



Tecnología, Ciencia, Educación

ISSN: 0186-6036

imiqac@sercom.com.mx

Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos A.C
México

Pacheco-Gutiérrez, Luis Alberto; Domínguez-de-Bazúa, María del Carmen Durán
Uso del agua en la industria minera. Parte 2: Estudio de opciones para reciclar el agua de proceso
Tecnología, Ciencia, Educación, vol. 22, núm. 1, enero-junio, 2007, pp. 15-29
Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos A.C
Monterrey, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48222103>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Uso del agua en la industria minera. Parte 2: Estudio de opciones para reciclar el agua de proceso

Luis Alberto Pacheco-Gutiérrez, María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa*

Programa de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental Conjunto E, Facultad de Química, UNAM, Paseo de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510 México D.F. Tels. (+55) 5622-5300 al 04. Correo-e: mcduran@servidor.unam.mx, diablos_rojos@hotmail.com

RESUMEN

El empleo del agua recirculada sin tratamiento en un proceso de beneficio ocasiona efectos negativos en la eficiencia del proceso de flotación de los minerales valiosos, por el grado y porcentaje de especies disueltas (orgánicas e inorgánicas) que se acumulan durante la operación. En una empresa minera en donde se encuentran presentes sulfuros complejos existen pérdidas por selectividad y recuperación durante la recirculación del agua residual, las cuales se deben a la combinación de diversos factores: xantatos residuales y productos de oxidación (dixantógenos) que se adsorben en forma no selectiva a la mayoría de los sulfatos; sulfuros residuales que causan depresión indeseada; presencia de iones metálicos como Cu^{++} , Fe^{++} , Pb^{++} , que causan la activación indeseada y, finalmente, iones alcalinos que activan a la ganga no sulfurosa. Esta investigación se enfocó al análisis del proceso minero de concentración con el fin de buscar posibles opciones de minimización del consumo de agua y la disminución de su impacto ambiental sin afectar su eficiencia. Se estudiaron en la literatura varios tratamientos del agua residual de minas. Entre ellos, el tratamiento mediante bacterias sulfato-reductoras promete ser el más eficiente debido a sus bajos costos de operación y mantenimiento y a su alta remoción de metales pesados en forma de sulfuros, obteniendo un agua con concentraciones de sulfatos menores a 250 mg L^{-1} y de metales del orden de ppb. Asimismo, se realizó una propuesta de reingeniería al proceso actual, también con base en la literatura: (a) Cambiar el colector utilizado para llevar a cabo la flotación de la esfalerita (etoxicarbonil-tionocarbamato,

Palabras clave: Molienda, flotación de sulfuros, tratamiento de aguas, drenajes ácidos de minas

Keywords: Grinding, sulphide flotation, wastewater treatment, acid mine drainage

* Autor a quien debe enviarse la correspondencia
(Recibido: Agosto 30, 2006, Aceptado: Noviembre 21, 2006)

ECTC o la tiourea, ECTU, en lugar de los xantatos). Con esto se incrementa la selectividad con respecto a la pirita y, como consecuencia, disminuye el consumo de reactivos (colector y cal para acondicionar la pulpa) y, a su vez, disminuye el costo de operación y la formación y precipitación de yeso; (b) Cambiar el medio molturante de acero al carbón a acero de alto cromo para minimizar los iones de hierro y aumentar la eficiencia de flotación; y, (c) Colocar un espesador para disminuir la humedad en la descarga reduciendo así la pérdida por evaporación y el consumo de agua fresca para su reposición (ahorrando casi el 50% de la alimentación de agua de manantiales).

PROBLEMÁTICA

La minería mexicana comprende la explotación de metales preciosos, metales industriales, minerales metálicos y no metálicos, y metales obtenidos como subproductos. La producción minera estaba tradicionalmente dedicada a la plata y el oro, pero ha cambiado desarrollándose la de los metales industriales, hasta convertir al país en un importante productor de plomo y zinc. El sector minero aporta entre el 1.17% y 1.5% al producto interno bruto nacional y de manera estimada representa el 2.4% de la producción minera mundial. México ocupa el 9° lugar en la producción minera mundial y el 4° lugar en la producción minera de Latinoamérica (INEGI, 2004). La minería mexicana se ubicó entre los once principales productores mundiales en 18 minerales, desde la plata (primer lugar) hasta el cobre (onceavo lugar) (SE, 2005). A nivel nacional, el grupo de minerales industriales no ferrosos cubrió

37.3% del valor de la producción minero-metalúrgica nacional, seguido de los metales preciosos (25.2%), metales y minerales siderúrgicos (21.4%), y minerales no metálicos (16.1%). Por mineral, la principal industria del sector, considerando el valor de la producción minero-metalúrgica, es la del cobre, con una participación de 20%; seguido de la producción de plata y zinc. En la Figura 1.1 se muestran las principales regiones mineras productoras así como su aportación a nivel nacional (Olivares e Hidalgo, 2001).

La mina que será el objeto de esta investigación se encuentra ubicada en un municipio del Estado de México. Se localiza en la zona geográfica sur de la entidad, las coordenadas geográficas son entre los paralelos 19° 00' 17" y 19° 16' 17" de latitud norte y del meridiano 100° 12' 55" al meridiano 100° 18' 13" de longitud oeste. Se ubica a una altura media de 1,470 metros sobre el nivel del mar. Las actividades realizadas por la mina en estudio permiten obtener concentrados de zinc, plomo y cobre, los cuales, son extraídos mediante procesos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos en las fundiciones y refinarias.

Debido a que entre el 95 y 98% del material procesado es desechado en las llamadas presas de jales (Allan,

1995; NOM-141-SEMARNAT-2003), en el periodo de 1994 a 2004, que se produjeron en esta zona 296,202 ton, de los cuales 244,000 son de la mina en estudio, la cantidad de jales producidos en este mismo periodo de tiempo asciende a más de 5,600,000 toneladas, las cuales han casi llenado el vaso de la presa de jales que ellos construyeron para este propósito, justificando así el objetivo de esta investigación, que es el de realizar una propuesta de reaprovechamiento integral del agua de proceso de una empresa minera sugiriendo un tren de tratamiento. Los objetivos específicos son: realizar una revisión bibliográfica del proceso de beneficio así como de los trenes de tratamiento de agua propuestos por diferentes investigadores considerando medios impresos y electrónicos, estudiar el proceso de beneficio empleado en una empresa minera localizada en el Estado de México realizando visitas periódicas, investigar las concentraciones de los metales y sulfatos presentes en las diferentes corrientes del proceso tomando muestras de agua en puntos seleccionados de la mina y hacer una propuesta de reaprovechamiento del agua considerando la implementación de un equipo adicional y de un tratamiento útil para la remoción de contaminantes.

PRINCIPALES REGIONES MINERAS PRODUCTORAS

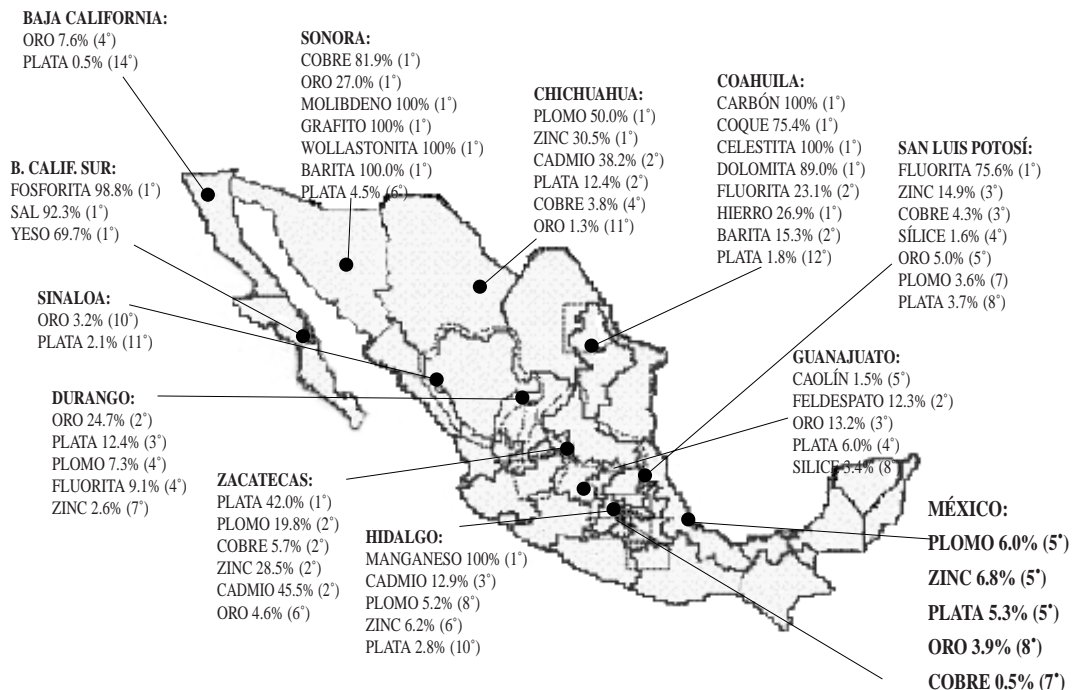


Figura 1. Principales regiones mineras productoras de México (Olivares e Hidalgo, 2001)

METODOLOGÍA

El levantamiento de información sobre el objeto de esta investigación, buscando posibles innovaciones tecnológicas en la empresa minera en estudio, consistió en una búsqueda de antecedentes bibliográficos, tanto en artículos científicos como en Páginas de las redes internacionales, en memorias de congresos, mediante solicitud de información directa a empresas, en reuniones con especialistas nacionales, visitas a la empresa para la recolección de muestras de agua, así como su caracterización, la cual fue realizada conjuntamente para esta investigación y para otra relacionada con la generación de lixiviados ácidos (González-Sandoval, 2006). En el primer punto se buscó información sobre la recirculación del agua de proceso y sus efectos en la eficiencia de separación de los concentrados minerales de valor económico. En el segundo punto se evaluó el proceso que se sigue actualmente en la mina en estudio para buscar las oportunidades de mejora.

Recirculación de agua

El consumo de agua por la industria minera en México es un porcentaje pequeño del consumo total (menos del 3%) (Bernárdez, 2005). Sin embargo, existen muchos factores para aumentar el “reciclaje” de agua “utilizada” entre los cuales se tienen los siguientes:

- El uso de agua en donde esté localizada la mina puede representar una porción importante de las fuentes de agua locales resultando en una escasez de agua para otros usos
- La producción y el transporte del agua fresca normalmente es cara, afectando los costos de operación de la industria minera
- Las descargas de las operaciones mineras son potencialmente dañinas al ambiente ya que contienen sólidos suspendidos, así como muchos compuestos químicos tóxicos en solución, en su mayoría agentes de flotación y sus productos de degradación

Tales consideraciones, que tienen enfoques ambientales y económicos, muestran la necesidad del tratamiento del agua así como su conservación. Por tanto, los dos objetivos del reciclaje del agua en la industria minera son:

- Reducir la demanda de agua fresca
- Reducir el volumen del efluente

De acuerdo con la literatura, el uso del agua en la minería se ejemplifica en la Figura 2. El agua recuperada del proceso puede ser reciclada y mezclada con agua fresca. A esto se le conoce como reciclaje interno. También es posible reciclar parte del agua acumulada en la presa de jales. A esto se le conoce como reciclaje externo. Ambas recirculaciones, afectan la composición de la corriente de alimentación del agua y determinarán la cantidad de agua fresca utilizada.

El reciclaje interno requiere una recirculación del agua de las unidades de deshidratación hacia el concentrador. Esto implica una deshidratación del concentrado o de las colas. Este tipo de recirculación puede simplificar la química del agua hasta cierto punto ya que el agua se recupera de manera rápida y los reactivos de flotación no sufrirán una descomposición significativa. Sin embargo, este tipo de recirculación requiere un equipo complejo de deshidratación para obtener una calidad de agua aceptable libre de sólidos suspendidos. Esta consideración hace más económico el reciclar el agua de la presa de jales donde los sólidos son separados por un proceso de sedimentación natural aprovechando la gravedad.

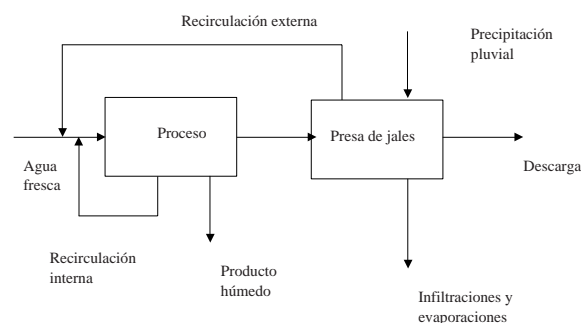


Figura 2. Diagrama de flujo general del uso del agua en la industria minera (Rao y Finch, 1988)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Balances de agua

De acuerdo con el diagrama de bloques anterior y las consideraciones hechas por el personal de la empresa minera en estudio, los datos obtenidos de esa información se presentan en la Figura 3.

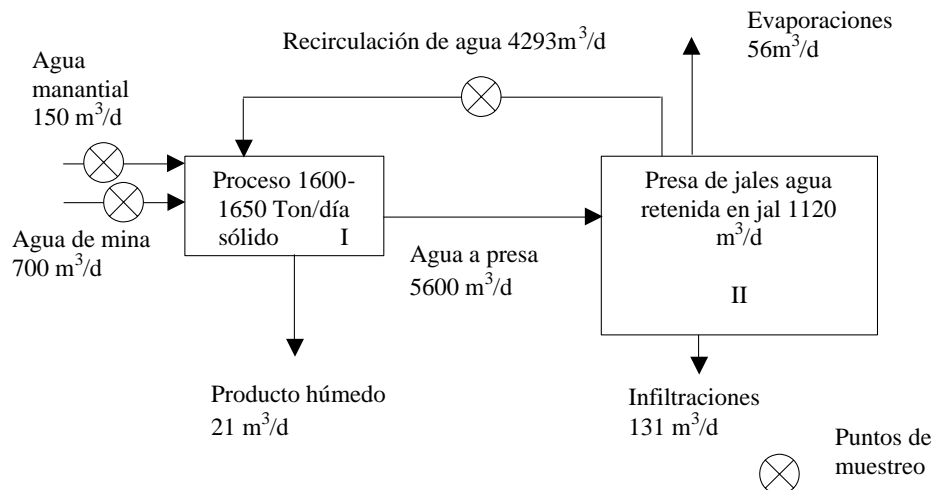


Figura 3. Balance de agua promedio de la mina en estudio

El personal de la mina en estudio no proveyó información sobre cómo se obtuvieron estos datos. En el proceso I hay $478 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ de diferencia que representa el 56% más del agua fresca utilizada para su reposición. Por esta razón, en esta investigación se reconsideró el balance de agua (Pacheco-Gutiérrez y Durán-Domínguez-de-Bazúa, 2006), de acuerdo con estudios basados en la literatura consultada. Algunos estudios reportados en la literatura muestran que, del 30-50% del agua descargada a la presa de jales, sólo entre el 20 y el 58% puede ser recuperada por decantación, ya que se puede llegar a perder hasta el 52% por evaporación, 17% por infiltraciones y 11% por el agua retenida en el jal (Wels y Roberston, 2003). Cabe mencionar que estos valores dependen de las condiciones climatológicas y topográficas de la zona donde se encuentre ubicada la presa, del tamaño de partícula del jal, ya que si es muy fino produce una superficie impermeable aumentando las zonas de inundación, acelerando así la pérdida de agua por evaporación y disminuyendo el porcentaje de infiltración (Mwale et al., 2005). La mayor recuperación lograda en otras minas se obtiene mediante la adición de desaguadores antes de descargar a la presa de jales, donde se remueve alrededor del 70% del agua utilizada (Adrian y Meintjes, 2001; Wels y Roberston, 2003). Éste podría ser un punto a recomendar al personal de la mina en cuestión, ya que cuentan con el espacio para construir el sistema (Pacheco-Gutiérrez y Durán-

Domínguez-de-Bazúa, 2006). La Figura 4, tomada de la referencia anterior, muestra la ubicación de la planta de tratamiento del agua recirculada que ayudaría no solamente a mejorar la calidad de esta agua para evitar problemas de falta de especificidad en los sistemas de flotación selectivos, sino el envío de exceso de agua a la presa donde se pierde por evaporación.

Existen varios equipos para eliminar la cantidad de agua en la pulpa; entre ellos se encuentran: los espesadores, los clarificadores, los hidrociclones, y las centrífugas (Wills, 1994). En la mayoría de las industrias se prefiere la utilización de espesadores lo cual produce una pulpa de entre 55-65% sólidos y es el equipo que se recomienda para este proceso.

Uso más eficiente del agua

Las consideraciones realizadas en el balance propuesto (Pacheco-Gutiérrez y Durán-Domínguez-de-Bazúa, 2006) son:

- El espesador es capaz de disminuir la cantidad de agua de un 80% a un 35% en peso
- Del agua mandada a la presa de jales, el 60% se pierde por retención en el jal, evaporación e infiltraciones
- Al aumentar el agua de reproceso se disminuye la cantidad de agua requerida, tanto de la mina como del agua de manantial.

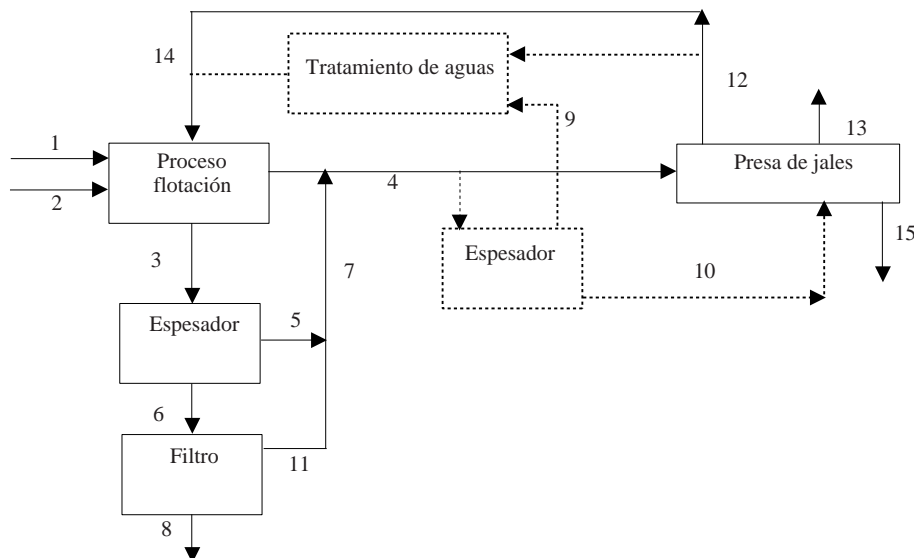


Figura 4. Diagrama de proceso de la mina en estudio con adecuaciones propuestas en líneas punteadas (Pacheco-Gutiérrez y Durán-Domínguez-de-Bazúa (1) Agua de manantial, (2) Agua de mina, (3) Contenido de agua en el producto húmedo, (4) Agua residual a presa de jales, (5) Agua recuperada del espesador, (6) Concentrado con 60% de sólidos, (7) Agua recuperada de espesador y filtro, (8) Concentrado con 92% de sólidos, (9) Agua recuperada de espesador teórico de jales, (10) Agua a presa de jales del espesador teórico, (11) Agua recuperada del filtro de concentrados, (12) Agua recuperada de la presa, (13) Pérdidas de agua de la presa por evaporación al entorno, (14) Agua de reproceso y (15) Infiltraciones al seno del sólido de la presa y alrededores

Tomando en cuenta estas tres consideraciones, la disminución del valor en la recuperación del agua en la presa y del agua perdida por evaporación, se deben a que el agua fue recuperada en su mayoría en el espesador. Esta cantidad, $1,600 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ representan casi un 50% de la cantidad actualmente reprocesada diariamente, lo que equivaldría a ahorrar el agua de manantial calculada en esta investigación. El área total de la presa es de 16 hectáreas ($160,000 \text{ m}^2$), de las cuales aproximadamente 1/6 parte se encuentra inundada ($27,000 \text{ m}^2$), mientras que los datos de la estación de “monitoreo” de la mina en estudio reporta una tasa de evaporación promedio anual de 6 mm d^{-1} lo que da como resultado una velocidad de evaporación de $162 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ resultado prácticamente tres veces mayor al indicado por los operadores de la mina ($56 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$). El agua de mina es la que tiene mayores concentraciones de zinc. Esta característica indica que tal vez pudiera

utilizarse para recuperar la esfalerita (ZnS) antes de introducir el agua al proceso. La forma de lograrlo sería reduciendo los sulfatos a sulfuros en condiciones básicas. Después de analizar los resultados obtenidos en las muestras de agua utilizadas en el proceso, puede decirse que es necesario reducir las concentraciones de los metales y de los sulfatos, con el fin de mejorar el proceso de separación y concentración de los minerales de zinc, plomo y cobre, así como la correcta separación del agua de proceso de las corrientes naturales con el fin de minimizar su impacto ambiental final en la propia presa de jales y sus alrededores y mejorar la productividad. Dentro de los resultados obtenidos de la búsqueda bibliográfica al respecto, se describieron algunos procesos que pueden ser útiles para la remoción de sulfatos y para el enriquecimiento de las diferentes fracciones de concentrados (zinc, plomo, cobre) para aumentar su “grado” (Pacheco-Gutiérrez, 2006).

Tratamientos convencionales del agua residual que acompaña a los jales

El tratamiento del agua residual de los procesos mineros requiere la remoción o la reducción de contaminantes orgánicos, así como la reducción de la

concentración de las especies iónicas que dañan al proceso. Muchas de estas técnicas son modificaciones utilizadas en el tratamiento de efluentes, tanto municipales como industriales. Las técnicas más importantes utilizadas en la industria minera se resumen en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1

Técnicas utilizadas para el tratamiento de efluentes mineros (Rao y Finch, 1988)

<i>Técnica</i>	<i>Aplicación</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
Adsorción en la interfase líquido-gas	Remoción de sustancias orgánicas tensoactivas (sulfatos de alquilo)	Operación sencilla y en concentrado puede ser recirculado	Requiere equipo de dimensiones grandes
Adsorción con carbón activado	Remoción de casi todos los compuestos orgánicos	Una sola etapa de remoción de compuestos orgánicos y los adsorbentes pueden ser recuperados	Requiere unidades especiales para la regeneración del carbón activado
Adsorción con lodo mineral	Remoción de los iones metálicos y algunos compuestos orgánicos dependiendo en la composición del lodo	Uso adecuado de los lodos generados en las operaciones	Las cantidades removidas pueden no ser satisfactorias
Precipitación química	Remoción de metales alcalinos y metales pesados	Rápida	Requiere un control cuidadoso de los reactivos
Oxidación biológica	Remoción de materia orgánica biodegradable	Potencialmente barato usando un tanque de lodos de origen microbiano	Operación lenta, acondicionamiento posterior requerido
Oxidación química	Transformación de las moléculas de alto peso molecular a bajo peso molecular	La mayoría de los compuestos orgánicos son oxidados y no tiene problemas de manejo	Costo de capital
Resinas de intercambio iónico	Remoción de las especies iónicas	Las resinas pueden regenerarse si el proceso se realiza en columnas	Costo de capital. Bajo punto de saturación
Ósmosis inversa	Remoción de electrolitos	Todas las especies catiónicas y aniónicas se remueven en una sola etapa	Problemas de mantenimiento y es necesaria una remoción previa de compuestos orgánicos
Congelamiento atmosférico	Remoción de electrolitos y compuestos orgánicos	Todas las impurezas pueden removerse y no es necesario el uso de reactivos químicos	Depende de las condiciones climáticas y dificultades en el diseño

Tabla 2

Clasificación de tratamientos de agua (Bowel, 2000)

<i>Categoría</i>	<i>Procesos</i>
Tratamiento químico y precipitación	Adición de hidróxido y carbonato de calcio Adición de sales de bario Proceso SAVMIN Proceso CESR
Membranas	Ósmosis inversa Proceso SPARRO
Intercambio iónico	Electrodialisis Proceso GYP-CIX
Remoción biológica de sulfatos	Precipitación química con intercambio iónico Humedales artificiales Biorreactores

La precipitación de sulfuros metálicos puede darse mediante la adición de sulfuros, a un pH de 8.5, normalmente en forma de H_2S , CaS , FeS y Na_2S . Este tratamiento requiere un seguimiento analítico constante, tanto de la temperatura, que determina la solubilidad del H_2S , como de los valores de pH ácidos, ya que causarían la liberación del gas H_2S , disminuyendo su concentración en la solución (Anónimo, 2001). La remoción biológica de los sulfatos puede ser una alternativa efectiva para esta precipitación (Greene y col., 2004; Maree y col., 2004; Smith y Miettinen, 2005), ya que el proceso se puede llevar a cabo de manera pasiva mediante la construcción de humedales artificiales o en forma activa mediante bio-reactores (Costello, 2003).

Las propiedades de un sistema de tratamiento biológico reducen (más no eliminan) la necesidad de un mantenimiento continuo ofreciendo otra alternativa a los procesos convencionales. Klusman y col. (1993) listan los procesos más probables para la remoción de metales pesados mediante este tipo de tratamiento:

- 1) Adsorción y formación de complejos mediante sustratos orgánicos
- 2) Reducción del sulfato por acción microbiana seguida por una precipitación de los metales en forma de sulfuros
- 3) Precipitación de óxidos férrico y de manganeso
- 4) Adsorción de los metales por hidróxidos de hierro
- 5) Metal adsorbido por las plantas
- 6) Filtración de materiales coloidales y suspendidos

Las bacterias sulfato-reductoras, BSR, oxidan los compuestos orgánicos simples (representados por la fórmula CH_2O) formando H_2S e iones bicarbonatos en condiciones neutras de pH, donde la reducción de sulfatos es óptima. Los donadores de electrones de esta reacción pueden ser el hidrógeno (H_2) o compuestos orgánicos simples. La formación del bicarbonato muestra la habilidad de las bacterias sulfato-reductoras de controlar el pH. Si se considera una reacción química clásica se necesitan 60 g de sustrato para remover 96 g de sulfatos. Sin embargo esta cantidad puede variar dependiendo de la fuente de carbono utilizada ya que no toda puede ser consumida por las bacterias sulfato-reductoras (Chang y col., 2000). Hulshoff Pol et al. (1990) recomiendan una relación mínima COD/sulfatos de 0.67 para garantizar la reducción de los sulfatos. Tanto el HS^- , que se presenta a valores de pH neutros, como el S^{2-} , que ocurre a valores de pH alcalinos, son solubles mientras que el H_2S predomina cuando el pH es ácido, es poco soluble y se desorbe de la solución. Por otra parte, el ión bicarbonato formado durante la

reducción de los sulfatos se encontrará en equilibrio con CO_2 , HCO_3^- y CO_3^{2-} . Sin embargo, en las condiciones óptimas de pH (neutras) la especie predominante será la del ión bicarbonato (Manahan, 2007). El ácido sulfhídrico formado durante la reacción de reducción, reacciona con las especies metálicas formando sulfuros metálicos insolubles y contribuye en mayor medida a la remoción de metales y su posterior recuperación por separación física. Al elevar el pH se facilita la precipitación de los metales en forma de hidróxidos y óxidos contribuyendo a la remoción de contaminantes metálicos a través de la acción de las bacterias sulfato-reductoras. Otros procesos que pueden contribuir a la remoción de los metales es la precipitación de hidróxidos férricos y carbonatos de manganeso y la adsorción subsiguiente de metales (Walker y Hurl, 2001). Comparado con los tratamientos químicos convencionales con óxido e hidróxido de calcio, este tratamiento biológico obtiene mejores concentraciones en la descarga de sulfatos (<250 vs 1500 mg L^{-1}) y de metales (ppb vs ppm). Además, se obtiene una gran selectividad en la precipitación metálica debido a las diferentes solubilidades de los sulfuros metálicos a diferentes valores de pH, contrario a lo que sucede con la precipitación con hidróxidos. Finalmente, los lodos en forma de metales sulfurosos son más densos y estables que los hidróxidos (Peters y Ku, 1985).

Sustratos utilizados

Las BSR son bacterias anaerobias estrictas y obtienen la energía para su proliferación por la oxidación de sustratos orgánicos ricos en carbono empleando a los sulfatos como aceptores externos de electrones. Como sustratos pueden usarse innumerables fuentes de carbono como lactato (Elliot y col., 1998; Kaksonen y col., 2003), glucosa (Shayegan y col., 2005; Yamaguchi y col., 2001), metanol (Tsukamoto y Miller, 1999; Tsukamoto y col., 2004), etanol (Smul y col., 1999), acetato (Moosa y col., 2002, 2005), hidrógeno, ácidos grasos lineales de cadena corta, ácidos grasos de cadena larga y ramificados, butanol, ácidos dicarboxílicos, compuestos aromáticos, ácidos orgánicos cíclicos saturados, aminoácidos, azúcares, glicerol (White, 1995), melazas (Maree y Strydom, 1987), alfalfa y paja (Genevieve y col., 1994), suero de leche y estiercol (Bjorn y col., 1996; Christensen y col., 1996), aserrín (Wako y col., 1979), composta (Dvorak y col., 1992), hojas de roble, eucalipto y pino (Frank, 2000) y microalgas (Boshoff y col., 2004a), efluentes de curtiduría (Boshoff y col., 2004b) y cáscara de arroz (Chockalingam y Subramanian, 2005).

Se realizó el análisis del uso de las aguas sanitarias municipales aledañas considerando un consumo promedio de agua por habitante de 138 L d^{-1} (36.4 gal d^{-1}) con una concentración de carbono orgánico total de 160 mg L^{-1} (Metcalf y Eddy, 1991), produciendo 87 kg de los $12,000 \text{ kg}$, requeridos estequiométricamente para disminuir la concentración de sulfatos de 4000 a 250 mg L^{-1} . Esto indica que es necesario utilizar otra fuente de carbono para tratar el agua de reproceso ($5148 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$), como mieles incristalizables de ingenios azucareros o residuos de granjas porcícolas o de ganado estabulado. Como en un bio-reactor, la disponibilidad del sustrato (equivalentes reductores) funciona como un reactivo limitante es, por lo tanto, un factor fundamental en su diseño (White y Gadd, 1996).

Kaksonen y col. (2003) concluyeron que una alta recirculación en los reactores fluidificados permite el tratamiento de aguas residuales con altas concentraciones de zinc (230 mg L^{-1}) y pH de 2.5 sin efectos inhibitorios, debido al proceso de disolución, mientras que una fluidificación baja (10%) permite la formación de la biopelícula. Una fluidificación mayor presenta ventajas al poder aumentar la velocidad de carga. La producción de biomasa es de 3.9-5.4% (g/g lactato oxidado) o 3.5-7.4% (g/g de sulfato reducido). Por otro lado, la empresa BioteQ Environmental Technologies Inc. (BIOTEQ, 1999) propone un proceso para la reducción de sulfatos y la precipitación de los sulfuros

metálicos (Figura 5). Este proceso consta de dos etapas: la química y la biológica. Los metales son removidos del agua residual en la etapa química por medio de la precipitación en forma de sulfuros metálicos por la formación de H_2S en la etapa biológica por las bacterias sulfato-reductoras. Parte de los sulfatos residuales son alimentados al reactor biológico con el fin de llevar a cabo su reducción. Otro proceso alternativo es utilizando la tecnología THIOPAQ (Weijma y col., 2001). Este proceso consta de cuatro etapas: dos reactores biológicos y dos operaciones de separación (Figura 6). En el primer reactor se lleva a cabo la reducción de sulfatos a sulfuros (reactor anaerobio). El H_2S producido biológicamente es utilizado para la precipitación química de los metales disueltos ya sea dentro del reactor o en un tanque externo. El exceso de H_2S se oxida a azufre elemental en el segundo bio-reactor (reactor aerobio) y es separado por precipitación. En el reactor anaerobio (R_1) el sulfato es reducido a ácido sulfhídrico por medio de bacterias sulfato-reductoras. La biomasa y los precipitados se aglomeran en forma de flocúlos (con tamaño de partícula de 1-2mm) con una buena velocidad de sedimentación ($1-10 \text{ m h}^{-1}$). Debido al crecimiento microbiano y a la producción de precipitados, es necesario remover periódicamente el lodo dentro del reactor. La generación de biomasa es aproximadamente de 15 kg (base seca) por tonelada de sulfato convertido (Weijma y col., 2001).

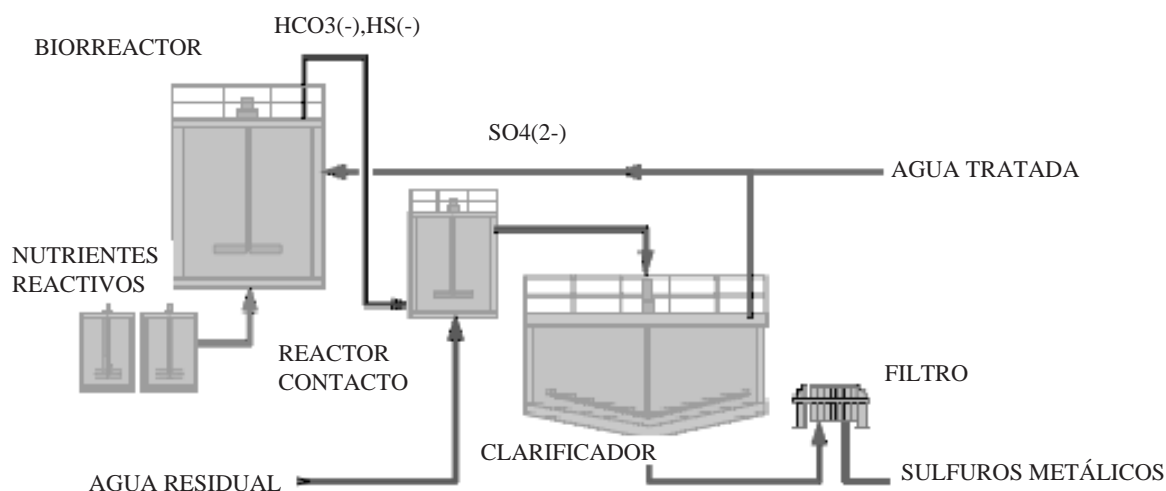


Figura 5. Proceso "Biosulfuro" (BIOTEQ, 1999)

Si tan sólo una parte del H₂S producido se utiliza para la precipitación metálica, el exceso puede ser convertido a azufre elemental en el reactor biológico aerobio (R₂) que es removido mediante un separador de platos. En la unidad S₁ la alimentación se mezcla con dos corrientes de recirculación. La primera proviene del reactor anaerobio con H₂S para llevar a cabo la precipitación de metales. La segunda proviene del efluente del separador S₂, esta corriente sólo es necesaria cuando el agua residual se encuentra muy concentrada (>10,000 mg sulfatos L⁻¹) o si es necesario incrementar el pH. Como se puede observar a simple vista, el proceso THIOPAQ, difiere del proceso “Biosulfuro” en que utiliza dos tipos diferentes de poblaciones microbianas: las bacterias sulfato-reductoras que transforman los sulfatos a ácido sulfhídrico y precipitación de los sulfuros metálicos y las bacterias que oxidan al exceso de ácido sulfhídrico para producir azufre elemental (SOB, por sus siglas en inglés *sulfide oxidizing bacteria*) (Johnson, 2003).

Recuperación del agua

Para maximizar la recuperación del agua en el proceso, minimizar la contaminación ambiental debida a la formación de drenajes ácidos, minimizar las pérdidas por evaporación que, según los expertos, puede llegar a ser de hasta un 53% del agua alimentada a la presa (Mwale y col., 2005), disminuir el costo de disposición y reducir la movilidad de los contaminantes (Newman, 2003), Archibald (2005) muestra los beneficios ambientales y económicos al implementar un sistema de “pastas”. Sus resultados se resumen en la Tabla 3. Para la implementación y optimización del método de disposición en seco, es necesario realizar estudios reológicos (Sofrá y Boger, 2002), que permitan obtener las condiciones óptimas para el transporte de las pastas y las características necesarias en la presa de jales para tener las mejores características de secado y de dispersión de los jales una vez depositados.

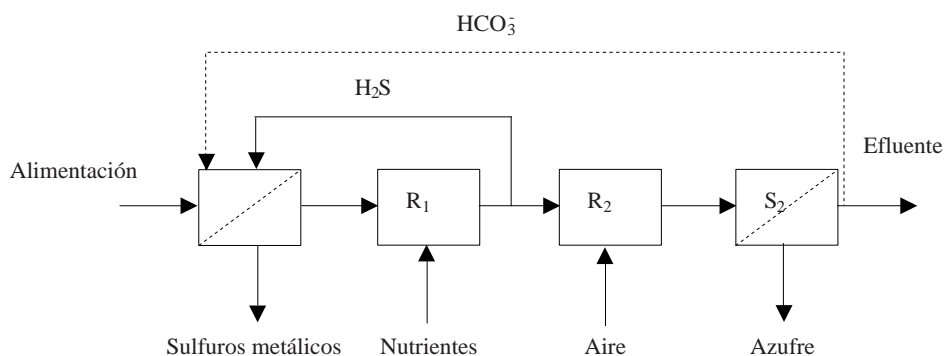


Figura 6. Diagrama esquemático del proceso THIOPAQ (Weijma y col., 2001)

Tabla 3

Costos de capital, de operación y de mantenimiento de las presas de jales con tecnología actual y tecnología de procesamiento de “pastas” (Archibald, 2005)

Costos	Tecnología actual	Tecnología de pasta
Costo de capital, millones de dólares (Dls)	1.12	1.53
Costo de operación, millones de dólares (Dls ton ⁻¹)	33.94 (11.11)	25 (6.57)
Costo mantenimiento a 50 años, millones de Dls	47.88	35.71
Costo total, millones de dólares (Dls)	82.94	62.24

DISCUSIÓN FINAL

La selección del tratamiento empleando bacterias sulfato-reductoras concuerda con la metodología propuesta por de Younger y col. (2002) (Figura 7). Comparando los procesos propuestos (Tabla 4) de adición de CaO-CaCO₃ y SAVMIN parecieran, a simple vista, ser los más indicados para el tratamiento de los efluentes de la industria minera. Sin embargo, el primero sólo puede reducir las concentraciones de sulfatos hasta 1,200 mg L⁻¹ y al ser barato se puede utilizar como un pretratamiento para otro proceso, como el de los reactores biológicos. El proceso SAVMIN puede reducir las concentraciones de sulfatos a niveles muy bajos pero es necesario contar con todo un tren complejo de tratamiento, con la adición de reactivos adicionales y, además, tener una cantidad de sulfatos en la corriente de alimentación definida. Ambos procesos pueden remover parte de los metales presentes. Los procesos BaS y CESR son los procesos más caros. El primero necesita un tratamiento posterior para la recuperación de las sales de bario mediante una reducción térmica y el segundo produce gran cantidad de lodos. Este tipo de tecnologías de tratamiento químico (CaO-CaCO₃, SAVMIN, BaS y CESR) producen una gran cantidad de lodos y el desarrollo de nuevas tecnologías para reducir o reutilizar dichos lodos haría que estos tipos de tratamiento fueran más atractivos. Aunque las tecnologías de co-precipitación de calcio-aluminio son capaces de reducir las concentraciones de sulfatos a 500 mg L⁻¹, producen mucho más cantidad de lodo que la precipitación por hidróxidos. Implementar uno de estos sistemas requiere reducir la solubilidad del sulfato de calcio de 1,200 a 1,500 mg L⁻¹. Es necesario contar con un tratamiento terciario que involucraría tanques de mezclado, reactivos químicos, sedimentadores y manejo de sólidos. La cantidad de lodo formado en este tratamiento es el doble o triple comparado con el uso de la precipitación por sulfato de calcio y, por lo tanto, no es una tecnología atractiva para flujos de agua residual elevados.

De los tratamientos por membranas o intercambio iónico, los procesos GYP-CIX y SPARRO son los más indicados para el tratamiento de aguas residuales de mina. Sus ventajas son que producen agua de alta calidad que puede ser reutilizada en el proceso o darles otra aplicación. Sus desventajas es la producción de salmuera que requiere un costo de disposición adicional. Los costos de operación de estos procesos pueden reducirse si se utiliza un pretatamiento tal como el de precipitación química.

El tratamiento mediante bio-reactores es la mejor manera de remover sulfatos por métodos biológicos. Los costos de operación del bio-reactor se pueden reducir si desarrolla una fuente de energía y de carbono alternativa. El tratamiento mediante procesos biológicos tiene el beneficio adicional de poder recuperar los metales vía precipitación de sulfuros y la cantidad de residuos producidos es mínima. Este proceso tiene también la ventaja de que al disminuir la concentración de sulfatos en el agua (disminuyendo las condiciones ácidas en el sistema), se reduce la cantidad de cal adicionada para llevar a cabo la flotación en condiciones básicas disminuyendo así la cantidad de reactivos y de sólidos generados. La presencia de iones de calcio disminuye la rapidez de la activación de la esfalerita mediante CuSO₄ y activa la ganga sulfurosa, causando la precipitación de sulfato de calcio en las tuberías y ocasionando taponamientos.

Los costos, tanto de capital como de operación de los diferentes tratamientos, son sólo estimaciones pues dependen del diseño específico según la cantidad y calidad de agua a tratar (concentración de metales y sulfatos en solución), modo de operación del equipo, necesidad de tratamientos adicionales (como la regeneración de resinas, sales de bario, etc.), los precios del mercado, costo de disposición de residuos y los costos de la mano de obra (Tabla 4).

CONCLUSIONES

Considerando el objetivo de esta investigación, que era el de realizar una propuesta de reaprovechamiento integral del agua de proceso de una empresa minera empleando un tren de tratamiento, se puede concluir que:

Existen factores ambientales y económicos que fomentan la recirculación del agua para el proceso de flotación. Aunque la conservación de los cuerpos de agua es necesaria, el agua recirculada actualmente en la empresa en estudio produce efectos negativos en el proceso de reutilización, disminuyendo la recuperación y el grado del concentrado. Es importante controlar las propiedades físicas y químicas del jal acuoso, como son el tamaño de partícula, el grado de oxidación de las superficies de las partículas, pH, conductividad, concentración de oxígeno disuelto, temperatura de la pulpa, interacciones galvánicas y la activación por iones disueltos, para optimizar el proceso de separación y concentración y disminuir su impacto ambiental.

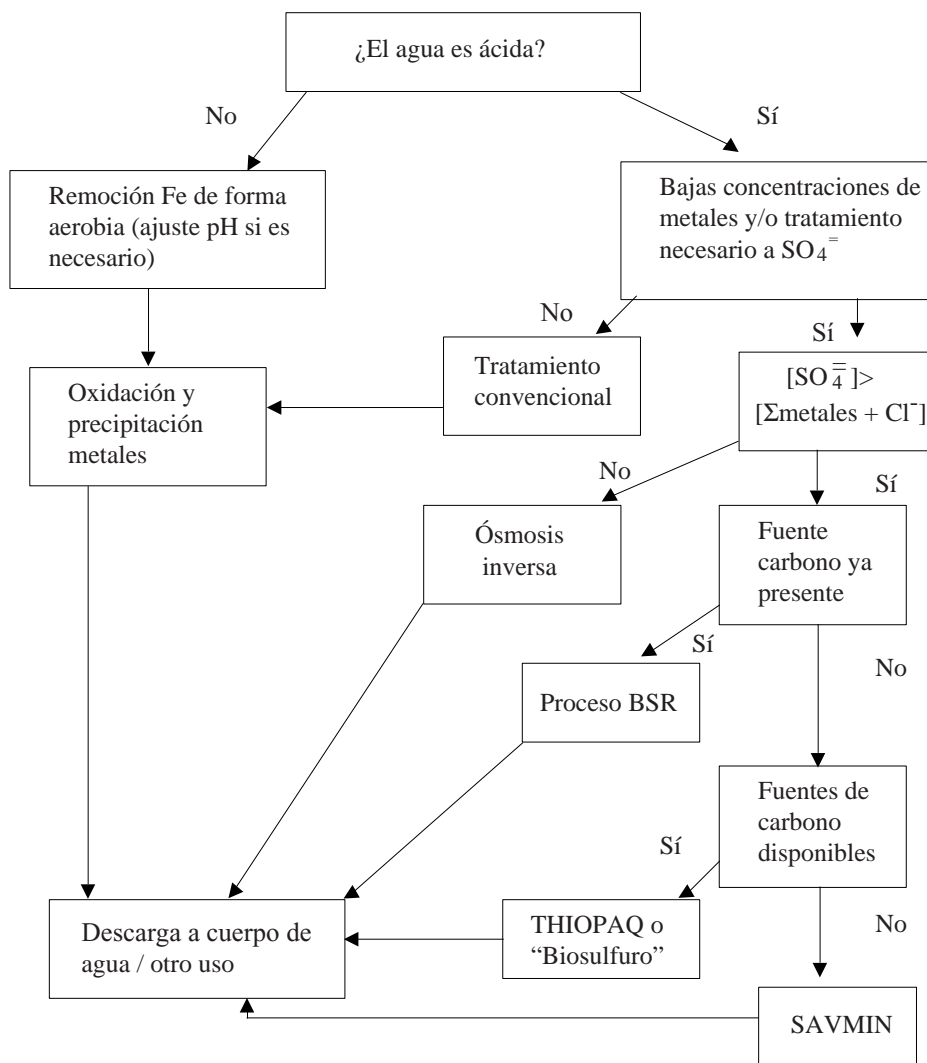


Figura 7. Metodología de selección para el tratamiento de efluentes mineros (modificado de Younger y col., 2002)

Existen varias tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales y, de ellas, el tratamiento mediante bacterias sulfato-reductoras promete ser el más eficiente debido a sus bajos costos de operación y de mantenimiento y a su alta remoción de metales pesados en for-

ma de sulfuros, obteniendo un agua con concentraciones de sulfatos menores a 250 mg L^{-1} y de metales del orden de ppb en vez de ppm. Debe considerarse que dicha tecnología opera de manera óptima en intervalos de pH neutro.

Tabla 4
Comparación de los tratamientos propuestos

	<i>CaO-CaCO₃ (Geldenhuy y col., 2001)</i>	<i>BaS (APSI, 2005)</i>	<i>SAVMIN (Smit y Sililski, 2002)</i>	<i>CESR (Pacheco-Gutiérrez, 2006)</i>	<i>Bio-reactor (Pacheco-Gutiérrez, 2006)</i>
Pretratamiento	No	No	No	No	Sí
Agua alimentación (SO ₄ mg L ⁻¹)	3,000	27,500	646	29,100	8,342
Efluente (SO ₄ mg L ⁻¹)	1,219	190	69	190	198
Producción lodo	Elevado	Moderado	Moderado-elevado	Elevado	Baja-moderado
Seguimiento	Moderado-elevado	Elevado	Elevado	Elevado	Moderado-elevado
Mantenimiento	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Moderado
Costo de capital (millones de dólares)	Desconocido (bajo)	0.48 (10 ³ m ³ d ⁻¹)	0.31 (10 ³ m ³ d ⁻¹)	Desconocido	0.24 (10 ³ m ³ d ⁻¹)
Costo de operación (dólares)	0.1 m ⁻³	0.26 m ⁻³	0.17 m ⁻³	0.79 m ⁻³	0.27 m ⁻³
Ventajas	Remoción de metales (barato)	Bajas concentraciones de sulfatos en efluente Recirculación BaS	Bajas concentraciones de sulfatos en efluente Recirculación ettringita Remoción de metales	Bajas concentraciones de sulfatos en efluente Remoción de metales	Remoción de metales y recirculación de H ₂ S y CO ₂
Desventajas	Baja remoción de sulfatos Producción de lodos	Baja remoción de metales Producción de lodos	Producción de lodos	Producción de lodos	Costo de fuente de carbón Producción lodos

Tabla 4
Comparación de los tratamientos propuestos (continuación)

	<i>Ósmosis inversa (Pulles y col., 1992)</i>	<i>SPARRO (Juby y col., 1996)</i>	<i>Electrodialísis (Pacheco-Gutiérrez, 2006)</i>	<i>Intercambio iónico (Pacheco-Gutiérrez, 2006)</i>
Pretratamiento	Sí	Sí	Sí	No
Agua alimentación (SO ₄ mg L ⁻¹)	4,920	6,639	4,178	4,472
Efluente (SO ₄ mg L ⁻¹)	113	152	246	<240
Producción lodo	Bajo	Bajo	Bajo	Moderado
Seguimiento	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado
Mantenimiento	Elevado	Elevado	Elevado	Moderado
Costo capital (millones de dólares)	0.44-0.53	0.52	0.56-0.67	0.33-0.37
Costo de operación (dólares)	0.88	0.22	0.48	0.6
Ventajas	Gran calidad de agua	Gran calidad de agua Mejora la vida de la membrana	Gran calidad de agua	Gran calidad de agua
Desventajas	Problemas de escalamiento Baja vida de la membrana	Baja vida de la membrana	Problemas de escalamiento Baja vida de la membrana	Producción de lodo

Al estudiar el proceso de beneficio empleado en una empresa minera localizada en el Estado de México realizando visitas periódicas, fue posible conocer sus instalaciones, los reactivos utilizados así como sus cantidades, el medio molturante utilizado, así como el muestreo de agua en diferentes puntos. Esto permitió investigar las concentraciones de los metales y de los sulfatos presentes en las diferentes corrientes del proceso tomando muestras de agua en puntos seleccionados de la mina. Esta información analítica real permitió corroborar lo mencionado en el punto anterior. Con esta información puede decirse que es necesario dar un tra-

tamiento al agua de recirculación para reducir las concentraciones de las especies inorgánicas mencionadas, para el mejoramiento del proceso de flotación y la disminución del posible impacto ambiental a los cuerpos de agua de los alrededores.

Al hacer una propuesta de reaprovechamiento del agua considerando la implementación de un equipo adicional y de un tratamiento útil para la remoción de contaminantes, se encontró que

- ✓ Existen varios equipos para eliminar agua de la pulpa. Entre ellos se encuentran los espesadores, los

clarificadores, los hidrociclones y las centrifugas. En la mayoría de las industrias se prefiere la utilización de espesadores por su bajo costo y su fácil operación

- ✓ Al disminuir la cantidad de agua enviada a la presa de jales mediante el uso de un espesador, que disminuye el contenido de humedad en la descarga de un 80 a un 35%, se reduce la pérdida de agua por evaporación así como el consumo de agua fresca para su reposición
- ✓ La cantidad de compuestos orgánicos utilizados como sustratos en el tratamiento biológico propuesto debe ser balanceada con la concentración del metal y su acidez para asegurar la eliminación de los metales y no aumentar la carga de materia orgánica total en el efluente debido a que podría ocasionar efectos adversos en el proceso de flotación
- ✓ Las bacterias sulfato-reductoras son capaces de disminuir los sulfatos y producir "alcalinidad" a valores de pH hasta de 3.25 después de recibir un periodo de aclimatación, aunque es recomendable que el pH de la alimentación esté en condiciones neutrales para fomentar la actividad microbiana de dichas bacterias reduciendo los tiempos de proceso. Por ello, se considera recomendable tener un acondicionamiento previo
- ✓ Es posible recuperar sulfuros de cobre y zinc bajo diferentes condiciones de pH (2.8 y 3.5 respectivamente), mientras que es posible precipitar el níquel y el ión ferroso a un valor de pH de 6. Es importante hacer mención que la precipitación metálica mediante la generación de H₂S biogénico depende, no sólo del pH sino también de la eficiencia del reactor anaerobio empleado (lecho de lodos, empacado, fluidificado, etc.)

RECONOCIMIENTOS

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (México), la beca de maestría que obtuvo de 2004 a 2006. Los autores agradecen el apoyo logístico y profesional de los responsables de la mina cooperante, así como del personal de investigación de su centro y a la Dirección General de la empresa cooperante por su confianza en la UNAM.

BIBLIOGRAFÍA

Adrian H., Meintjes C. 2001. Dry tailings disposal-increased production and potential water saving. En Mwale, A.H., Musonge, P., Fraser, D.M. 2005. The influence of particle size on energy consumption and water recovery in comminution and dewatering systems. *Minerals Engineering*. 18(9):915-926.

Allan, R.J. 1995. Impact of mining activities on the terrestrial and aquatic environments. En Salmons, W., Förstner, U., Mader, P.(ed). *Heavy metals, problems and solutions*. Springer-Verlag, Berlín, RFA. Pp. 120-140.

Anónimo. 2001. *Sulfide precipitation*. Consulta en las redes internacionales (consultada el 2 de noviembre, 2005):<http://www.usace.army.mil/usace-docs/eng-manuals/em1110-14012/chap4.pdf>

APSI. 2005. *Sulfate removal from mining wastewater using barium salt*. Aqueous Processing Specialists Inc. Consulta a las redes internacionales (consultada el 31 de enero, 2005): http://www.liquidsolid.com/sulfate_removal_text.html

Archibald, F. 2005. *Beneficial impacts of paste tailings on environmental hazard mitigation and engineering performance improvement*. Department of Mining Engineering Ontario, Canadá. Consulta a las redes internacionales (consultada el 28 de octubre, 2005): <http://mine.queensu.ca/people/faculty/Archibald/PeruEnvironment.pdf>

Bernárdez, A. 2005. *El agua en cifras*. Consulta a las redes internacionales (consultada el 14 de mayo, 2005): http://www.cce.org.mx/cespedes/publicaciones/revista/revista_5/amaya.htm

BIOTEQ. 1999. *Bioteq Environmental Technologies Inc*. Consulta a las redes internacionales (consultada el 10 de julio 2005): <http://www.bioteq.ca/technology.html>

Bjorn, C., Laake, M., Lien, T. 1996. Treatment of acid mine water by sulfate reducing bacteria; results from a bench scale experiment. *Wat. Res.* 30(7):1617-1624.

Boshoff, G., Duncan, J., Rose, P.D. 2004a. The use of micro-algal biomass as carbon source for biological sulfate reducing systems. *Wat. Res.* 38(11):2659-2666.

Boshoff, G., Duncan, J., Rose, P.D. 2004b. Tannery effluent as a carbon source for biological sulfate reduction. *Wat. Res.* 38(11):2651-2658.

Bowel, R.J. 2000. *Sulphate and salt minerals: The problem of treating mine waste. Mining environmental Management*. Consulta a las redes internacionales (consultada el 13 de febrero, 2006): <http://www.srk.co.uk/pdfs/sulphat1.pdf>

Chang, S., Kyun, P., Shin, K., Hong, B.K. 2000. Biological treatment of acid mine drainage under sulfate reducing conditions with solid waste materials as substrate. *Wat. Res.* 34(4):1269-1279.

Christensen, B., Laake, M., Lien, T. 1996. Treatment of acid mine water by sulfate reducing bacteria: Results from a bench scale experiment. *Wat. Res.* 30(7):1617-1624.

Chockalingam, E., Subramanian, S. 2005. Studies on removal of metal ions and sulfate reduction using rice husk and *Desulfotomaculum nigrificans* with reference to remediation of acid mine drainage. *Chemosphere*. En prensa.

Costello, C. 2003. *Acid mine drainage: Innovative treatment technologies*. Consulta a las redes internacionales (consultada el 10 de junio, 2005): http://clu-in.org/download/studentpapers/costello_ amd.pdf

Dvorak, D.H., Hedin, R.S., Edenborn, H.M., McIntire, P.E. 1992. Treatment of metal contaminated water using bacterial sulfate reduction: Results from a pilot scale reactors. En Chang, S., Kyun, P., Shin, K., Hong, B.K. (2000). Biological treatment of acid mine drainage under sulfate reducing conditions with solid waste materials as substrate. *Wat. Res.* 34(4):1269-1279.

Elliot, P., Ragusa, S., Catchesiede, D. 1998. Growth of sulfate reducing bacteria under acidic conditions in an upflow bioreactor as a treatment system for acid mine drainage. *Wat. Res.* 32(12):3724-3730.

Frank, P. 2000. *Bioremediation by sulfate reducing bacteria of acid mine drainage*. UC Berkeley Department of Environmental Sciences. Berkeley, California, EEUUA.

Genevieve, B., Yamasaki, H., Gould, D., Bedard, P. 1994. Use of cellulosic substrates for the microbial treatment of acid mine drainage. *J. Environ. Qual.* 23:111-116.

- Geldenhuis, A.J., Maree, J.P., de Beer, M., Hlabela, P. 2001. An integrated limestone/lime process for partial sulphate removal. En *Conference on Environmentally Responsible Mining in South Africa*. Sept 2001. CSIR, Pretoria, Sudáfrica.
- González-Sandoval, M.R. 2006. Generación de lixiviados ácidos de jales ricos en pirita. *Tesis de Maestría en Ingeniería*. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM. México D.F. México.
- Greene, A.C., Ogg, C.D., Lynch, K.M. Pope, P.B., Patel, B.K.C. 2004. Iron reducing bacteria - ecology, significance and potential uses. En *Conference proceedings. Bac-Min Conference*. Australian Institute of Mining and Metallurgy. Brisbane, QLD. Australia.
- Hulshoff Pol, L.W., Lens, P.N.L., Slams, A.J.M., Lettinga, G. 1990. Anaerobic treatment of sulphate-rich waste waters. *Biodegradation*. 9:213-224
- INEGI. 2004. *Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática*. México D.F. México. Consulta a las redes internacionales (consultada el 4 de abril, 2004): www.inegi.gob.mx
- Johnson, B. 2003. *Importance of microbiology in the development of sustainable technologies for mineral processing and wastewater treatment*. Consulta a las redes internacionales (consultada el 17 de enero, 2006): <http://biology.bangor.ac.uk/~bsr003/documents/NESMI%2003.pdf>
- Juby, G.J.G., Schutte, C.F., van Leeuwen, J.W. 1996. Desalination of calcium sulphate scaling mine water: Design and operation of the Sparro process. En Juby, G.J.G., Schutte, C.F. 1999. *Membrane life in a seeded- slurry reverse osmosis system*. Consulta a las redes internacionales (consultada el 17 de enero, 2006): <http://www.wrc.org.za/archives/watersa%20archive/2000/April/1171.pdf>
- Kaksonen, A.H., Riekkola, L., Vanhanen, M.L., Puhakka, J.A. 2003. Optimization of metal sulphide precipitation in fluidized bed treatment of acidic wastewater. *Wat. Res.* 37(2):255-266.
- Klusman, R. W., Dvorak, D., Borek, S. 1993. Modeling of wetlands and reactors systems for mine drainage treatment. En *Proc. 10th Natl. Meet. of ASSMR*. The Challenge of Integrating Diverse Perspectives in Reclamation. B. A. Zamora, R. E. Connolly, eds. Vol. II. Pp. 685-706. Am. Soc. for Surface Mining and Reclamation. Washington, DC. EEUUA.
- Manahan, S.E. 2007. *Introducción a la química ambiental*. 1a ed. UNAM-Editorial Reverté. México D.F. México.
- Maree, J.P., Greben, H.A., de Beer, M. 2004. *Treatment of acid and sulphate-rich effluents in an integrated biological/chemical process*. Consulta a las redes internacionales (consultada el 7 de diciembre, 2005): <http://www.wrc.org.za/downloads/watersa/2004/Apr-04/5.pdf>
- Maree, J.P., Strydom, W. 1987. Biological sulphate removal from industrial effluent in an upflow packed bed reactor. *Wat. Res.* 21(1):141-146.
- Metcalf y Eddy. 1991. *Wastewater engineering treatment disposal reuse*. 3a. ed. McGraw Hill. Nueva York, EEUUA.
- Moosa, S., Nemati, M., Harrison, S.T.L. 2002. A kinetic study on anaerobic reduction of sulphate. Part I. Effect of sulphate concentration. *Chemical Engineering Science*. 57(14):2773-2780.
- Moosa, S., Nemati, M., Harrison, S.T.L. 2005. A kinetic study on anaerobic reduction of sulphate. Part II. Incorporation of temperature effects in the kinetic model. *Chemical Engineering Science*. 60:3517-3524.
- Mwale, A.H., Musonge, P., Fraser, D.M. 2005. The influence of particle size on energy consumption and water recovery in comminution and dewatering systems. *Minerals Engineering*. 18(9):915-926.
- Newman, P. 2003. Paste answer to dam problems. En *Water for a sustainable minerals industry - A review*. Water in Mining Conference. Brown, E.T., ed. Australian Institute of Mining and Metallurgy. Brisbane, QLD. Australia.
- NOM-141-SEMARNAT-2003. Norma Oficial Mexicana, que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales. *Secretaría de Economía*. Poder Ejecutivo Federal. México D.F. México.
- Olivares, H., Hidalgo, J. 2001. *Anuario estadístico de la minería en el Estado de México*. Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México. Toluca, México, México.
- Pacheco-Gutiérrez, L.A. 2006. Propuesta de reaprovechamiento integral del agua de proceso de una empresa minera empleando sistemas biológicos anaerobios. *Tesis de Maestría en Ingeniería* (Ingeniería Química, procesos). Premio IMIQ a la Mejor Tesis en Ingeniería Química 2006. IMIQ, Sección Ciudad de México-Centro. México D.F. México.
- Pacheco-Gutiérrez, L.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C. 2006. Uso del agua en la industria minera. Parte 1: Balances de materia en una empresa cooperante / Water reuse in the mining industry. Part 1: Mass balances in a cooperating industry. *Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ, México)*. 21(2):96-103.
- Peters, R.W., Ku, Y. 1985. Batch precipitation studies for heavy metal removal by sulphide precipitation. En Lens, P., Hulshoff, P. L. (2002). *Environmental Technologies to treat sulfur pollution - Principles and engineering*. Edición IWA, Londres, Inglaterra.
- Pulles, W., Juby, G.J.B., Busby, R.W. 1992. Development of a slurry precipitation and recycle reverse osmosis (SPARRO) technology for desalinating scaling mine waters. *Wat. Sci. Tech.* 25(10):177-193.
- Rao, S.R., Finch, J.A. 1988. A review of water re-use in flotation. *Minerals Engineering*. 2(1):65-85.
- SE. 2005. *Consulta a las redes internacionales* (consultada el 1 de abril, 2005): <http://www.economia.gob.mx/> USGS, 2004, Mineral Commodity Summaries, abril, para México: Dirección General de Minas, junio 2004, Secretaría de Economía, Poder Ejecutivo Federal. México D.F. México.
- Shayegan, J., Ghavipanjeh, F.M., Mirjafari, P. 2005. The effect of influent COD and upward flow velocity on the behaviour of sulphate reducing bacteria. *Proc. Biochemistry*. 40(7):2305-2310.
- Smit, J., Sililski, U.E. 2002. Pilot plant study to treat typical gold mine mineewater using the Savmin process. En *Water in Mining Conference*. Australian Institute of Mining and Metallurgy. Brisbane, QLD. Australia.
- Smith, R.W., Miettinen, M. 2005. Microorganisms in flotation and flocculation - future technology or laboratory curiosity? En *Conference Proceedings*. Centenary of Flotation Australian Institute of Mining and Metallurgy. Symposium Brisbane, QLD. Australia.
- Smul, A., Goethals, L., Verstraete, W. 1999. Effect of COD to sulphate ratio and temperature in expanded-granular-sludge-blanket reactors for sulphate reduction. *Proc. Biochem.* 34(4):407-416.
- Sofrá, F., Boger, D. 2002. Environmental rheology for waste minimisation in the minerals industry. *Chemical Engineering Journal*. 86:319-330.
- Tsukamoto, T. K., Miller, G.C. 1999. Methanol as a carbon source for microbial treatment of acid mine drainage. *Wat. Res.* 33(6):1365-1370.
- Tsukamoto, T. K., Kiillion, H.A., Miller, G.C. 2004. Column experiments for microbiology treatment of acid mine drainage: low temperature, low pH and matrix investigations. *Wat. Res.* 38(6):1405-1418.

- Wako, N., Takahashi, T., Sakurai, Y., Shiota, H. 1979. A treatment of acid mine water using sulfate reducing bacteria. En Tsukamoto, T. K., Miller, G.C. (1999). Methanol as a carbon source for microbial treatment of acid mine drainage. *Wat. Res.* **33**(6):1365-1370.
- Walker, D.J., Hurl, S. 2001. The reduction of heavy metals in a stormwater wetland. *Ecological Engineering.* **18**(4):407-414.
- Weijma, J., Copini, C.F.M., Buisman, C.J.N., Schultz, C.E. 2001. Biological recovery of metals, sulfur and water in the mining and metallurgical industry. En Lens, P., Hulshoff, P. L. (2002). *Environmental technologies to treat sulfur pollution - Principles and engineering*. Edición IWA, Londres Inglaterra.
- Wels, C., Roberston, McG. 2003. Conceptual model for estimating water recovery in tailings impoundments. En Mwale, A.H., Musonge, P., Fraser, D.M. (2005). The influence of particle size on energy consumption and water recovery in comminution and dewatering systems. *Minerals Engineering.* **18**(9):915-926.
- White, D. 1995. The physiology and biochemistry of prokaryotes. En Tsukamoto, T. K., Kiillion, H.A., Miller, G.C. (2004). Column experiments for microbiology treatment of acid mine drainage: Low temperature, low pH, and matrix investigations. *Wat. Res.* **38**(6):1405-1418.
- White, C., Gadd, G.M. 1996. Mixed sulphate reducing bacterial cultures for bioprecipitation of toxic metals: Factorial and response surface analysis of the effects of dilution rates, sulphate an substrate concentration. *Microbiology.* **142**:2197-2205.
- Wills, B.A. 1994. *Tecnología de procesamiento de minerales: Tratamiento de menas y recuperación de minerales*. Editorial Limusa. México D.F. México.
- Yamaguchi, T., Yamazaki, S., Uemura, S., Tseng, I., Ohashi, A., Harada, H. 2001. Microbial ecological significance of sulfide precipitation within anaerobic granular sludge revealed by micro electrodes study. *Wat. Res.* **35**(14):3411-2417.
- Younger, P.L., Banwart, S.A., Hedin, R. 2002. *Mine water hydrology, pollution, remediation*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Países Bajos (Holanda).