



Consejo Económico y Social

Distr. general
2 de febrero de 1998
Español
Original: inglés

Comité de Recursos Naturales

Cuarto período de sesiones

10 a 19 de marzo de 1998

Tema 6 del programa provisional*

**Problemas de protección y rehabilitación del medio ambiente
provocados por actividades de la industria minera**

Tecnologías más avanzadas para aprovechar y reelaborar los desechos de la industria minera

Informe del Secretario General

Resumen

El presente informe se ha preparado en respuesta a la decisión 1996/306 del Consejo Económico y Social. En el informe se describen el aprovechamiento y la reelaboración de desechos minerales dentro del contexto más amplio de la incorporación cada vez más intensiva de tecnologías de reducción en la fuente. Se ha hecho hincapié en los desechos sólidos provenientes de la extracción y el tratamiento de menas de metales ordinarios y preciosos, puesto que dichos desechos provocan algunos de los efectos más tenaces y persistentes sobre el medio ambiente. Sin embargo, cuando sea pertinente se presentan también ejemplos de otros subsectores de la industria minera. Aunque el informe se centra en los desechos de la industria minera, algunas de las tecnologías y prácticas que se examinan también pueden ser aplicables a suelos contaminados y otros sólidos portadores de metales.

* E/C.7/1998/1.

Índice

	<i>Párrafos</i>	<i>Página</i>
I. Introducción	1	3
II. Producción de desechos en la industria minera y cuestiones conexas	2-8	3
III. Aprovechamiento y reelaboración	9-13	4
IV. Factores que afectan el aprovechamiento y la reelaboración de desechos	14-16	4
V. Minería (extracción) y desechos potenciales	17-18	5
VI. Elaboración de minerales y generación de desechos potenciales	19-23	5
VII. Metalurgia extractiva y generación de desechos potenciales	24-31	6
A. Hidrometalurgia	25-29	6
B. Pirometalurgia	30-31	7
VIII. Últimos adelantos en materia de aprovechamiento de desechos minerales	32-35	7
A. Factores que limitan el aprovechamiento de los desechos minerales	32	7
B. Aprovechamiento <i>in situ</i>	33-34	8
C. Aprovechamiento fuera del lugar de explotación	35	8
IX. Reelaboración de desechos minerales	36-40	8
A. Reelaboración de desechos para recuperar sulfuros generadores de ácido ...	36-38	8
B. Reelección mediante la biolixiviación	39	9
C. Opciones al uso de cianuro en la recuperación de oro	40	9
X. Enfoques al aprovechamiento, la reelaboración y la reducción en la fuente	41-48	10
A. Reducción en la fuente en la minería, la elaboración de minerales y la metalurgia extractiva	41-45	10
B. Del tratamiento y la eliminación de desechos a la prevención de la producción de desechos y viceversa	46-48	10
XI. Conclusiones: perfeccionamiento de la reducción de desechos en su fuente, de su reelaboración y de su aprovechamiento	49-50	11
Bibliografía		13

I. Introducción

1. La disponibilidad de ricos recursos geológicos en combinación con condiciones de mercado que en gran medida escapan al control de las empresas productoras de metales ha dado lugar a un sector que se caracteriza por un escaso nivel de innovación tecnológica. Sin embargo, ahora se ha desplazado el centro de atención; tras un período de evolución tecnológica limitada, el desarrollo de la tecnología en la industria minera se ha visto instigado por la preocupación del público por los efectos desfavorables sobre el medio ambiente y la elaboración de reglamentación ambiental que obliga a las empresas a mitigar o prevenir esos efectos. El predominio que rige en la actualidad de la “ordenación de desechos”, a diferencia de la “prevención de la contaminación”, quizás sea una reflexión de la actitud imperante para con el cierre de faenas, a saber, que un método de saneamiento al estilo de la ingeniería civil es suficiente para dejar fuera de servicio un predio en debida forma y evitar una posible responsabilidad en el futuro. Sin embargo, aunque ello quizás haya sido válido hace 20 años, la tecnología, la legislación y las expectativas de los interesados han cambiado desde entonces, y si hay un tema genérico que vincula los métodos actuales de ordenación de desechos, es la posibilidad de litigios y responsabilidad en el futuro vinculados a lo que podrían considerarse soluciones de corto plazo (aunque relativamente económicas) a los problemas ambientales de largo plazo.

II. Producción de desechos en la industria minera y cuestiones conexas

2. Los metales y otros recursos minerales rara vez se hallan en estado suficientemente puro para venderse “tal como se extraen de la mina”. Los metales suelen hallarse en combinación química con oxígeno (como óxidos), azufre (como sulfuros) u otros elementos (cloruros, carbonatos, arseniatos, fosfatos, etc.). Los recursos no metálicos (carbón, minerales industriales) también suelen contener impurezas adheridas física o químicamente en su estado no perturbado.

3. Aunque cualquier operación unitaria dentro del ciclo de vida útil de una explotación minera tiene posibilidades de producir efectos sobre el medio ambiente, en los casos habituales las posibilidades provienen de la descarga deliberada (reglamentada) y accidental (no reglamentada) de productos de desecho sólidos, líquidos y gaseosos. Las características de dichas descargas, el carácter del medio receptor y la distancia a la que se transfieren las descargas son

importantes factores en la determinación de la magnitud de sus efectos o repercusiones. Los valores y las preferencias de la sociedad también intervienen en forma importante en la estimación de la forma en que ciertas descargas son consideradas por diversos grupos de interesados; por consiguiente, este agregado más subjetivo a las características cuantificables y mensurables de la descarga y el medio receptor determina en parte la carga ecológica propia del predio de una explotación.

4. En grado cada vez mayor, basándose en una comprensión más detallada de los posibles efectos, la presión en pro de la protección del medio ambiente puede supeditar la justificación para explotar determinadas reservas de mineral (Hodges, 1995). La industria en su conjunto, en asociación con la gama más amplia posible de interesados, debe esforzarse por lograr niveles cada vez mejores de desempeño en el control y la ordenación del proceso de extracción minera durante todo el ciclo de vida útil de una explotación. Esto incluye procurar un mayor nivel de eficiencia en el aprovechamiento de recursos.

5. La principal fuente de desechos sólidos de la extracción minera y la elaboración posterior es la “ganga” (minerales inútiles o de valor subeconómico vinculados al mineral o los minerales económicos o que se desea extraer). Dependiendo del punto en que se elimina del proceso la ganga puede eliminarse en el estado en que se extrae (roca estéril), como relaves (luego de la elaboración de minerales), como escorias (después de la fundición) o como otros productos de desecho (polvos, fangos derivados del tratamiento de agua, mena agotada de la lixiviación, etc.). Estos diversos desechos también pueden contener cantidades apreciables del mineral o metal que se desea obtener, debido a ineficiencia en la elaboración, limitaciones tecnológicas o factores mineralógicos.

6. También hay una transacción entre la ley (la concentración de metal o metales en el producto final o intermedio) y la recuperación (porcentaje del total del metal o los metales valiosos contenidos en la alimentación de la planta elaboradora que resulta como producto comerciable). Es posible mantener una ley muy alta rechazando una fracción apreciable del material de insumo (es decir, aceptando una recuperación escasa) o una recuperación muy elevada, diluyendo excesivamente los concentrados con material de menor ley. Sin embargo, ninguno de estos dos extremos suele ser la solución económica óptima. En términos simples ésta se determina comparando los ingresos generados por la recuperación adicional de metal o metales con los costos de capital y explotación necesarios para lograrla, dentro del contexto más amplio de la viabilidad técnica. Sin excepción, cierta parte

del metal o los metales que se desea obtener acabará como desechos, junto con los minerales de la ganga.

7. En el caso de la extracción de metales no ferrosos, la ganga suele ser el componente principal de un criadero. Esto es evidente sobre todo en el caso del oro, en que la concentración del material valioso es tan reducida —normalmente 5 gramos o menos por tonelada— que en efecto toda la mena extraída se vierte como desecho en alguna forma, a menos que también estén presentes algunos otros componentes valiosos, como metales ordinarios. Otros recursos minerales pueden contener menos ganga en relación con el mineral que se ha de obtener, pero en general la eliminación de desechos relacionados con la ganga no deja de ser una cuestión importante y en muchas explotaciones mineras el vertimiento de desechos es una parte tan importante de la explotación como la extracción de recursos.

8. Evidentemente, el proceso de eliminación de desechos relacionados con la actividad minera es una fuente apreciable de sustancias potencialmente nocivas en el medio natural. Sin embargo, los insumos no ocasionan necesariamente daños al medio ambiente; pueden existir muchos factores mitigantes, algunos relacionados con el proceso, como las características químicas y físicas de los desechos, y otros relacionados con el medio externo, como el clima, la topografía o las características del ecosistema.

III. Aprovechamiento y reelaboración

9. El aprovechamiento y la reelaboración son dos de una variedad de técnicas de “etapa final” o de “saneamiento” destinadas a hacer frente a las cuestiones ambientales vinculadas a la producción de desechos en la industria minera. Históricamente, los métodos que utilizan tecnologías baratas en la etapa final han dominado el sector minero, pero, en fecha más reciente, estas soluciones se han vuelto cada vez más refinadas, dado un ámbito de aplicación cada vez más intensiva de tecnologías de “reducción en la fuente”.

10. En la “jerarquía” de los métodos de ordenación de desechos para hacer frente a éstos, el aprovechamiento y la reelaboración son menos convenientes que la reducción en la fuente (prevención de la contaminación), pero son una opción ecológica mejor que el tratamiento o la eliminación simple (Allen y Rosselot, 1997).

11. El aprovechamiento normalmente entraña el empleo del desecho en forma no tratada (aunque quizás haya que modificar la forma física del material); en el caso de los desechos de la industria minera, el aprovechamiento puede ser más viable después de la reelaboración para eliminar o reducir la

concentración de contaminantes para el medio ambiente y de metales que se trata de obtener. Sólo deberían aprovecharse los desechos que sean suficientemente no contaminantes, particularmente fuera del predio, ya que el principal problema que entraña el aprovechamiento de desechos es la posibilidad de dispersar sustancias nocivas para el medio ambiente sobre una superficie mucho más extensa. En general, a medida que aumenta el grado de contaminación, disminuye la posibilidad de aprovechamiento. Teniendo en cuenta estas limitaciones, el aprovechamiento puede ser igualmente atractivo para explotaciones actuales y para desechos más antiguos o abandonados.

12. Puede decirse que lo contrario vale para la reelaboración, en el sentido de que a medida que aumenta el porcentaje de metales que se desea obtener pueden mejorar las perspectivas para la reelaboración. El concepto de reelaboración para recuperar uno o más productos valiosos (metales, sales metálicas o minerales) tiene mayor aplicación en los desechos más antiguos de la industria minera. Esto obedece a dos razones principales: en el pasado las leyes de las menas solían ser mayores que en la actualidad y la tecnología era menos eficiente.

13. Es posible que la elaboración no redunde necesariamente en mejoras para el medio ambiente, por ejemplo, en los casos en que los desechos residuales (después de la reelaboración) todavía contienen concentraciones apreciables de otros contaminantes, como minerales no deseados. Sin embargo, en muchos marcos reglamentarios, la reelaboración puede ser una condición exigida por el vertimiento del desecho final sin riesgo (por ejemplo, en un sitio de vertimiento especialmente concebido) cuando ello no ocurría antes de introducirse la actividad de reelaboración.

IV. Factores que afectan el aprovechamiento y la reelaboración de desechos

14. Hay muchos factores “positivos” que motivan la búsqueda de métodos innovadores para el saneamiento de predios mineros contaminados, como el aprovechamiento y la reelaboración de desechos. También hay muchos impedimentos (“factores negativos”) a la incorporación más intensiva de dichos métodos. Entre los factores positivos principales se cuentan los avances tecnológicos, los mayores precios de los metales, la escasez de productos básicos, los cambios en los empleos estratégicos de ciertos productos básicos, la búsqueda de una máxima utilización de recursos, el Programa 21, la sostenibilidad, la necesidad de desvincular el creci-

miento económico de los efectos ambientales, el principio de quien contamina paga, las obligaciones y responsabilidades jurídicas y los requisitos de caución, y otras presiones difusas de los interesados.

15. La percepción entre el público en general de que los métodos actuales quizás no sean óptimos ni ecológicamente aceptables en el mediano y el largo plazo también puede ser importante, aunque ese factor probablemente se sienta menos vivamente en la industria minera que en algunos otros sectores industriales. Sin embargo, en los planos local y regional aún puede ser importante.

16. Otros factores comprenden marcos reglamentarios que fomentan la innovación en la tecnología y la ordenación de recursos e iniciativas de la industria para elaborar soluciones más eficaces y económicas a los problemas ecológicos existentes y futuros (Kovalick, 1993; Ayen, 1994).

V. Minería (extracción) y desechos potenciales

17. En términos generales, hay tres tipos de explotación minera: de superficie, subterránea e *in situ* (extracción por solución). Esta última es un tanto limitada en su aplicación, aunque a veces se emplea para explotar la mineralización residual a medida que las leyes disminuyen en las minas de superficie o subterráneas. La minería de superficie está dominada por los métodos de tajo abierto (extracción de menas de metales ordinarios y preciosos) o de cielo abierto (explotaciones hulleras). Cualquiera que sea el método empleado, la extracción minera siempre está acompañada de algún tipo de elaboración. Para materiales relativamente puros u homogéneos, la elaboración puede estar limitada a la trituración y la clasificación (algunos casos de extracción de zeolita natural, roca extraída de canteras) o el lavado físico (algunas explotaciones hulleras). Dichas opciones de elaboración simples sólo son posibles cuando los minerales que se trata de obtener constituyen la mayoría del material extraído. En esos casos, las emisiones principales y los efectos sobre el medio ambiente están vinculados principalmente a la propia extracción en lugar de la elaboración posterior.

18. Los dos tipos principales de emisiones de la minería de superficie y subterránea que guardan relación con la reelaboración y el aprovechamiento son los desechos minerales (recubrimiento y roca estéril) y las aguas contaminadas (descargas ácidas y cargadas de metal de sitios de eliminación de desechos y laboreos). Estas últimas son también de importancia en las explotaciones mineras *in situ*, aunque los

productos químicos añadidos mediante los cuales se lixivía el metal también pueden contribuir a la contaminación y la impurificación del agua.

VI. Elaboración de minerales y generación de desechos potenciales

19. La elaboración de minerales se define como el tratamiento físico de los minerales. No ocasiona ningún cambio químico en los componentes minerales de la mena, aunque es un medio de lograr la separación física (y la concentración) de diferentes fases de mineral, como la separación de los minerales que se desea obtener de los minerales de la ganga o de un mineral valioso de otro (Hayes, 1993). En el caso de los recursos minerales no metálicos, al elaborar el mineral puede obtenerse un producto final, pero en el caso de los metales es una etapa intermedia, ya que no afecta la combinación química del metal con oxígeno, azufre, etc. La elaboración de minerales suele ser una etapa intermedia entre la extracción minera y la metalurgia extractiva, aunque hay excepciones, como la lixiviación en montones y en vertederos de la mena tal como se extrae. Los productos de la elaboración de minerales (concentrados) constituyen los insumos para la metalurgia extractiva (ya sean procesos hidrometalúrgicos o pirometalúrgicos; véanse los párrafos 24 a 31 *infra*).

20. Los métodos de elaboración de minerales pueden dividirse en dos grupos: reducción de tamaño y separación de las fases minerales. La trituración y la molienda (en combinación con la clasificación) se utilizan para separar los minerales económicos y no económicos unos de otros, con lo que se obtienen materiales de alimentación idóneos para los procesos posteriores en que se pueden generar fases minerales separadas. Sin embargo, la molienda no produce normalmente un producto mineral totalmente separado, y algunas partículas pueden ser una mezcla de dos o más especies minerales, con características físicas o químicas peculiares de esa mezcla. Esto puede ocasionar que los minerales que se desea obtener se desechen junto con los minerales de la ganga, o que el concentrado de mineral se diluya con minerales de la ganga.

21. La reducción de tamaño se realiza utilizando "trituradoras" (trituradoras de mandíbulas, giratorias y de cono) y "molinos" (molinos de varillas, bolas, martillo e impacto). La trituración se utiliza para reducir la mena que viene de la mina desde el tamaño de guijarros hasta un diámetro de 25 milímetros o menos. Este material puede pasar entonces a los molinos o puede elaborarse directamente si el mineral valioso está suficientemente separado. La molienda reduce el tamaño de las partículas a un límite inferior de alrededor de 10

micrones¹. En contraste con la trituración, que se efectúa sobre la mena tal como sale de la mina, la molienda casi siempre se realiza en medio húmedo y el producto de la molienda es una “pulpa”, es decir, una suspensión de partículas finas en agua.

22. La separación de minerales puede lograrse aprovechando diferencias en las características del mineral basadas en el tamaño de las partículas, la densidad de las partículas, las propiedades magnéticas, las propiedades eléctricas o la química superficial (flotación).

23. La técnica de separación que se seleccione se basa en varios factores que son peculiares del lugar de la explotación, entre ellos el tamaño de la explotación, el tamaño de la partícula al cual los minerales están suficientemente separados, la mineralogía, el circuito global de elaboración (desde la extracción minera hasta la metalurgia extractiva), etc. En último término, cada proceso produce un “concentrado” (un material rico en el mineral o los minerales que se desea obtener), “relaves” (que contienen principalmente minerales de valor subeconómico o no económico) y “mixtos” (partículas en que el mineral que se desea obtener y la ganga no se han separado por completo). Los mixtos normalmente se vuelven a moler o se envían a un proceso alternativo para separar el mineral valioso o recuperarlo de otro modo, mientras que los relaves se vierten como desecho. De los diversos procesos de separación, la flotación actualmente es el método dominante para la obtención de concentrados de mineral, especialmente de menas sulfuradas, y es la principal fuente de los relaves. Otras operaciones unitarias que forman parte de la elaboración de minerales revisten interés limitado en lo que se refiere a sus posibles efectos sobre el medio externo, ya que se realizan principalmente dentro de lo que en efecto son circuitos cerrados, es decir, muchas operaciones unitarias transfieren el 100% de su insumo al proceso siguiente. La flotación a menudo es la operación unitaria final y la etapa en que se generan los desechos (relaves) y se transfieren al medio externo. Los relaves generados durante la flotación están compuestos principalmente de partículas finas de minerales de ganga, que contienen cantidades variables de los minerales que se desea obtener, dependiendo de las características económicas del proceso, la eficiencia de éste y las restricciones mineralógicas.

VII. Metalurgia extractiva y generación de desechos potenciales

24. La metalurgia extractiva puede subdividirse en dos disciplinas principales, la “hidrometalurgia” y la “Pirometalurgia”. Una tercera disciplina, la “electrometalurgia”, no se considera en el presente documento en profundidad ya que su uso es más limitado en el sector minero (principalmente para la producción de aluminio y en parte de cinc).

A. Hidrometalurgia

25. Los métodos hidrometalúrgicos de tratamiento de menas se utilizan más comúnmente para el oro, el uranio, el cobre y el aluminio y, en menor medida, el cinc y el níquel. En particular, las menas que contienen material oxidado (cerca del 10% de las menas no ferrosas) se tratan mediante lixiviación. La mena se elabora primeramente conforme a los requisitos de los procesos posteriores, y luego se utiliza un agente lixivante para extraer el metal o los metales valiosos en forma de una solución diluida cargada de metal. Esta solución pasa entonces a la etapa de recuperación de los metales, que puede entrañar precipitación, extracción por solventes o electrodeposición.

26. Los reactivos y solventes lixiviantes que se utilizan comúnmente comprenden:

a) “Ácidos” (ácido clorhídrico, ácido sulfúrico) para minerales de cobre oxidados, como azurita, malaquita, tenorita y crisocola, y “oxidantes” (sulfato férrico) para minerales de cobre menos oxidados, como calcocita, bornita, covelita y calcopirita;

b) “Álcalis” y reactivos “basados en amoníaco” (hidróxido o carbonato de sodio/amonio) para ciertos minerales de cobre;

c) “Lixiviación bacteriana”, en que se utilizan bacterias para producir ácidos y oxidantes a partir de minerales sulfurados en forma eficaz en función de los costos;

d) “Cianuro” (como solución de cianuro de sodio o potasio) para disolver el oro;

e) “Mercurio” como reactivo de amalgamado en la recuperación de oro; se utiliza extensamente en explotaciones mineras pequeñas, principalmente en países en desarrollo.

27. Entre los métodos que permiten emplear los reactivos antes mencionados se cuentan:

a) La “lixiviación en vertedero” de material sobre una superficie sin revestir. El término se deriva de la práctica de lixiviar materiales que se depositaron inicialmente como roca estéril; no obstante, también se aplica a yacimientos sulfurados de baja ley o a yacimientos sulfurados y oxidados de ley mixta colocado sobre un terreno no preparado específicamente para lixiviar;

b) La “lixiviación en montones” de mineral de baja ley que se ha depositado sobre una plataforma revestida y preparada especialmente con material sintético, asfalto o arcilla compactada. En la lixiviación en montones el mineral se suele pretratar mediante la reducción de tamaño (trituración) antes de colocarse en la plataforma;

c) La “lixiviación en cuba” es una opción típica de un alto ritmo de producción a la lixiviación en montones y de vertedero, que se realiza en un sistema de cubas o cisternas mediante el empleo de soluciones lixiviantes concentradas y mineral concentrado sin clasificar.

28. Si bien el procedimiento de recuperación de metales varía según el metal de que se trate, por lo general entraña la cementación preferencial (cobre u oro) o la extracción por solventes y la electrodeposición (cobre).

29. Entre los desechos generados durante los procesos hidrometalúrgicos pertinentes a la reelaboración y el aprovechamiento se cuentan:

a) El “mineral agotado o el concentrado gastado”, que contiene sustancias químicas residuales del proceso y minerales y metales previstos y no previstos;

b) El “fango de la extracción de solventes y la electrodeposición”, que contiene materiales que pueden acumularse en las cisternas de extracción de solventes y electrodeposición (productos en partículas, la emulsión de fases orgánicas y acuosas);

c) El “electrolito gastado” generado durante las actividades de electrodeposición y cargado de impurezas solubles;

d) Los “desechos contaminados con mercurio” resultantes del uso de mercurio en la amalgamación.

B. Pirometalurgia

30. En la actualidad los procesos pirometalúrgicos constituyen la columna vertebral de la recuperación de cobre, cinc, níquel y plomo a partir de depósitos sulfurados. Entre los procedimientos del proceso se cuentan típicamente la elaboración de minerales (comúnmente la flotación) destinada a producir un concentrado, seguida de la fundición, que

descompone la estructura cristalina de los minerales mediante la oxidación térmica. El proceso difiere según el metal o la combinación de metales de que se trate. Por ejemplo, la fundición de cobre produce una “mata” (que contiene hasta un 40% de contenido de metal), que en su forma fundida es convertida y separada en un producto conocido como “blister” (de entre un 97% y un 99% de pureza) y una escoria de hierro y silicato de valor económico suficiente como para justificar que se siga elaborando. Habida cuenta de que el metal “blister” es demasiado impuro para la mayoría de las aplicaciones industriales, es preciso refinarlo. Ello entraña por lo general un proceso ígneo (en un horno de reverbero) si la carga contiene pocos derivados, o la electrolisis si se han de recuperar metales adicionales. Los cátodos resultantes, que suelen ser de entre un 99,8% y un 99,9% de pureza, se comercializan directamente a los semifabricantes o se funden en perfiles (lingotes). Por el contrario, el plomo se produce por un procedimiento basado en la sinterización, la reducción de la toba en un alto horno y la refinación pirometalúrgica o hidrometalúrgica de la barra.

31. Los procesos pirometalúrgicos dan lugar a cinco productos potencialmente contaminantes: el gas residual, el gas fugitivo, las emanaciones y el polvo y la escoria de la fundición, los dos últimos de los cuales revisten la mayor importancia en lo que respecta a la reelaboración y el aprovechamiento.

VIII.

Últimos adelantos en materia de aprovechamiento de desechos minerales

A. Factores que limitan el aprovechamiento de los desechos minerales

32. El hecho de que existan relativamente pocos ejemplos de cómo se aprovechan los desechos minerales en la industria de la minería de metales ordinarios y preciosos obedece a dos razones fundamentales. En primer lugar, el aprovechamiento se ve limitado por la presencia de minerales (metales) que pueden causar daños al medio ambiente. El aprovechamiento en esos casos puede considerarse como una vía de dispersión y un agente causal de una contaminación ambiental más generalizada. La segunda limitación es el alto valor de la ubicación de los desechos minerales, aun cuando estén “libres” de contaminantes. En la mayoría de los casos es probable que los gastos de transporte fuera de una zona relativamente limitada excedan en mucho el valor de venta

de los propios desechos. Otra limitación radica en el costo relativamente bajo de las materias primas con las que compiten los desechos (agregados primarios y secundarios, material de relleno de otro tipo, entre otros).

B. Aprovechamiento *in situ*

33. Para eludir en gran medida las dos limitaciones esbozadas en el párrafo anterior, es necesario que se aprovechen los desperdicios *in situ*. Ello ya se lleva a cabo en grado considerable en la mayoría de los yacimientos mineros, ya que los desperdicios se aprovechan en aplicaciones como la construcción de terraplenes, la construcción y conservación de carreteras y en aplicaciones geotécnicas. No obstante, el mayor uso *in situ* potencial de los desperdicios es como material de relleno, sobre todo en las minas subterráneas. Sin embargo, surge nuevamente la cuestión de los contaminantes y la posible dispersión una vez que se depositen los desperdicios, siendo lo habitual que los desperdicios se rellenen con cemento Portland, ceniza de combustible pulverizada u otros agentes estabilizadores (silicatos solubles), tanto para mejorar sus características físicas como para reducir a un mínimo la posible filtración de los metales en la napa fréatica. El relleno de desperdicios se emplea generalizadamente en las explotaciones mineras subterráneas a poca profundidad (carbón, caliza).

34. En el futuro, entre las aplicaciones de menor cuantía y probablemente limitadas al lugar de explotación tal vez se cuente el tratamiento del agua, como el uso de roca estéril finamente triturada como material de adsorción para los colectores de flotación (Heiskanen y Yao, 1992) y el uso de pirita (recuperada mediante la reelaboración; véase la sección IX *infra*) para eliminar especies arsenicales disueltas mediante la adsorción (Zouboulis y otros, 1993).

C. Aprovechamiento fuera del lugar de explotación

35. Toivola y Toivola (1997) patentaron un método para producir un material de construcción a partir de una mezcla de desperdicios termoplásticos no clasificados y agregado mineral. Entre las posibles aplicaciones se cuentan la producción de zamarras para pavimento, ladrillos o imitaciones de bloques de hormigón. Aljaro (1991) informó del aprovechamiento de relaves sin tratar como fuente de agua para fines agrícolas, basado en un estudio financiado por la Corporación Nacional del Cobre de Chile en ese país. Se han aprovechado los desechos sin tratar de la mina de cobre y

molibdeno El Teniente para regar cultivos y como agua para el ganado. Se seleccionaron y sembraron cultivos tolerantes de niveles más altos de cobre, molibdeno, manganeso y sulfatos (y a las condiciones locales del suelo y el agua). La transposición de los metales a las partes comestibles de los cultivos resultó ser limitada y no excedió los niveles permisibles. No obstante, dada la posibilidad de que se acumulen metales en el suelo y la napa fréatica, es probable que este uso sea muy restringido. Entre los demás usos que se han documentado se cuentan el aprovechamiento de volúmenes elevados de relaves de taconita inocuos como material de construcción en diques, represas y carreteras en los Estados Unidos de América, el uso de volúmenes limitados de relaves de taconita inocuas en la producción de cerámica, ladrillos y tejas, y el aprovechamiento de los desechos de metales ordinarios y preciosos en la producción de ladrillos densos de silicato de calcio, hormigón ventilado, productos de construcción ligeros y espumosos, ladrillos prensados secos y vidrio (Mitchell, 1990).

IX. Reelaboración de desechos minerales

A. Reelaboración de desechos para recuperar sulfuros generadores de ácido

36. La separación de los desechos en fracciones ricas en sulfuros y carentes de sulfuros brinda la posibilidad de que se amplíen las opciones para el tratamiento de desperdicios en las operaciones actuales y de que se aborden las cuestiones ambientales en los lugares en los que se produce generación de ácido a partir de desechos no segregados. En ambos casos —teóricamente—, la fracción rica en sulfuros de bajo volumen puede eliminarse en lugares sobremana tecnificados o aislarse en la forma de “células” sepultadas en la masa de desperdicios, al tiempo que la fracción carente de sulfuros de gran volumen puede eliminarse como desecho inerte o aprovecharse tanto *in situ* como fuera del predio.

37. En un trabajo reciente, Humber (1995) analizó la relación que existe entre la recuperación de sulfuros (pirita y pirrotita), la generación de ácido y las estimaciones de los gastos de explotación y de capital correspondientes a la reelaboración. Se examinaron varias técnicas de elaboración de minerales en cuanto a su capacidad de segregar los sulfuros generadores de ácido de los desechos del tratamiento existentes y de generar una fracción carente de sulfuros y una fracción rica en sulfuros de bajo volumen. Entre los métodos examinados se contaban la separación por gravedad (concentrador centrífugo, mesa concentradora por sacudida y concen-

trador espiral), la flotación, la separación magnética y la clasificación en ciclones, los que se ensayaron con muestras procedentes de tres minas. También se examinaron los concentrados sulfurados en cuanto a su valor comercial². En cada una de las tres muestras, los minerales sulfurados se segregaron satisfactoriamente y estaban presentes en concentraciones lo suficientemente bajas como para producir (teóricamente) un concentrado sulfurado de bajo volumen. Ninguno de los métodos por gravedad que se ensayaron produjo relaves no reactivos (carentes de una capacidad neta de generar ácido). La flotación tuvo mayor éxito, si bien hasta cierto punto esto pareció reflejar la naturaleza simple de la mineralogía y la distribución por tamaño de las porciones finas de los sulfuros. La reelaboración por flotación no sólo redujo la capacidad de generación de ácido de la fracción agotada, sino que también redujo la concentración de otros metales de importancia ambiental, como el cadmio, el cobre y el cinc.

38. Sobre la base de los ensayos en los que se generaron desechos con el menor potencial de generación de ácido, se estimaron los gastos de explotación y de capital. El total de gastos de capital fluctuó entre 130.000 dólares y 1.275.000 dólares. Las estimaciones de los gastos de explotación oscilaron entre 0,50 dólares por tonelada y 1,35 dólares por tonelada. No obstante, en el trabajo no se informa de los gastos de explotación o de capital existentes, razón por la cual dichos gastos adicionales no pueden situarse plenamente en contexto. Sin embargo, hay otros ejemplos de la aplicación de este enfoque a escala de instalación, si bien en lugares en que hay una explotación en marcha y no en el contexto de la reelaboración de desechos más antiguos. La Magma Copper Company ha producido productos de pirita en su explotación Superior Mine haciendo pasar relaves procedentes del circuito de cobre a través de un circuito de flotación adicional, generando así unos relaves menos reactivos y además un producto de pirita fino y prácticamente puro y un concentrado de pirita basto (de un 45% a 47% de hierro y un 48% a 50% de azufre) (USEPA, 1994a). En 1994 se vendieron aproximadamente 500 toneladas mensuales de productos de pirita, lo que constituye entre el 90% y el 95% del mercado de los Estados Unidos (USEPA, 1994b). No obstante, en este caso se generaron productos de pirita comerciables porque el mineral a) contenía hasta un 25% de pirita y b) tenía pocas impurezas. Es posible que esos factores hagan que el yacimiento sea relativamente singular, por lo que la transferencia de ese enfoque a otras explotaciones tal vez resulte más difícil que lo que pudiera parecer a primera vista. Como se indicó anteriormente, la producción de pirita no obedeció a razones estrictamente ambientales (si bien la empresa reconoció los beneficios que se derivaban de la generación reducida de fuga

ácida de roca), sino más bien a la demanda del producto —cuando no había demanda, no había recuperación de pirita. Ello pone de relieve la dificultad que entraña tratar con minerales, como la pirita, que carecen de valor de mercado o de un mercado específico.

B. Reección mediante la biolixiviación

39. La lixiviación mediante bacterias se ha empleado para procesar el oro refractario, hasta ahora irrecuperable debido a su asociación cristalina con la pirita, que las bacterias pueden disolver con facilidad. Los adelantos registrados en la biotecnología, combinados con las ventajas ambientales y económicas que al parecer tienen las tecnologías de lixiviación bacteriana respecto de otros procesos tradicionales más contaminantes y de mayor densidad de capital, quizás presagien cambios considerables en la estructura de la industria de los minerales. En marzo de 1994, Newmont Gold informó de que los ensayos sobre el terreno habían confirmado la viabilidad económica de un proceso de biolixiviación patentado para recuperar oro a partir de material sulfurado de baja ley que antes no habría sido considerado mineral económico (Brewis, 1995). El sistema emplea *Thiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferrooxidans* para oxidar los sulfuros auríferos sobre una plataforma de lixiviación en montones, a lo que sigue una lixiviación con cianuro o tiosulfato de amonio para extraer el oro. Si bien la cinética de la reacción es lenta, este enfoque es económicamente viable debido al bajo costo de los sistemas biológicos que se emplean. Hasta la fecha, la biolixiviación sólo se ha aplicado comercialmente para recuperar oro, uranio, cobre y níquel, al tiempo que se ha sugerido asimismo su uso para la lixiviación en montones de mineral de cinc de baja ley.

C. Opciones al uso de cianuro en la recuperación de oro

40. Si bien la cianuración es el procedimiento fundamental utilizado para recuperar oro en las explotaciones estructuradas (el 100% de la producción oficial de oro en Sudáfrica) (Adams, 1997), el cianuro no es el único lixivante con posibilidades de utilizarse en la recuperación de oro. Entre las posibles opciones al cianuro se cuentan el tiocianato (Adams, 1996) y los solventes formados de halógenos, como el cloro gaseoso, el hipoclorito de sodio, el yodo y el bromo (Ramadorai, 1994). Si bien ninguno de éstos podría considerarse un sucedáneo genérico del cianuro, pueden resultar útiles en el tratamiento de determinados tipos de mineral o de desechos auríferos respecto de los cuales no exista una

opción de elaboración viable desde el punto de vista económico o técnico en el momento de su eliminación. Existen indicios de que en lo que respecta a los minerales no refractarios, los solventes compuestos de halógenos no son más eficientes o eficaces en función de los costos que el cianuro. Más bien, los solventes de halógenos pueden tener mayor aplicación en el tratamiento de desechos y minerales refractarios, si bien ésta sigue siendo una esfera en la que se precisa mayor fundamentación

X. Enfoques al aprovechamiento, la reelaboración y la reducción en la fuente

A. Reducción en la fuente en la minería, la elaboración de minerales y la metalurgia extractiva

41. La tecnología inocua es un componente integral de la reducción a un mínimo de los desechos y la prevención de la contaminación y de hecho suelen considerarse sinónimos (reducción en la fuente), al tiempo que se ha empleado fundamentalmente, y en efecto se ha desarrollado, en las industrias de elaboración. Lo ideal es que, a la hora de evaluar la "inocuidad" de una tecnología, también deberían tenerse en cuenta los efectos en el medio ambiente de los proveedores de materias primas y los usuarios finales y consumidores de los productos, si bien ello suele ser difícil de determinar, al tiempo que los límites de esa evaluación se conforman más estrechamente en la práctica al proceso de que se trate.

42. Se adoptan varias estrategias genéricas o multisectoriales en el marco de un sistema de ordenación general para facilitar la prevención de la contaminación: a) mejorar el funcionamiento de la instalación de tratamiento de desechos, b) modificar la tecnología de los procesos, c) reciclar, recuperar y reaprovechar los productos de desecho, d) sustituir las materias primas y e) reformular los productos.

43. En el contexto de la extracción minera y la elaboración de metales ordinarios y preciosos, a las estrategias a), b) y c) citadas en el párrafo anterior corresponden las aplicaciones más evidentes, si bien existe en ocasiones la capacidad de modificar la naturaleza del insumo del proceso (esto es, la estrategia d)), por ejemplo, mediante prácticas de minería más selectivas, más precisas e idóneas (Almgren y otros, 1996). La estrategia e) no guarda una relación tan directa con la industria de la minería y no se aborda en el presente trabajo.

44. Cuando varias tecnologías inocuas compiten entre sí, éstas pueden clasificarse según la forma en que se reduzcan los peligros asociados con la obtención de desechos, los gastos de tratamiento y eliminación, la responsabilidad civil futura, los riesgos para la seguridad y los costos de los materiales de insumo. El medio de determinar la inocuidad de una tecnología determinada depende sobremedida de la evaluación que se haga del aprovechamiento de los recursos y los efectos sobre el medio ambiente empleando metodologías de inventario del ciclo de vida útil y la evaluación del ciclo de vida útil.

45. La reducción al máximo de los desechos reporta ventajas de toda índole, pero tropieza a menudo con trabas institucionales que hay que subsanar, como la incertidumbre del personal directivo con respecto a la posibilidad de amortizar las inversiones efectuadas, la posibilidad de que haya tiempos muertos en el proceso de producción, los problemas con la calidad de los productos y la pérdida de información patentada en favor de los asesores en materia de reducción de desechos. La mejor manera de subsanar esos impedimentos es hacer que participen en el proceso el personal directivo de categoría media y superior, el personal directivo de las instalaciones y los operarios de éstas (es decir, toda la plantilla de la empresa) (Haas, 1995).

B. Del tratamiento y la eliminación de desechos a la prevención de la producción de desechos y viceversa

46. La actual tendencia del sector minero a reducir los desechos en su fuente de origen queda contrarrestada por problemas como los que presentan los minerales de escaso valor económico pero ecológicamente nocivos, como el arsénico y la pirita, que forman parte de criaderos de metales ordinarios y preciosos. El arsénico es un ejemplo clásico de los problemas e interrogantes que plantean los productos tóxicos de escaso valor económico que suelen formar parte de conglomerados de minerales valiosos. Se trata principalmente de subproductos del proceso de elaboración de otros metales más importantes, como el cobre, el plomo, el cinc, el oro, la plata y el estaño. Hay por lo menos 18 países en que el trióxido de arsénico de calidad comercial se obtiene fundiendo o tostando menas o concentrados metálicos no ferrosos (Broad, 1997). Las perspectivas futuras de comercialización del arsénico no son muy halagüeñas, habida cuenta de que las aleaciones de plomo y arsénico de las pilas se están sustituyendo por aleaciones de plomo y calcio y de que aumenten las presiones para que se evite utilizar el

arsénico en tecnologías baratas, como las de tratamiento de maderas.

47. Muchas de las tecnologías de tratamiento que se han ideado para eliminar los desechos peligrosos con garantías de seguridad no sirven para los desechos de minerales contaminados de arsénico. Sin embargo, se están investigando otros posibles métodos, como los siguientes:

a) “Tecnología de fijación sintética de minerales”: esta tecnología consiste en precipitar los metales o transmutarlos en compuestos involátiles y añadirles, a continuación, catalizadores apropiados para obtener, en la etapa de transmutación, el compuesto mineral sintético deseado (White y Toor, 1996). La tecnología de fijación sintética de minerales se ha empleado para estabilizar las partículas de arsénico que componen diversos tipos de humos (los cuales contienen trióxido de arsénico) y transmutarlas en un mineral de baja solubilidad análogo a la apatita ($\text{Ca}_5(\text{AsO}_4)_3\text{F}$);

b) “Arseniatos férricos”: desde hace varios años se está investigando la precipitación a altas temperaturas de soluciones de arsénico para obtener arseniatos férricos cristalinos estables (véase, por ejemplo, Swash y Monhemius, 1994, y las referencias que figuran en esta obra). Los arseniatos férricos se obtienen disolviendo compuestos arseniacales (normalmente trióxido de arsénico (Van Weert y Droppert, 1994)) y transmutándolos en escorodita cristalina ($\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) con la ayuda de soluciones ácidas de nitratos (o sulfatos) férricos a temperaturas que oscilan entre 140°C y 160°C;

c) “Adhesión a escorias silíceas”: otro método que puede sustituir a la obtención de fases minerales de baja solubilidad es la adhesión del arsénico a escorias silíceas. En las investigaciones que se han llevado a cabo en este ámbito se ha comprobado que se puede lograr la adhesión a escorias silíceas “vítreas” de hasta un 10% del arsénico en peso del compuesto empleado y que en la lixiviación posterior se desprende muy poca cantidad de arsénico (Machingawuta y Broadbent, 1994).

48. A pesar de los últimos adelantos, aún está por resolverse el problema de la recuperación, el tratamiento y la eliminación de arsénico. Al no haber mercados para los subproductos arsenicales tampoco hay incentivos económicos para recuperar este metal (que, sin embargo, suele recuperarse accidentalmente en el proceso de elaboración) y todavía no se ha reglamentado el régimen económico de la responsabilidad por daños a terceros con detalle suficiente como para que los empresarios prefieran recuperar ese metal. En los casos en que no hay mercado para determinado desecho o subproducto y en que éste forma parte ineludible de los elementos del proceso industrial de que se trate, es imposible hallar una

solución tecnológica verdaderamente “inocua”. La alternativa está entre: a) desistir de explotar menas que contengan metales y minerales problemáticos para los cuales no hay mercado y b) admitir que la solución óptima consiste en recuperar, aislar y tratar de manera efectiva los elementos problemáticos antes de eliminar los desechos. Esta segunda solución es la más realista y será la que se imponga, aunque ha habido casos en que se han rechazado proyectos de explotación minera por razones de peligro general inadmisibles (por ejemplo, el proyecto que presentó la empresa New World Mine, situado en los alrededores del parque nacional de Yellowstone, en los Estados Unidos), lo que puede servir de precedente para imponer restricciones a la actividad minera en zonas “delicadas” que aún no están “protegidas” contra este tipo de actividad, o en sus alrededores. En el peor de los casos, las restricciones que se impongan a la actividad minera tendrán carácter disuasivo y, por ende, tal vez sirva para fomentar la recuperación y el tratamiento previo de los metales y metaloides que se obtengan accidentalmente y carezcan de valor económico, siempre que se demuestre mediante estudios científicos rigurosos que ésa es la mejor solución desde el punto de vista ecológico.

XI. Conclusiones: perfeccionamiento de la reducción de desechos en su fuente, de su reelaboración y de su aprovechamiento

49. Es difícil dar una descripción absolutamente precisa de las tecnologías más avanzadas, dado que aún no se han acabado de pulir los métodos auxiliares que sirven para evaluarlas; por ejemplo, el método del análisis de su ciclo de vida útil. Todavía se carece de una comprensión cabal de los perjuicios ambientales que pueden acarrear el aprovechamiento y la reelaboración de los desechos, aunque gracias a los progresos que se han logrado en la determinación de los perjuicios ambientales, acotándolos por zonas, se han disipado las dudas con respecto a la eficacia de las medidas de saneamiento adoptadas en algunas zonas mineras (Pascoe, 1994; Greene y Barich, 1994). Sin embargo, las personas que se dedican al tratamiento y la eliminación de desechos insisten cada vez más en que se fijen criterios de ordenación sostenible y se coordinen las estrategias del sector con miras a encontrar la solución más práctica de protección ambiental (Barton y otros, 1996). Siendo realistas, hay que reconocer que nunca podrá prescindirse totalmente, en el sector minero, de la reducción de los desechos en su fuente, de su reciclado, aprovechamiento y tratamiento ni de soluciones técnicas baratas. Todos estos métodos tienen su ámbito de aplicación

y, aunque cabe esperar que su frecuencia relativa de utilización varíe con el tiempo, ninguno de ellos quedará totalmente descartado. Muchas entidades —tanto públicas como privadas— que podrían participar en la rehabilitación de zonas mineras (y, por extensión, en la reelaboración de desechos) se ven coartadas por trabas legales e institucionales, como la del régimen de responsabilidad por daños a terceros. Dichas trabas no sólo impiden la recuperación o rehabilitación material de esas zonas, sino que también frenan la inversión de capitales en proyectos de desarrollo de tecnologías innovadoras (Durkin, 1995). Por consiguiente, el problema radica en cómo servirse de la legislación para fomentar un reciclado y un aprovechamiento de los desechos del sector minero que sean más efectivos que los actuales.

50. La rehabilitación de las explotaciones mineras que están en activo ofrece una gran oportunidad para concebir tecnologías innovadoras de reelaboración de desechos mineros y aplicar una política y procedimientos técnicos que favorezcan el empleo de desechos secundarios en lugar de recursos primarios, siempre que sea posible. Las limitaciones cada vez mayores que pesan sobre la explotación de los recursos primarios han convertido a los desechos en recursos potenciales. Las reglamentaciones jurídicas y los requisitos de calidad pueden coartar la aplicación de las tecnologías innovadoras y también pueden imponerse impedimentos técnicos al reciclado de determinados compuestos residuales complejos. Asimismo, en el caso de algunas tecnologías innovadoras se tendrá escasa información con respecto a sus costos y resultados, lo que tal vez ahuyente las inversiones en este sector. Por otra parte, las tecnologías más avanzadas tienen que competir con un número cada vez mayor de técnicas de estabilización (por ejemplo, la tecnología de fijación sintética de minerales). Pese a los inconvenientes que tienen estas tecnologías, como la falta de fiabilidad y la incertidumbre con respecto a la permanencia de sus resultados, tal vez sean la única solución viable para tratar los minerales o metales de escaso o nulo valor comercial.

Notas

¹ Con un menor tamaño, las partículas se hacen cada vez más difíciles de manipular o separar.

