biolixiviación. Tesis (Doctor en Ciencias con mención en Biología). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias. pp 1-21.

Vives Navarro, Hernán. 2009. Conceptos básicos: Hidrometalurgia de minerales de cobre y Concentración de sulfuros de cobre. Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO).