

ALTERNATIVAS PARA EL MANEJO DE LA POLUCIÓN DE AGUAS ÁCIDAS SUBTERRÁNEAS EN LA MINERÍA DEL COBRE

FERNANDO PARADA , FROILÁN VERGARA, MARIO SÁNCHEZ

*Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Concepción-Chile.
fparada@udec.cl, fvergar@udec.cl, msanchez@udec.cl
Edmundo Larenas 285, A.P.407-0371, Concepción-Chile
Tel. 56-41-2204202, Fax 56-41-2243418*

RESUMEN

Se presenta la situación de las principales minas subterráneas chilenas y sus problemas de contaminación de aguas ácidas subterráneas asociadas a la operación.

Se muestra un barrido de las principales tecnologías existentes para descontaminar y/o valorizar efluentes acuosos, algunas de las cuales han sido aplicadas en Chile.

El trabajo concluye con una discusión y análisis de las tecnologías con mayor preponderancia y utilización y que por ende presentan mayor impacto futuro en el tratamiento de aguas ácidas mineras.

Palabras Claves: minería subterránea, aguas ácidas.

SUMMARY

The situation of the main Chilean underground mines and their problems of contamination of underground acid waters associated with the operation is presented.

It shows a sweep of the main existing technologies to decontaminate and / or enhance aqueous effluents, some of which have been applied in Chile.

The work concludes with a discussion and analysis of the technologies with greater preponderance and use and that therefore have greater future impact in the treatment of acid mining waters.

Keywords: underground mining, acid waters.

1. INTRODUCCIÓN

Es conocido el efecto nocivo del Drenaje Ácido (DAM) en la minería en general y los efectos negativos en el ambiente circundante, particularmente cuando ocurre en lugares aledaños a terrenos agrícolas. De esta manera, recurso hídricos superficiales y subterráneos pueden verse afectado por este fenómeno ya conocido en las actividades mineras.

El caso chileno no es ajeno a la situación mundial y si bien es cierto, gran parte de nuestra minería se encuentra en zona desértica, hay innumerables nuevos proyectos de minería subterránea que pueden sufrir consecuencias negativas si no se toma conciencia de este fenómeno.

Entre las principales características del DAM pueden ser citados: presencia de minerales sulfurados, especialmente piritas, bajos valores de pH, elevadas concentraciones de iones sulfato e iones metálicos (Fe, Al, Zn y Mn, principalmente), presencia de agentes oxidantes (O_2 y Fe^{3+}), siendo uno de los principales desafíos la remoción del primero de estos compuestos^[1].

En la publicación “Vulnerabilidad del agua subterránea frente a la actividad minera y prevención de la generación de aguas ácidas de mina”^[2] hace referencia al agua como elemento fundamental en la formación de aguas ácidas de mina, en presencia de aire y bacterias, actúa como reactivo en la oxidación de la pirita, la cual se encuentra tanto en el mineral, como en la roca encajonante. Es muy frecuente, dice, que el material de desmonte, carente de mineral

económico, esté compuesto por importantes porcentajes de sulfuros de hierro como la pirita. Este desmonte generalmente es acumulado en las bocaminas y botaderos, y es además el principal constituyente de los relaves.

Para controlar la generación de aguas ácidas en las minas, es casi imposible erradicar la pirita, por lo que es preferible manejar el ingreso de agua y aire a las labores mineras, con lo cual puede reducirse drásticamente el problema.

Existen técnicas preventivas basadas principalmente en el manejo del agua, las cuales están referidas a lo siguiente:

- Desvío de aguas superficiales y subterráneas.
- Sellado con arcilla, compactación del relleno e impermeabilización de la superficie de escombreras y relaves.
- Manipulación de la cobertura y colocación de lechos de caliza.
- Inhibición bacteriana mediante bacterias, detergentes aniónicos, sustancias orgánicas conservantes, e inyección alcalina.

Aunque se sabe que los elementos esenciales para la formación del agua ácida de mina son el agua, el aire, las bacterias y la pirita, no existe todavía ningún método estandarizado para reducir la producción de estos efluentes ácidos de mina.

2. SITUACIÓN DE CHILE^[3,4]

Actualmente, el 70% de mineral de Codelco proviene de minas a rajo abierto y sólo el 30% de subterráneas; sin embargo, la producción futura de Codelco en el mediano plazo provendrá mayoritariamente de minas subterráneas. En efecto, los proyectos Mina Chuquicamata Subterránea, en 2018, y Nuevo Nivel Mina El Teniente, en 2017, contribuirán a invertir la actual relación entre producción a rajo abierto y bajo tierra

2.1 Chuqui Subterránea

Sergio Olavarría, director de Ingeniería del Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea (PMCHS), que se encuentra en etapa de factibilidad (ingeniería básica), explicó que éste “sustenta el futuro de largo plazo del distrito

norte, por cuanto el proyecto tiene una vida en torno a 50 años”. Con 1.700 millones de toneladas de reservas y una ley de cobre de 0,7%, Chuquicamata Subterránea “es un proyecto de mañana”, aseveró Olavarría, porque si bien el rajo dejará de operar el año 2018, ya el próximo año 2011 deberá iniciarse la construcción de túneles para Chuquicamata bajo tierra.

“Los ojos del mundo minero están puestos en este proyecto, porque es la primera vez en el mundo que se hace un cambio de método –de rajo a mina subterránea- de esta envergadura”, dijo Olavarría, recordando el caso de Palabora (Sudáfrica), tanto menor.

La inversión total estimada asciende a US\$ 2.000 millones y las dotaciones se estiman en un máximo de 4.000 personas, tanto para la construcción del proyecto como para la operación. El peak de producción asciende a 380 mil toneladas anuales.

En materia ambiental, el PMCHS es altamente positivo, toda vez que elimina en 90% las emisiones de polvo de la explotación a rajo abierto.

2.2 Nuevo Nivel Mina para El Teniente

“El desafío es abrir una mina debajo de la mayor mina subterránea del mundo”, afirmó el gerente del proyecto Nuevo Nivel Mina (NNM), Jorge Revuelta, quien señaló que el yacimiento posee reservas por 2.400 millones de toneladas, con una ley de 0,84%.

El ejecutivo explicó que el proyecto -que también se encuentra en fase de factibilidad, hasta noviembre próximo- permitirá mantener la capacidad de El Teniente en las actuales 130 mil toneladas por día, “pero deja abierta la opción, el año 2024, de iniciar las obras necesarias para llegar a producir 180 mil toneladas diarias”.

Con una inversión total estimada de US\$ 1.650 millones y el desafío de ubicarse en el primer cuartil de costos de la industria, las principales obras de NNM son una rampa de conexión con la mina actual, plataforma de inicio, túneles de acceso de personal y de correa de transporte, sala de chancado y un camino de acceso de 17 kilómetros, que reducirá en forma importante los tiempos de viaje.

El proyecto incorporará tecnología de automatización de procesos y monitoreo a distancia, reduciendo la exposición de trabajadores a riesgos laborales.

3. GENERACIÓN DE AGUAS ÁCIDAS

Las aguas ácidas se originan por la oxidación espontánea de piritas y otros sulfuros asociados a ellas en presencia de agentes oxidantes

enérgicos (O_2 y Fe^{3+}). Este hecho es característico de las explotaciones de menas metálicas, carbones, uranio y en general, de cualquier explotación cuyas escombreras sean ricas en sulfuros.

La Figura a continuación muestra los principales aspectos de la generación de aguas ácidas de mina^[5].

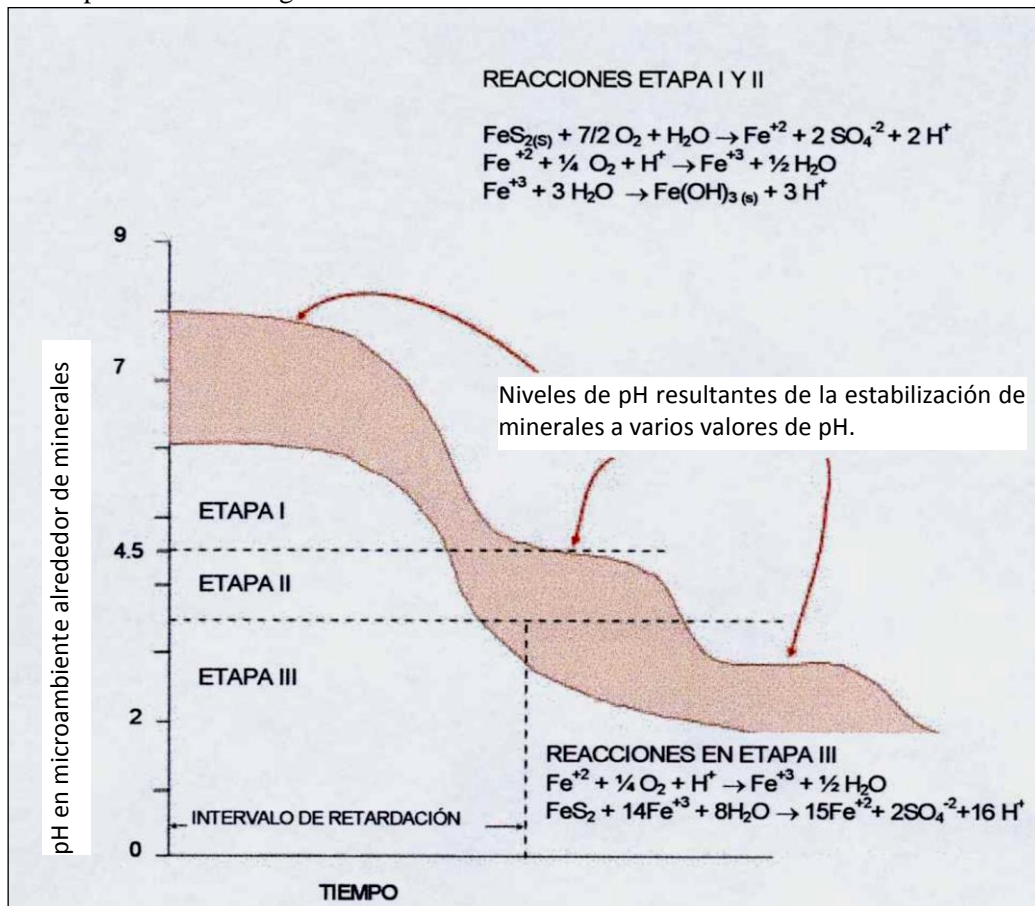


Figura 1. Etapas en la generación del drenaje ácido.

En una primera etapa se genera acidez y rápidamente se neutraliza en las etapas iniciales cuando la roca que contiene minerales sulfurados es expuesta al oxígeno y al agua. El drenaje de agua es casi neutro.

Es fundamentalmente un período de oxidación electroquímica. El oxígeno es el oxidante principal, al producir sulfato y acidez a partir de la oxidación de los minerales sulfurados.

Los minerales carbonatados, como la calcita ($CaCO_3$) presente en la roca, neutralizan esta acidez y mantienen condiciones que van de neutras a alcalinas ($pH > 7$) en el agua que fluye desde la roca.

La oxidación electroquímica del hierro ferroso es rápida a un pH igual o superior a 7 y el hierro férrico se precipita de la solución como un hidróxido. La velocidad de oxidación electroquímica de la piritas es relativamente baja, comparada con las etapas posteriores de oxidación, ya que el

hierro férrico no contribuye como oxidante. En esta etapa, el agua de drenaje se caracteriza generalmente por niveles elevados de sulfato, con pH cercano al neutro.

En una segunda etapa y medida que continúa la generación de ácido y se agotan o se vuelven inaccesibles los minerales carbonatados, el pH del agua disminuye y el proceso se encamina hacia su segunda etapa. Cuando el pH del microambiente disminuye por debajo de 4,5 ocurren reacciones de oxidación tanto electroquímica como biológicas. A medida que la velocidad de generación de ácido se acelera en las etapas II y III, el pH disminuye progresiva y gradualmente.

Los niveles de pH relativamente constantes representan la disolución de un mineral neutralizante que se vuelve soluble a ese nivel de pH. Si la oxidación continúa hasta que se haya agotado todo el potencial de neutralización, se presentarán valores de pH alrededor de 2.5. A estos pH el Fe(III) no precipitará como hidróxido y por lo tanto se mantendrá en solución, actuando en las reacciones de oxidación indirecta.

Ya en una tercera etapa, y a medida que los minerales alcalinos se consumen, se produce acidez a mayor velocidad que alcalinidad, el pH se vuelve ácido. Las reacciones dominantes se transforman de oxidación electroquímica a principalmente oxidación biológicamente catalizada. De las reacciones de oxidación sulfurosa, se produce hierro ferroso, que se oxida biológicamente y se convierte en hierro férrico. Este, a su vez, reemplaza el oxígeno como el oxidante principal.

En esta etapa, la velocidad de oxidación es considerablemente más rápida que en la Etapa I. El descenso del pH incrementa la velocidad de oxidación con un aumento de velocidades de 10 a un millón de veces más que aquellas generadas por oxidación electroquímica. En esta etapa, el agua de drenaje es generalmente ácida, caracterizada por sulfatos y metales disueltos en concentraciones elevadas. El

hierro disuelto se presenta como hierro ferroso y férrico

En algún momento en el futuro, décadas y –posiblemente– siglos después del inicio de la generación de estos ácidos, la velocidad disminuirá con la oxidación completa de los sulfuros más reactivos y el pH se incrementará hasta que la roca se torne sólo ligeramente reactiva y el pH del agua de drenaje no sea afectado.

El tiempo para cada etapa sucesiva puede variar de un período de días a cientos de años, dependiendo de los factores que controlen la generación de ácido.

La oxidación del ión ferroso ocurre en principio con y sin acción bacteriana. A medida que baja el pH, se incrementa la importancia relativa de la actividad de las bacterias, entre las que destaca la *Thiobacillus ferrooxidans*. Por debajo de pH=3-4, sólo se produce la oxidación bacteriana.

El principal problema relacionado con el drenaje ácido de minas es su afección a los suelos y las aguas superficiales y subterráneas. Además de la modificación del pH, el carácter ácido de estas aguas conlleva una mayor capacidad para poner en disolución metales (hierro, manganeso, arsénico, cobre, cinc, níquel, etc.). El resultado puede ser una degradación extrema del ecosistema acuícola o la imposibilidad de uso de las aguas para abastecimiento, no solo urbano sino incluso industrial, dado el carácter corrosivo que presentan sobre estructuras metálicas y de hormigón.

La figura que se muestra a continuación muestra un aspecto real de contaminación de aguas por drenaje ácido.



Figura 2. Contaminación de aguas por drenaje ácido.

4. CONTROL Y PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE AGUAS

El problema de generación de aguas ácidas de mina puede enfocarse desde dos perspectivas: prevención y tratamiento. En este trabajo abordaremos el tema de la prevención.

Las técnicas de prevención tratan de evitar que se den las condiciones que propician la oxidación de los sulfuros, lo cual se consigue básicamente por tres posibles vías:

- Barreras aislantes.
- Métodos químicos.
- Inhibición bacteriana.

4.1 Barreras aislantes

Se pueden citar la revegetación de terrenos y las barreras frente al agua y el oxígeno. El acondicionamiento y revegetación mitiga la llegada de agua y oxígeno a los sulfuros, conociéndose casos en los que se reduce hasta en un 50% la generación de aguas ácidas. Se trata por lo tanto de un método de atenuación del problema.

Las barreras frente al agua pasan por la impermeabilización de la superficie y los taludes de las escombreras. Normalmente es necesario además regularizar las pendientes para disminuir la erosión. Los materiales utilizados para el cubrimiento son diversos: arcillas, tierras compactadas, láminas sintéticas etc. La arcilla, cuando se dispone convenientemente y las láminas

sintéticas, son los materiales que más garantías ofrecen como impermeabilizantes, siendo inferior el coste de la primera.

La Figura 3, muestra la instalación de barreras de escurrimiento para prevenir la acción de aguas ácidas.

Adicionalmente y según la configuración orográfica en el entorno de la escombrera, puede ser necesario el practicar y mantener canales de guarda (perimetrales), con el objeto de que las aguas de escorrentía que fluyan desde las laderas colindantes no entren en contacto con los residuos.



Figura 3. Barreras protectoras para evitar escurrimiento de aguas ácidas.

Aparte de lo anterior (una impermeabilización eficaz también aísla el residuo del aire) el aislamiento respecto al aire se consigue fundamentalmente mediante lámina de agua. Este método se aplica en las balsas y presas de residuos, así como en explotaciones abandonadas, tanto a cielo abierto como subterráneas, si bien en este caso no cabe hablar de método aplicado sobre residuos. Considerando la primera de las reacciones anteriormente señaladas en la generación del drenaje ácido, se comprueba que el agua y el oxígeno son necesarios para desencadenar el proceso. La inmersión de los residuos bajo lámina de agua tiene por objeto aislar a los sulfuros del contacto con el oxígeno atmosférico y para conseguir tal fin, se precisa que no exista renovación (flujo) de las aguas en contacto con los residuos.

Inicialmente, el oxígeno disuelto en el agua reaccionará con los sulfuros según las reacciones ya expresadas. El consumo de este oxígeno, la ausencia de renovación y la baja difusividad de este elemento en el agua, determinan el establecimiento de un ambiente anóxico en el entorno de la masa de sulfuros que impide el avance del proceso.

4.2 Métodos químicos

Entre los métodos químicos para combatir la generación de aguas ácidas destacan la adición alcalina y la adición de fosfatos.

El efecto de la adición alcalina es triple; por una parte, se consigue en mayor o menor medida la neutralización de las aguas ácidas producidas. Por otra parte, las bacterias que oxidan el hierro precisan de un ambiente ácido para desarrollar su función. Además de lo anterior, a niveles de pH cercanos a neutro, se favorece la precipitación del hierro férrico, dando lugar a una pátina de recubrimiento sobre la superficie de los sulfuros que dificulta su ulterior oxidación.

A estos efectos, se utilizan generalmente sustancias como el hidróxido sódico (NaOH), roca caliza (CO_3Ca), cal (CaO , Ca(OH)_2) y carbonato sódico (Na_2CO_3).

La disposición de estos compuestos alcalinos puede llevarse a cabo interstratificándolos con los materiales de la escombrera o mezclados con ellos. Pueden igualmente colocarse como material de cubrimiento, facilitando la revegetación de la superficie de la escombrera si se ha contemplado la misma y es conveniente en todo caso, mezclar compuestos alcalinos de diferente solubilidad, de suerte que se procure una adición de álcalis continua en el tiempo.

El aporte de fosfatos en escombreras que contengan sulfuros, propicia la formación de fosfatos de hierro insolubles, lo que disminuye el hierro férrico disponible y ralentiza el proceso general de oxidación de la pirita.

4.3 Métodos de inhibición bacteriana.

En esencia se trata de inhibir la actividad de la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans*, responsable en gran medida del proceso de generación de aguas ácidas. Esta inhibición se aborda mediante la aplicación a la masa de residuos de surfactantes aniónicos o ácidos orgánicos.

Entre los primeros destaca el Sodio Lauril Sulfato (SLS), que se administra diluido mediante irrigación de las escombreras. Este compuesto ha mostrado ser muy eficaz, pero con un margen temporal de acción muy limitado (meses).

Para conseguir efectos de mayor duración, superiores a cinco años, se han desarrollado bactericidas de efecto retardado, que consisten en pellets o pastillas de tamaño centimétrico y constan de una matriz polimérica, un agente activo y otros compuesto químicos que se disuelven paulatinamente, percolando en la masa de residuos y creando un efecto continuo en el tiempo.

5. DISCUSIÓN

El Drenaje Ácido de Minas (AMD) es un fenómeno recurrente en la minería de hoy y que puede causar problemas graves en la disolución de metales pesados y contaminar aguas abajo los efluentes líquidos. Este fenómeno se torna más nocivo cuando la contaminación alcanza efluentes naturales utilizados para regadío y mantención de predios agrícolas. Los metales pesados arrastrados son captados por las plantas (legumbres, frutas) que posteriormente son ingeridas por los animales y seres humanos en particular, siendo estos metales acumulativos en el organismo vivo, produciendo graves alteraciones de salud, cáncer entre otras.

Sin embargo el Drenaje Ácido es hoy mucho más manejado que antes, y por de pronto si se toman las precauciones del caso, puede minimizarse largamente su efecto. Hoy existen tecnologías que

permiten controlarlo de tal manera que sus efectos sean mínimos.

Conviene citar en esta presentación el caso de la minera El Teniente de Codelco-Chile, que teniendo un problema de drenaje ácido al interior de su mina subterránea, supo revertir una situación negativa y transformar un problema en un fenómeno rentable que agrega valor a la empresa.

En efecto, constatada la presencia de soluciones acidas permanentes al interior de las instalaciones, y como producto del escurrimiento natural por la humedad asociada al lugar en que se encuentran los recursos, esto es en la alta cordillera, se comenzó a canalizar adecuadamente estos efluentes para posteriormente recuperar los metales valiosos, particularmente el cobre.

Hoy se ha optado incluso por agregar artificialmente agua en la época estival, para contar con un flujo permanente de solución conteniendo los metales a recuperar. Es una forma positiva de ver un problema ambiental que podría ser muy negativo.

La situación de drenaje ácido pasa en primera instancia por una buena caracterización de la situación para posteriormente optar por diferentes alternativas, las que podrían ser minimizar el efecto de cada uno de los reactivos participantes y detener la generación, o, al estilo de lo realizado en El Teniente, optar por una recuperación de los metales disueltos, lo que dara aún más valor a la operación minera.

AGRADECMIENTOS

Los autores participantes en esta publicación, agradecen el soporte de la Red MASyS para la participación en la reunión de Oruro, que permitirá generar redes mayores de contacto para desarrollar una minería subterránea sustentable.

REFERENCIAS

[1] CADORIN, LUCIANA et al. Avances en el Tratamiento de Aguas Ácidas de

Minas. Scientia et Technica Año XIII, No 36, Septiembre de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701.

[2] TOVAR PACHECO, JORGE A. Revista Latino-Americana de Hidrogeología, N°.3, p.99-109.

[3] <http://chile-hoy.blogspot.com/2010/04/mineria-subterranea-pilar-del-futuro-de.html>

[4] Residuos Mineros, Ingeniería ambiental 2006-07, Programa Operativo Integrado de Andalucía (Marco FEDER 2000-2006).

[5] ESCOBAR, BLANCA. Curso Ingeniería Ambiental.