

Traducción de: Dold, B. (2008): Sustainability in metal mining: from exploration, over processing towards mine waste management. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 7(4), 275-285.

Sustentabilidad en la minería de metales: desde la exploración y los procesamientos hasta el manejo de los desechos mineros

Bernhard Dold

Publicado en línea: 27 de septiembre de 2008
© Springer Science+Business Media B.V. 2008

Resumen La minería de metales, o en términos más generales, la minería de minerales, es la industria que sustenta la prosperidad económica y el desarrollo de numerosos países. Sin embargo, la minería tiene una reputación negativa debido a los serios problemas de la contaminación medioambiental como las emisiones de SO₂ y CO₂ y la formación de drenaje ácido de mina (DAM), que ponen en peligro los recursos vitales limitados como el aire, el agua y el suelo. Este artículo de revisión destaca los problemas medioambientales de las operaciones actuales de la minería de metales y explora las posibilidades de las operaciones mineras más sustentables para el futuro con un enfoque en los sistemas mejorados y optimizados de recuperación de metales en conjunto con una minimización del impacto ambiental. Para lograr estos cambios se debe cambiar la mentalidad y el proceso operacional minero, que, en la actualidad, aún se observan en algunas operaciones mineras modernas. El objetivo es implementar estos cambios como una normativa para todas las operaciones mineras futuras.

Palabras clave: Drenaje ácido de mina · Biominería · Relaves · Contaminación · Sulfuros · Sulfatos · Sustentable · Prevención · Tratamiento · Remediación · Medio ambiente

B. Dold (✉)
Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA),
Universidad de Concepción, Víctor Lamas 1290,
4070386
Concepción, Chile
e-mail: bdold@udec.cl

1 Introducción

La producción de metales y la búsqueda de nuevos recursos metálicos han experimentado un enorme impulso en los últimos años debido a las crecientes demandas de metales en los países en vías de desarrollo como China e India. La perspectiva para el futuro de la producción de metales es muy prometedora y se espera que mantenga un nivel alto. También se espera que los precios de los metales continúen siendo altos, ya que la demanda aumentará, mientras que los nuevos descubrimientos de yacimientos metalíferos disminuirán. Sin embargo, en la actualidad no sólo se debe considerar el beneficio económico de la producción de metales para el desarrollo de un proyecto minero, sino que también se debe evaluar el impacto ambiental de las actividades mineras antes, durante y después de la operación. Esto se debe considerar especialmente en el contexto de las presiones socioeconómicas que se ejercen sobre la industria minera para una producción de metales más sustentable y limpia. Los países industrializados comenzaron a formular informes medioambientales y a implementar leyes marco ambientales en los años 70 (p. ej. EE.UU., Europa Central, Japón); sin embargo, los países en vías de desarrollo iniciaron este proceso recién en los años 90 (p. ej. Chile, Perú, Corea, Nigeria), según lo informado por Jänicke y Weidner (1997). En Europa, a causa de dos graves accidentes mineros ocurridos en España (Aznalcóllar 25.04.1998; Grimalt et ál. 1999; Doménech et ál. 2002) y en Rumania (Baia Mare

Traducción de: Dold, B. (2008): Sustainability in metal mining: from exploration, over processing towards mine waste management. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 7(4), 275-285.

30.01.2000; Korte et ál. 2000; Wehland et ál. 2002), la Comisión Europea decidió implementar, en el año 2006, nuevas directivas (Directiva 2006/21/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de marzo de 2006) sobre el manejo de los residuos de las industrias extractivas, incluido los desechos mineros (que modifica la Directiva 2004/35/CE; <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:102:0015:01:ES:HTML>).

Además de estas importantes actividades, se debiera concentrar mayores esfuerzos en la formación de expertos en esta área (Programas especializados de Magíster y Doctorado), quienes sean capaces de aplicar estas nuevas leyes y directivas en los diferentes países. Hasta ahora, sólo existen algunos programas especializados sobre estos temas (p. ej. www.udec.cl/postgrado; www.unia.es).

A pesar de que la actividad minera es la principal industria que respalda el desarrollo tecnológico, la minería tiene, con frecuencia, una reputación muy negativa en la sociedad debido a la contaminación y el impacto medioambiental. Sin embargo, no cabe duda de que la minería fue y continuará siendo de gran importancia para el desarrollo de las sociedades humanas. El principal problema medioambiental de la actividad minera es la contaminación de otros recursos vitales como el agua, el suelo y el aire. Según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), la contaminación del agua producto de la minería es una de las tres amenazas principales a la seguridad y ecología en el mundo. De hecho, la competencia por el uso del agua, especialmente, entre la agricultura y la minería en regiones con escasos recursos hídricos, es muy notoria como, por ejemplo, en el desierto de Atacama de Chile y en Perú. Existe una lista interminable de proyectos mineros muy prometedores e interesantes económicamente que no pudieron comenzar a producir o tuvieron que

detener la producción debido a la oposición de las comunidades locales y a los problemas medioambientales.

La minería es una actividad compleja que involucra a una gran cantidad de distintos profesionales desde geólogos de exploración para encontrar un yacimiento de minerales, ingenieros en minas y en metalurgia en el proceso de extracción de minerales hasta la comercialización por parte de economistas y abogados. Normalmente, el impacto medioambiental se considera en la disposición final del material residual para monitorear o mitigar su impacto. Por lo general, estos diferentes grupos de profesionales no interactúan activamente durante el proceso minero. Sin embargo, para poder evitar la liberación descontrolada de elementos desde los desechos mineros, todas las partes involucradas en el proceso tienen que trabajar codo a codo desde la exploración, a través de todo el proceso de extracción de minerales, hasta la disposición final, con el objetivo de explotar de manera más eficiente todo el potencial de los metales de un cuerpo mineralizado y minimizar el impacto ambiental.

El propósito de este artículo es destacar la situación actual de la producción de metales y de los problemas medioambientales relacionados con ella (principalmente, utilizando la minería del cobre como ejemplo), y analizar las tendencias para los cambios futuros en el proceso de producción de metales con un enfoque en el aumento y la optimización de la recuperación de metales en conjunto con una minimización del impacto ambiental, es decir, operaciones mineras más sustentables.

2 Antiguos procesos mineros y producción actual de metales y sus problemas medioambientales

Un yacimiento de minerales es un enriquecimiento natural de un elemento determinado de interés económico en la

Traducción de: Dold, B. (2008): Sustainability in metal mining: from exploration, over processing towards mine waste management. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 7(4), 275-285.

corteza terrestre, que se presenta de una forma mineralógica, y que puede recuperarse por medio de las técnicas más avanzadas disponibles al momento de la explotación minera (Tabla 1).

En las primeras operaciones humanas de extracción minera, se explotaba principalmente yacimientos de minerales de alta ley (p. ej. yacimientos vetiformes) de minerales óxidos en la superficie de la tierra. Estos yacimientos eran fáciles de encontrar y de explotar, ya que estaban expuestos en la superficie y los metales podían recuperarse fácilmente por medio de la utilización de los primeros procesos metalúrgicos desarrollados por nuestros ancestros. Lo anterior se debe a los avanzados procesos de meteorización en una mineralización de óxidos, que liberaron los metales desde la mineralogía sulfurada por la oxidación; el mismo proceso que ocurre actualmente en los desechos mineros. Sin embargo, en la formación de un mineral óxido (“gossan” o montera de hierro), las cinéticas de estos procesos son más lentas debido a la densidad de la roca a oxidarse. De este modo, se supone que la liberación de elementos tóxicos al medio ambiente es más lenta y, por lo tanto, menos tóxica para el medio ambiente en comparación con la rápida

liberación a partir del material residual molido existente. Debido a que los minerales óxidos se volvieron cada vez más escasos y a que no pudieron satisfacer la creciente demanda de metales durante la industrialización, comenzó la exploración de yacimientos de minerales sulfurados. El gran descubrimiento de este tipo de yacimientos de minerales se debió al desarrollo de la técnica de flotación a fines del siglo XIX y comienzos del siglo XX (1860-1905). Esta técnica permitió la separación de los minerales de sulfuros metálicos de la mineralogía ganga y, además, permitió realizar una flotación selectiva de un mineral económicamente interesante (p. ej. calcopirita) al volver hidrofóbica la superficie del mineral, el que posteriormente flota mediante la introducción de burbujas de aire. Otros minerales sulfurados sin interés económico pueden ser suprimidos de la flotación por medio de la regulación del pH (p. ej. circuitos alcalinos), como es generalmente el caso de la pirita (FeS₂), que es el mineral accesorio más frecuente en los yacimientos de minerales sulfurados. Como resultado de esta flotación selectiva, la parte no económica, que, en el caso de los minerales de cobre, representa alrededor de un 99% y, en el de los yacimientos de oro,

Tabla 1 Concentraciones promedio de metales en la corteza terrestre con concentraciones promedio explotadas por la minería y factores de enriquecimiento.

Metal	Ø Corteza (%)	Ø Por explotación del mineral (%)	Factor de enriquecimiento	Ø En relaves mineros	Factor de enriquecimiento en relaves
Cu	0,005	0,4	80	0,1-0,3	20-60
Ni	0,007	0,5	71	0,2	28,4
Zn	0,007	4	571	2-4	275-571
Mn	0,09	35	389		
Sb	0,0002	0,5	2500		
Cr	0,01	30	3000		
Pb	0,001	4	4000	1-2	1000-2000
Au	0,0000004	0,0001	250		

Se muestra algunas concentraciones de elementos aún presentes en los relaves mineros para destacar el aún fuerte enriquecimiento de estos elementos en el material residual. Modificado según Evans (1993)

Ø = Promedio

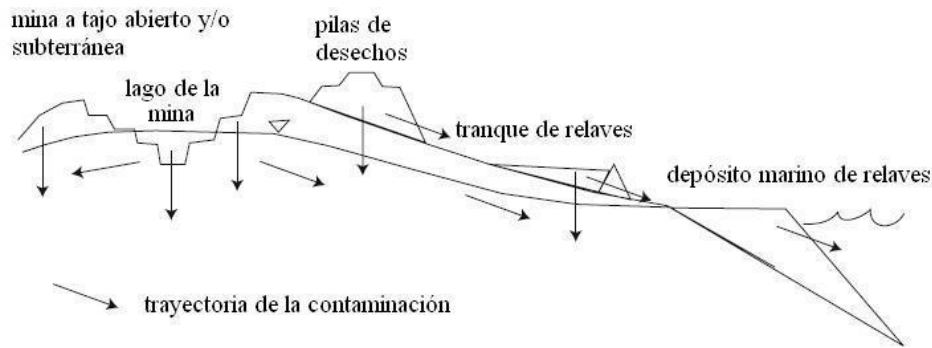


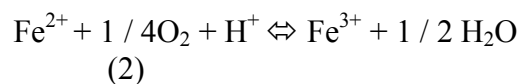
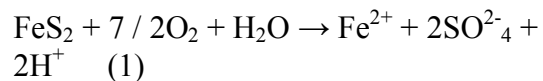
Fig. 1 La realidad del manejo de los desechos mineros en varios de los sitios mineros operativos en la actualidad. El sistema hidrogeológico no se conoce o sólo existe un conocimiento muy limitado. Los depósitos de desechos y los tranques de relaves no tienen una base impermeabilizada, lo que podría permitir en el futuro una recolección controlada y una recuperación de la solución cargada de metales. No existe una clasificación, o sólo una limitada, del material depositado.

Fig. 1 La realidad del manejo de los desechos mineros en varios de los sitios mineros operativos en la actualidad. El sistema hidrogeológico no se conoce o sólo existe un conocimiento muy limitado. Los depósitos de desechos y los tranques de relaves no tienen una base impermeabilizada, lo que podría permitir en el futuro una recolección controlada y una recuperación de la solución cargada de metales. No existe una clasificación, o sólo una limitada, del material depositado.

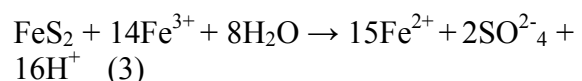
un 99,99% del material tratado, se clasifica como desecho y, en el caso particular de la flotación, se denomina “relaves¹”. Estos relaves mineros se depositan, comúnmente, en tranques de relaves² construidos o en depresiones naturales como lagos o lagunas y también en el mar para la disposición final (Fig. 1). A pesar de que este material no tiene concentraciones de metales de interés económico al momento de la extracción, aún representa un gran enriquecimiento de estos metales en relación con la corteza terrestre (Tabla 1) y contiene otros minerales sulfurados como pirita, arsenopirita (FeAsS), enargita (Cu₃AsS₄), galena (PbS) y esfalerita (ZnS), que pueden ser la fuente para una futura liberación descontrolada de metales. Los tranques de relaves modernos de minas de Cu promedian alrededor de 0,1 % Cu (Smuda et ál. 2008), mientras que el material de relaves más antiguo aún puede contener concentraciones de entre 0,2 y 0,6 % Cu (Dold y Fontboté 2001; Dold 2006a). El problema del material de desechos mineros sulfurados es su exposición descontrolada a las condiciones de oxidación en la superficie terrestre durante el proceso de extracción. Los minerales sulfurados como la pirita se formaron en condiciones reductoras en la corteza terrestre. Una vez

que podrían permitir en el futuro una recolección controlada y una recuperación de la solución cargada de metales. No existe una clasificación, o sólo una limitada, del material depositado.

que son expuestos a condiciones de oxidación en la superficie, dejan de ser estables y experimentan una oxidación con la formación de ácido sulfúrico (ecuación 1) y la liberación de metales pesados y otros elementos tóxicos, como el arsénico, al medio ambiente. En la ecuación 1 se describe la fase inicial de la oxidación de pirita, cuando este material se expone, por ejemplo, a oxígeno atmosférico en la superficie de un tranque de relaves. Una vez que se produce hierro férrico por la oxidación de hierro ferroso (ecuación 2), oxidación que puede ser fuertemente acelerada por la actividad microbológica, especialmente en condiciones de pH bajo, el hierro férrico es el oxidante primario (ecuación 3) de la pirita (Nordstrom 1982; Moses et ál. 1987; Ehrlich 1996).



Cinéticas de reacción fuertemente aumentadas a un pH bajo (<4) debido a la actividad microbiana (p. ej. *Acidithiobacillus* spp., *Leptospirillum* spp.)



¹ También llamado colas o jales.

² Diques de jales; estanques de colas

Traducción de: Dold, B. (2008): Sustainability in metal mining: from exploration, over processing towards mine waste management. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 7(4), 275-285.

Debido a las condiciones ácidas producidas durante estos procesos, la mayoría de los metales pesados son móviles y pueden contaminar los recursos hídricos subterráneos y de la superficie. Este fenómeno es mejor conocido como drenaje ácido de mina (DAM). Por ejemplo, el caso de los depósitos de relaves en las costas marinas de la Bahía de Chañaral en Chile destaca bien la situación y fue clasificado por el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), en el año 1983, como uno de los casos más serios de contaminación marina en la Cuenca del Pacífico. Durante la disposición de los relaves en el periodo entre 1938 y 1975, que se originó a partir del distrito minero de pórfido cuprífero Proterillos, El Salvador, la recuperación era menos eficaz que en las operaciones actuales. Por lo tanto, el material depositado aún contiene alrededor de 0,3 % Cu (Dold 2006a). Debido a los altos precios actuales del cobre junto con el hecho de que el material es chancado y molido (lo que representa un 30% de los costos de operación en la minería), se considera como un potencial recurso y de hecho se explora para su posible explotación. De este modo, el retratamiento de muchos desechos mineros antiguos puede ser una primera opción para la remediación de un sitio minero antiguo, lo que posibilita reubicar el material, reprocesarlo y depositarlo de una manera segura y definitiva.

Se resalta la complejidad de definir si un material es clasificado como desecho o mineral en un sitio minero por medio del siguiente ejemplo. En la actualidad todavía existen minas de cobre muy ricas (1–2 % Cu), que tienen una ley de mineral de corte de alrededor de 0,6 % Cu (es decir, el material con menos de 0,6 % no se considera como mineral), mientras que otras minas de pórfido cuprífero menos ricas operan con bastante éxito con una ley de mineral total de

0,6–0,7 % Cu. Hasta el momento, la exploración de nuevos descubrimientos tiene como objetivo incluso cuerpos mineralizados con 0,4 % Cu. Por lo tanto, la decisión de si un determinado mineral se clasifica como material de desecho o mineral depende de varios factores, que incluyen el precio actual del metal durante la explotación, la ley de mineral del yacimiento, las decisiones personales de la gerencia, las prioridades locales, las tecnologías disponibles, la complejidad de la mineralogía del mineral, el comportamiento geometalúrgico del mineral y la recuperación, etc. En la historia de la minería se ha demostrado que hace 30 años no era posible imaginar que el material con 0,5 % Cu pudiese ser una ley de mineral factible para las operaciones de la minería económica. Por eso, mientras el material tratado en una mina tenga concentraciones de metal más altas que la concentración promedio en la corteza terrestre, y las concentraciones de metal estén presentes en una forma mineralógica, que es explotable, podría ser de interés para las generaciones futuras para la recuperación de metal (considerando que también en el futuro existirá una modernización de las tecnologías de extracción).

Una vez que el material se clasifica como desecho, se retira del flujo de producción y su disposición final hace muy difícil poder reintegrarlo al proceso productivo. Uno de los mayores problemas del pasado y de la actualidad es la disposición del material que contiene sulfuros sin tomar ninguna medida de seguridad para evitar la infiltración de soluciones contaminadas a las aguas subterráneas y de la superficie. Por ello, esta disposición descontrolada del material residual, que era común en el pasado, junto con las galerías de antiguas minas y las unidades de rocas fracturadas debido al uso de explosivos durante la explotación son en la actualidad la principal fuente de contaminación del agua por la formación de drenaje ácido de mina. Para remediar estos

Traducción de: Dold, B. (2008): Sustainability in metal mining: from exploration, over processing towards mine waste management. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 7(4), 275-285.

sitios mineros antiguos, se debe incurrir en enormes gastos económicos en un escenario a largo plazo. Por ejemplo, los contribuyentes alemanes desembolsaron 6.600.000.000 de euros desde la reunificación de Alemania en el año 1989 para la remediación de la región de la mina de uranio de Wismut en la antigua Alemania Oriental (www.wismut.de). Los costos de la remediación de los desechos mineros en Estado Unidos y Canadá se calcula que son entre 1 a 2 mil millones de dólares por año. En Chile, existen más de 1.000 tranques de relaves registrados (Ingeniería y Geotecnia LTDA 1990) y se calcula que, en Perú, existe una cantidad similar. La mayoría de estos tranques aún tienen que ser remediados. En vista de estas cantidades, prevenir esos gastos futuros es de gran importancia para una operación minera sustentable.

En la actualidad, existen estudios en ejecución para implementar la lixiviación *in situ* del material residual, con concentraciones de metal interesantes (p. ej. relaves con 0,3 % Cu), en una gran cantidad de minas debido al alza de los precios del metal y también, porque esta técnica tiene el costo de operación más bajo (du Plessis et ál. 2007). Desafortunadamente, este proceso se realiza con frecuencia sin bases impermeabilizadas y sin el conocimiento exacto de la trayectoria de flujo de la solución de lixiviación ("PLS"), lo cual puede representar un alto riesgo para las aguas subterráneas y de la superficie.

3. Lecciones aprendidas

La solubilización de metales pesados en entornos ácidos por los procesos biogeoquímicos no es sólo un problema medioambiental durante la formación de drenaje ácido de mina (Dold y Fontboté 2001; Dold et ál. 2005; Diaby et ál. 2007). Es un proceso natural (Schwertmann et ál. 1995), que siempre ocurre donde los

minerales sulfurados están expuestos a condiciones de oxidación, por ejemplo, por medio de procesos de erosión. En la actualidad, los seres humanos utilizan los mismos procesos biogeoquímicos para la recuperación de metales por biolixiviación en pilas o el proceso de lixiviación en reactores (Schippers et ál. 2007; Demergasso et ál. 2005; Donati y Sand 2007; Rawlings y Johnson 2007). El rol crucial de la interacción microbiana en la oxidación de sulfuros se identificó hace mucho tiempo (Colmer y Hinkle 1947) y ahora tiene gran aceptación y se aplica cada vez más en las operaciones de lixiviación en pila (Johnson y Hallberg 2003; Rawlings y Johnson 2007). Más recientemente, se sugiere en algunos estudios que estos procesos están y estuvieron involucrados en la formación de yacimientos de minerales exóticos y supérgenos (Southam y Saunders 2006), como en el caso de las minas Exótica y Chuquicamata, Chile (Dold 2003; Dold 2006b). Por eso, el mismo proceso biogeoquímico forma, en un caso, un yacimiento de minerales y, en otro, es utilizado como un proceso de beneficio de metales muy efectivo. Sin embargo, si ocurre de modo descontrolado en los desechos mineros, es responsable de un enorme problema medioambiental (Fig. 2).

La principal diferencia es el margen de tiempo que estos tres sistemas diferentes (biominería, formación de DAM y formación de minerales supérgenos) necesitan para completar su tarea. En el caso de una operación de lixiviación en pila o en reactores, el sistema requiere varios días, semanas o meses para que ocurra el proceso de lixiviación, mientras que los desechos mineros continúan generando drenaje ácido de mina después de décadas o siglos posteriores a la disposición, y, en el caso de la formación de minerales supérgenos, se supone que el proceso dura miles hasta millones de años (Mote et ál. 2001a; Dold 2003). Además, al chancar y al moler el

Traducción de: Dold, B. (2008): Sustainability in metal mining: from exploration, over processing towards mine waste management. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 7(4), 275-285.

material para lograr una mejor recuperación durante la flotación, también se aumenta la superficie del material y, por consiguiente, las cinéticas de la oxidación sulfurada después de la disposición. De este modo, la atenuación natural de los ecosistemas, donde el material está depositado, no puede controlar la liberación intensificada de metales en un corto periodo de tiempo.

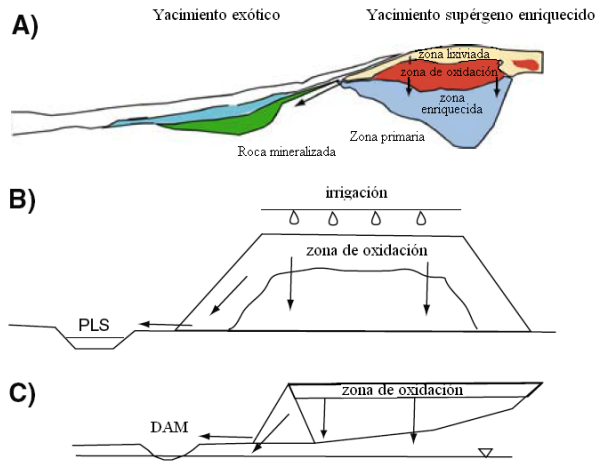


Fig. 2 Presentación esquemática de los tres sistemas, donde la oxidación biogeoquímica de sulfuros inicia la movilización de metales: (a) formación supérgena de minerales con la formación de un yacimiento exótico lateral como sumidero para las soluciones ácidas ricas en metales que se origina a partir de la zona de oxidación del yacimiento mineral de pórfido cuprífero Chuquibambilla, Chile como ejemplo, de acuerdo con Munchenmayer (1996), (b) proceso de biolixiviación, con la recuperación controlada de la solución de lixiviación (PLS) y la recuperación de los metales por la extracción por solventes (SX)/electroobtención (EW), y (c) formación descontrolada de drenaje ácido de mina (DAM) a partir de los desechos mineros con el agua subterránea y de la superficie, como sumidero para los elementos liberados.

Otro problema en la gestión medioambiental de las actividades mineras es la aplicación de los niveles de acción para determinados elementos con respecto a los estándares del agua. En el pasado, una gran cantidad de países en vías de desarrollo aplicaron la práctica de copiar ciertas normativas del hemisferio norte. Un buen ejemplo es el de $10\mu\text{g/l}$ para el arsénico como directriz de la OMS para las normativas de agua potable. Esta medida es acertada e importante desde el punto de vista de la salud humana si el agua efectivamente se utiliza como agua potable. Sin embargo,

por ejemplo, en la Cordillera de los Andes, muchos ríos tienen concentraciones naturales de entre 500 y $1.400\mu\text{g/l}$ arsénico (p. ej. río Locumba en el sur de Perú (Diaby et ál. 2006) o río Loa en el norte de Chile (Romero et ál. 2003)). Por eso, los niveles de acción para el control de calidad del agua utilizada en la actividad minera deben adaptarse a las realidades locales del contexto natural. En la actualidad, esto es un tema primordial para las nuevas operaciones mineras vigentes para poder establecer los niveles de referencia locales de los diferentes elementos en la futura zona minera. Lamentablemente, este aspecto se ignoró por completo en el pasado, lo que hace muy difícil, o imposible en muchos casos, evaluar la contaminación natural en las antiguas zonas mineras y el impacto de las operaciones de la minería. Actualmente, existen diferentes enfoques utilizados en un intento por establecer los niveles de referencia previos a la actividad minera, como por ejemplo, la extrapolación de los valores de referencia de las cuencas en los alrededores de la operación minera (Kelley y Taylor 1997; Runkel et ál. 2007).

En los años 40 y 50, se dio a conocer los primeros efectos de la minería de cobre y de sulfuros y se demostró la importancia de las interacciones microbianas en la formación de drenaje ácido de mina (Colmer y Hinkle 1947). En los últimos años, se publicó los primeros resultados a largo plazo de los primeros enfoques de remediación de los desechos mineros, donde se comprueba que una gran cantidad de estos enfoques no eran exitosos (Holmstrom y Ohlander 1999). La mayoría de las estrategias de remediación utilizadas en la actualidad intentan evitar la infiltración de agua y oxígeno a los desechos mineros, con el objetivo de impedir la oxidación y la contaminación de los recursos hídricos. Sin embargo, son cada vez más los resultados a largo plazo, en los que se demuestra que la oxidación no puede impedirse por completo por medio de las

Traducción de: Dold, B. (2008): Sustainability in metal mining: from exploration, over processing towards mine waste management. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 7(4), 275-285.

cubiertas geotécnicas y los sistemas de cubierta húmeda, según lo que señala (Holmstrom et ál. 2001), estos sistemas sólo desaceleran el proceso. De este modo, la interrogante sobre una estrategia a largo plazo persiste respecto a si los sistemas de cubierta son la elección correcta o si las estrategias geoquímicas de los procesos de retención podrían ser más exitosas en un control a largo plazo de la movilidad de los metales. Si se observa la naturaleza, se puede ver que en la zona no saturada de meteorización y oxidación de los yacimientos de minerales (Brimhall et ál. 1985; Mote et ál. 2001b) o de los suelos (Giesler et ál. 2000; van Hees et ál. 2002), las unidades de roca masivas fueron alteradas y oxidadas con el tiempo (Münchmeyer 1996), lo que genera una gran movilización de los elementos por los procesos biogeoquímicos. Es sólo una cuestión de tiempo y si el sistema tiene la capacidad suficiente para diluir el elemento liberado hasta alcanzar un nivel que no sea tóxico para los ecosistemas circundantes. No es muy realista pensar que con unos pocos centímetros o metros de cubiertas y de membranas tipo geotextile se podría evitar que el oxígeno siga su instinto natural de oxidar todo lo que pueda ser oxidado en un escenario a largo plazo. Por ahora, se tiene previsto que una solución sustentable a largo plazo tiene que durar, por lo menos, 10.000 años según la nueva Directiva de la UE sobre el manejo de desechos de las industrias extractivas. Por eso, un enfoque que no pretende impedir la oxidación, sino que más bien promoverla de una forma controlada, y en periodos a largo plazo, podría ser una estrategia más exitosa para los desechos sulfurados. La oxidación sólo se puede impedir si se garantiza que el material, que contiene sulfuros, se redeposita en condiciones permanentes de reducción sin oxidación durante el proceso de explotación (p. ej. relleno bajo el nivel del agua subterránea). En el caso de que la oxidación

no pueda evitarse, la implementación de colectores y barreras geoquímicas, que con frecuencia se observan en la atenuación natural, puede ayudar a mitigar el impacto ambiental del DAM.

4 Sustentabilidad en la minería

La minería es y será siempre una actividad destructiva con un alto impacto ambiental. Es por eso que un enfoque de minería sustentable sólo puede tener como objetivo el optimizar la extracción de metal del mineral, lo que significa aumentar los beneficios financieros, en combinación con la minimización del impacto ambiental, y también reduce los costos de remediación. En la historia de la minería se ha demostrado que el material, que era considerado desecho en el pasado, puede ser hoy un recurso rentable debido al perfeccionamiento de las técnicas de extracción y a los cambios en el medio económico. Por lo tanto, con esta lección en mente, cualquier material de un área minera debiera considerarse, en una visión a largo plazo, como parte del yacimiento de minerales, mientras éste represente un enriquecimiento de los metales en relación con la concentración promedio presente en la corteza terrestre.

4.1 Exploración

La decisión sobre que tipo de yacimiento de minerales se explora y si puede explotarse desde un punto de vista económico y medioambiental, comienza con la exploración del tipo de yacimiento de minerales. Existen algunos tipos de yacimientos de minerales que tienen una mayor tendencia a producir impactos ambientales negativos, como el drenaje ácido de mina, que otros yacimientos (Plumlee 1999). Los cuerpos mineralizados masivos y ricos en pirita, como aquellos presentes en el Cinturón Pirítico Ibérico de España (Navarro et ál. 1993; Braungardt et

Traducción de: Dold, B. (2008): Sustainability in metal mining: from exploration, over processing towards mine waste management. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 7(4), 275-285.

ál. 2003; Galan et ál. 2003; Sanchez Espana et ál. 2005) o en Cerro de Pasco en Perú (Smuda et ál. 2007; Dold et ál. 2008), representan un alto riesgo medioambiental debido a la enorme cantidad de pirita y de la presencia de elementos peligrosos como el arsénico. Existen muchos ejemplos de yacimientos de minerales factibles económicamente, que no comenzaron a operar debido a la presencia de altas concentraciones de arsénico u otros elementos tóxicos, especialmente, aquellos que forman oxianiones en solución y que por eso son móviles en condiciones de pH neutro (p. ej. As, Mo, Cr, Se). Esta restricción de la explotación a causa de las preocupaciones medioambientales se produce, principalmente, en las sociedades más desarrolladas (p. ej. Europa, Norte América, Australia), que no dependen completamente de la explotación de sus recursos primarios. En los países en vías de desarrollo, la dependencia de los ingresos a partir de los recursos primarios, como la industria de minerales, es muy alta y desplaza los problemas medioambientales a un segundo plano. Sin embargo, la investigación de exploraciones futuras debiera tomar en cuenta este problema y enfocarse en la búsqueda de patrones de exploración para los llamados “minerales limpios”, que tienen mejores oportunidades de ser explotados y cuyos costos medioambientales son menores.

4.2 Explotación

Una vez que se encuentra el yacimiento de minerales y se programa el inicio de las operaciones, es crucial realizar, además del estudio obligatorio de impacto medioambiental, un estudio de referencia detallado de las condiciones naturales previas a la actividad minera. Este estudio tiene que incluir una evaluación de la especiación de los elementos, con el objetivo de tratar la posible movilidad de estos al

medio ambiente, y también un conocimiento detallado del sistema hidrogeológico en el que se realizará la explotación y en las áreas de las posibles instalaciones para las operaciones o desechos. Los yacimientos de minerales son zonas naturales de enriquecimiento de elementos y, por eso, los niveles naturales en los suelos y el agua en estas áreas también son, por lo general, más altos que en cualquier otro lugar. De este modo, las exigencias legales para las menores concentraciones permitidas de los elementos deben adaptarse a la situación natural del lugar.

Con el propósito de aumentar la recuperación de metal de la masa metálica total presente en el mineral y de minimizar los elementos, que pueden escapar de modo descontrolado durante la operación minera, debiera realizarse una clasificación detallada de todas las unidades de roca en el área de explotación minera. Esta clasificación de las unidades de roca debiera incluir las concentraciones de metal (no sólo los elementos económicos, sino que también los peligrosos), su especiación (fases mineralógicas con las que están relacionadas) y el potencial que tienen para producir acidez o neutralizarla (Balance ácido-base, BAB), en conjunto con pruebas para predecir las cinéticas de liberación de los elementos. La clasificación en minerales, minerales de baja ley y minerales de muy baja ley puede favorecer la formación de productos finales que pueden tratarse en base a su composición mineralógica y puede predecirse las cinéticas de liberación de los elementos por medio de la combinación optimizada de los procesos de beneficio. La elección sobre qué combinación de los procesos de beneficio funciona mejor, debe evaluarse, en cada caso específico, por separado.

Por ejemplo, los botaderos producen rápidamente una solución ácida (Strömberg y Banwart 1994; Ritchie 1994; Smuda et ál. 2007), mientras que los relaves pueden

Traducción de: Dold, B. (2008): Sustainability in metal mining: from exploration, over processing towards mine waste management. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 7(4), 275-285.

necesitar décadas o siglos antes de producir DAM (Dold et ál. 2005). Esta diferencia se debe principalmente a la permeabilidad para el aire y el agua, en combinación con el área de la superficie de las partículas, que, en el caso de los relaves, tiene como resultado una reacción más completa de todos los agentes (minerales productores como también neutralizadores de ácido). Por el contrario, en los botaderos, donde el rápido acceso del oxígeno y del agua garantiza una oxidación rápida de sulfuros, las reacciones no pueden completarse debido a la presencia de grandes bolones de rocas, en las que una parte importante de los reactivos pueden protegerse de la oxidación. La aleación de material de desechos sólidos chancados y de muy baja ley (p. ej. 0,1–0,4 % Cu) con

relaves (0,1 % Cu) podría aumentar la permeabilidad, de modo que los relaves podrían ser lixiviados de manera más efectiva y rápida que en tranques de relaves tradicionales, y el Cu también sería liberado mejor en los desechos sólidos chancados.

4.3 Procesos de beneficio

La elección del proceso de beneficio en una operación minera depende de parámetros como la mineralogía, el clima, los aspectos económicos, la infraestructura, etc., y debe evaluarse específicamente en cada caso. Esta claro que en una operación minera, la principal parte de la ganancia se necesita en el momento de la operación para compensar la enorme inversión necesaria para la actividad minera (Fig. 3).

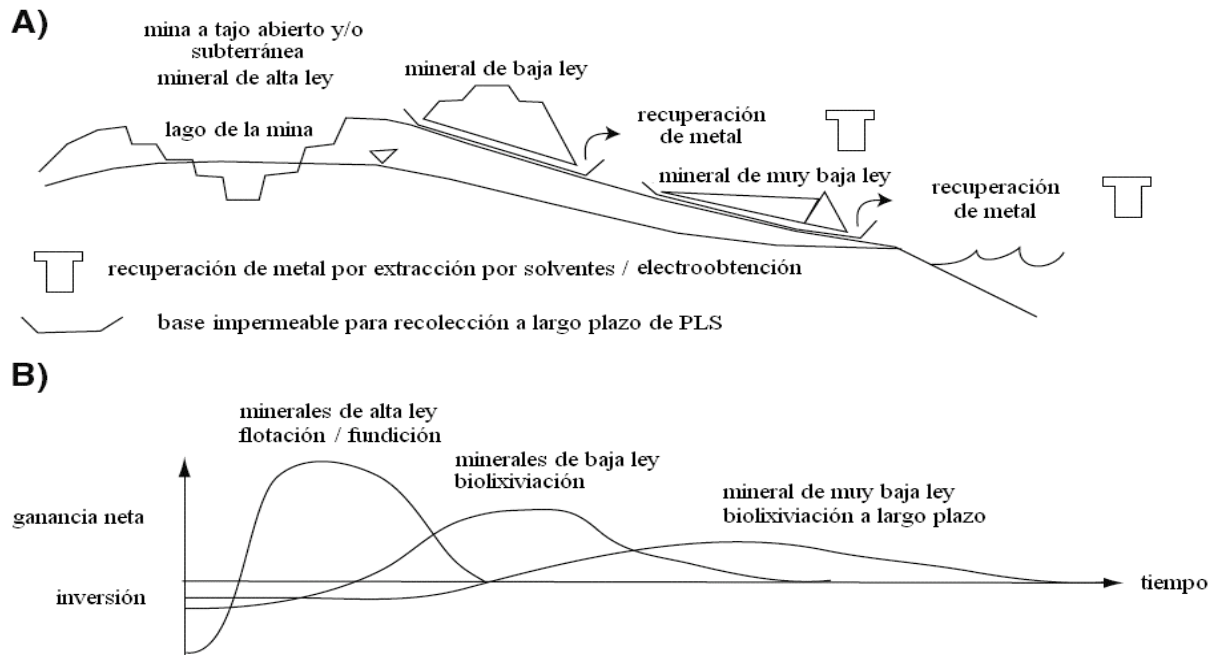


Fig. 3 (a) En una operación minera sustentable, el material no se expone sin el control del material depositado y de los posibles flujos de elementos. El material es clasificado, registrado y extraído con el fin de optimizar la ganancia económica para la compañía minera durante la operación y para asegurar que el material de baja ley y el de muy baja ley se manejen según las cinéticas necesarias para la recuperación de metal. La gran diferencia en este escenario es que las futuras generaciones no recibirán como herencia un problema medioambiental extremadamente costoso, sino que un sistema, que entrega ganancias netas lentas

pero seguras en el futuro. Por eso, en la planificación y la operación se debe aplicar un enfoque completamente interdisciplinario desde la exploración, la planificación económica, la explotación y el proceso de recuperación de metal hasta la disposición final de los materiales. (b) Visión simplificada y esquematizada de los resultados financieros y los costos de inversión de una operación minera sustentable asociada a las diferentes leyes de mineral en una operación minera con respecto al tiempo.

Traducción de: Dold, B. (2008): Sustainability in metal mining: from exploration, over processing towards mine waste management. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 7(4), 275-285.

Por lo tanto, siempre habrá una combinación de procesos, que permiten una concentración rápida y eficiente de los principales minerales de la mena a partir del mineral de alta ley (p. ej. flotación, separación magnética, etc. y fundición), y procesos más lentos para los minerales de baja ley tales como en la operación de lixiviación en pila (0,4–0,7 % Cu), práctica utilizada en la mina La Escondida, Chile (Domic 2007). Si se logra alear los relaves de flotación de muy baja ley (0,1 % Cu) junto con otro material de muy baja ley del mineral (0,1–0,4 % Cu), se podría producir un material que puede ser depositado y procesado con cinéticas de oxidación más bajas. Si estas operaciones se desarrollan para recuperar la PLS y para impedir las infiltraciones de cualquier PLS al agua subterránea, pueden generar beneficios económicos para las futuras generaciones en lugar de altos costos de remediación (Fig. 3). Este procedimiento volvería al “material residual” con 0,1–0,4 % Cu, el que aún representa un factor de enriquecimiento de 20-80 (Tabla 1), accesible como fuente de metales en lugar de ser clasificado y depositado como desecho.

La importancia de la geomicrobiología en el proceso de oxidación de sulfuros (Banfield y Nealson 1997; Nordstrom y Southam 1997) y la formación de drenaje ácido de mina (Schrenk et ál. 1998; Baker y Banfield 2003) ha sido analizada ampliamente (Donati y Sand 2007). El conocimiento de los microorganismos en la biolixiviación (Schippers 2007) y los mecanismos bioquímicos en la oxidación de sulfuros (Rohwerder y Sand 2007) han demostrado un avance significativo en las últimas décadas.

También existen esfuerzos importantes para promover la biominería, como, por ejemplo, por medio del Proyecto Integrado del Sexto Programa Marco de la CE “BioMina” www.biomine.brgm.fr y para comprender el genoma de la bacteria

presente en los entornos de oxidación de sulfuros (Holmes y Bonnefoy 2007), con el fin de optimizar las operaciones de la biominería y oxidar los minerales sulfurados más resistentes como la calcopirita (du Plessis et ál. 2007; Plumb et ál. 2007). La calcopirita sólo puede oxidarse de manera efectiva por medio de la bacteria termófila a temperaturas elevadas en operaciones de lixiviación en pila o en reactores (Plumb et ál. 2007). Sin embargo, el objetivo es lixiviar eficientemente la calcopirita con un conjunto de bacterias mesófilas en las operaciones de la minería industrial. Lo anterior repotenciaría la biominería como la tecnología futura de beneficio, debido a los costos de mantenimiento y de energía más bajos y al menor impacto ambiental (sin emisiones descontroladas de SO₂ y CO₂ a la atmósfera y recolección y tratamiento controlados de las soluciones ácidas cargadas de metal).

4.4 Manejo de los desechos finales

Una vez que se libera el potencial ácido total de la mineralogía sulfurada y que se completa la liberación de metal, un acondicionamiento final del material puede reestablecer la superficie para un uso final del suelo. Sin embargo, dependiendo de la mineralogía del material residual final, en combinación con las condiciones climáticas, se debe realizar una evaluación del riesgo de la liberación posterior de elementos. Por ejemplo, si el arsénico u otros elementos presentes en forma de oxianiones están asociados a los hidróxidos de Fe(III) secundario, el material debiera mantenerse en condiciones óxicas. Por el contrario, habría un riesgo de liberación de estos elementos debido a la disolución reductora de los minerales huésped (p. ej. schwertmannita o jarosita) si se implementara una cubierta estándar. En este caso, una cubierta de grava inerte impediría

Traducción de: Dold, B. (2008): Sustainability in metal mining: from exploration, over processing towards mine waste management. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 7(4), 275-285.

el transporte eólico y garantizaría las condiciones óxicas.

En cualquier proceso minero, siempre habrá una cierta cantidad de material residual que debe depositarse como desecho final y tendrá que confinarse en áreas especiales y selladas para la disposición de desechos. El objetivo siempre debe ser minimizar el tamaño de estos desechos con el fin de reducir los costos de disposición final.

5 Conclusiones

La minería del carbón y de minerales sulfurados ha producido en el último siglo cantidades enormes de material residual que tiene como resultado graves problemas medioambientales. La remediación de los sitios mineros tiene un gran costo para la sociedad; costos que se pagan con el dinero de los contribuyentes. Los conocimientos previos de los efectos de la disposición descontrolada de desechos de la minería de metales deben producir un cambio en la mentalidad sobre la prevención de la liberación descontrolada de metales al medio ambiente. Una clave para las actividades futuras de la minería sustentable es que todos los participantes en el proceso minero (industria, agencias gubernamentales (p. ej. EPA, ministerios, institutos de estudios geológicos, partes interesadas) tengan los conocimientos sobre los procesos geoquímicos que conllevan a estos problemas y sobre las mejores técnicas disponibles para controlar estos sistemas. Es importante que cada parte acepte que todo sitio minero es único y que no puede existir una fórmula mundial para manejar este tipo de problemas.

El mayor conocimiento en la comprensión de los procesos biogeoquímicos, que producen la oxidación de sulfuros y la posterior formación de drenaje ácido de mina y la formación de minerales supérgenos, se aplica cada vez

más en las operaciones de biolixiviación para el material mineral de baja ley. La aplicación de estos principios en el material de muy baja ley es un desafío importante en las operaciones de la gran minería, con un enorme potencial en la aplicación industrial. Esto brinda la posibilidad de mejorar los resultados económicos de un yacimiento de minerales en una perspectiva a largo plazo al extraer el contenido metálico total y al impedir la liberación descontrolada de contaminantes al medio ambiente. En definitiva, el enfoque de la minería sustentable tiene un doble efecto positivo.