² Se ha sustituido la pirita por azufre elemental en la producción de ácido sulfúrico (Berkowitz, 1988), lo que indica que la venta de pirita tal vez no sea viable desde el punto de vista comercial.

Bibliografía

- Adams, M. D. (1996). Environmental impact of cyanide and non-cyanide lixiviants for gold. *New Developments in the Extractive Metallurgical Industry* (Johannesburgo), 23 de febrero de 1996.
- _____ (1997). Group leader: process and environmental chemistry. Randburg (Sudáfrica). Comunicación personal.
- Aljaro, B. y otros (1991). Untreated tailings effluent: alternative use. *Mining Journal Environment Supplement*, 20 de septiembre de 1991, págs. 16 y 17.
- Allen, D. T. y K. S. Rosselot (1997). *Pollution Prevention for Chemical Processes*, Nueva York: John Wiley and Sons, Inc.
- Almgren, G., T. Almgren y U. Kumar (1996). Just-in-time and right-in-space. *Minerals Industry International* (septiembre), págs. 26 a 29.
- Ayen, R. J. (1994). A business and market assessment of waste treatment technologies. *Journal of Metals* (mayo de 1994), págs. 30 a 34.
- Barton, J. R., D. Dalley y V. S. Patel (1996). Life cycle assessment for waste management. *Waste Management*, vol. 16, Nos. 1 a 3, págs. 35 a 50.
- Berkowitz, J. B. (1988). Environmental cost considerations and waste minimization in new plant design and process optimization. En *Hazardous Waste: Detection, Control, Treatment*, R. Abbou, compilador., Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V.
- Brewis, T. (1995). Metal extraction by bacterial oxidation. *Mining Magazine* (octubre 1995), págs. 198 a 206.
- Broad, A. (1997). Arsenic down but not out. *Metal Bulletin Monthly*, No. 315 (marzo de 1997), págs. 54 a 57.
- Crittenden, B. y S. Kolaczowski (1995). *Waste Minimization. A Practical Guide*. Rugby (Reino Unido): Institution of Chemical Engineers.
- Durkin, T. V. (1995). New technology is needed to manage sulfide mine waste. *Mining Engineering* (junio de 1995), págs. 507 y 511.
- Eaton, P. B., A. G. Gray, P. W. Johnson y E. Hundert. (1994). *State of the Environment in the Atlantic Region*, Environment Canada.

- Greene, J. C. y J. J. Barich (1994). Biological and chemical evaluation of remediation performed on metal bearing soils. En *Tailings and Mine Waste '94*, Rotterdam (Países Bajos): Balkema.
- Haas, C. N. (1995). Waste elimination options. En *Hazardous and Industrial Waste Treatment*, C. N. Haas y R. J. Vamos, compiladores.
- Hayes, P. C. (1993). *Process Principles in Minerals and Materials Production*, Australia: Hayes Publishing Company.
- Heiskanen, K. y L. Yao (1992). Finely ground waste rock as an adsorption material for anionic collectors. *Minerals, Metals and the Environment*, M. Anthony, compiladores, Londres: Elsevier.
- Hodges, C. A. (1995). Mineral resources, environmental issues and land use. *Science*, No. 268, págs. 1305 a 1312.
- Humber, A. J. (1995). Separation of sulphide minerals from mill tailings. En *Proceedings, Sudbury '95, Conference on Mining and the Environment*, Sudbury, Ontario (Canadá) 28 de mayo a 1° de junio de 1995.
- Klimpel, R. R. (1995). Technology trends in froth flotation chemistry. *Mining Engineering* (octubre), págs. 933 a 942.
- Kovalick, W. W. (1993). Trends in implementing innovative technologies in the U.S. En *Contaminated Soil '93*, vol. II, F. Arendt, G. J. Annokké, R. Bosman y W. J. van den Brink, compiladores, Kluwer Academic Publishers.
- Machingawuta, C. y C. P. Broadbent (1994). Incorporation of arsenic in silicate slags as a disposal option. *Institution of Mining and Metallurgy Abstract and Index*, No. 103 (enero a abril de 1994), págs. 1 a 8.
- Mitchell, P. B. (1990). Reclaiming derelict metalliferous mining land. *Land and Minerals Surveying*, vol. 8, No. 1, págs. 7 a 17.
- Pascoe, G. A. (1994). Role of ecological risk assessment in reducing uncertainties in remedial decisions at mining waste sites. En *Tailings and Mine Waste '94*, Rotterdam (Países Bajos): Balkema.
- Ramadorai, G. (1994). Halogen solvents in precious metal ores processing. En *Reagents for Better Metallurgy*, P. S. Mulukutla, compilador, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.
- Redhead, R. J. (1996). Waste management: a materials management/product stewardship approach. *CIM Bulletin*, vol. 89, No. 999, págs. 47 a 51.
- SETAC (1993). *Guidelines for Life Cycle Assessment: A Code of Practice*.
- Swash, P. M. y A. J. Monhemius (1994). Hydrothermal precipitation from aqueous solutions containing iron(III), arsenate and sulphate. En *Proceedings Hydrometallurgy '94*, Cambridge (Reino Unido), 11 a 15 de julio de 1994.
- Toivola, M. y A-P. Toivola (1997). Method for producing a building material from a mixture of unscreened thermoplastic and mineral. Patente No. 5676895 de los Estados Unidos.
- USEPA (1994a). *Innovative Methods of Managing Environmental Releases at Mine Sites*. Subdivisión de Desechos Especiales de la Oficina de Desechos Sólidos del Organismo Estadounidense de Protección del Medio Ambiente. Washington, D.C.
- _____ (1994b). *Treatment of Cyanide Heap Leaches and Tailings*. Subdivisión de Desechos Especiales de la Oficina de Desechos Sólidos del Organismo Estadounidense de Protección del Medio Ambiente. Washington, D.C.
- Van Weert, G. y D. J. Droppert (1994). Aqueous processing of arsenic trioxide to crystalline scorodite. *Journal of Metals* (junio de 1994), págs. 36 a 38.
- Warhurst, A. C. y G. Bridge (1996). Improving environmental performance through innovation: recent trends in the mining industry. *Minerals Engineering*, vol. 9, No. 9.
- White, T. e I. Toor (1996). Stabilizing toxic metal concentrates by using SMITE. *Journal of Metals* (marzo), págs. 54 a 57.
- Wills, B. A. (1997). *Mineral Processing Technology*. Sexta edición. Butterworth-Heinemann.
- Zouboulis, A. I., K. A. Kydros y K. A. Matis (1993). Arsenic(III) and arsenic(V) removal from solutions by pyrite fines. *Separation Science and Technology*, vol. 28, Nos. 15 y 16, págs. 2449 a 2463.