

El presente artículo se refiere únicamente a la prevención y minimización de aguas ácidas, en su generación, sin entrar en la descripción de tratamientos activos, pasivos o mixtos de dichas aguas. Cuando existe riesgo de generación de aguas ácidas, con el fin de eliminar o, al menos, minimizar su aparición, deberían tenerse en cuenta criterios de diseño y gestión del riesgo. La prevención de la contaminación derivada de las actividades mineras se relaciona, estrechamente, con los métodos de explotación, el aporte de aguas (superficiales y subterráneas) y el tratamiento de las mismas. Con respecto a las formas de actuar, cabe distinguir aquellas acciones que se orientan hacia el objetivo de reducir la formación de contaminantes, y aquellas otras que implican el tratamiento de las aguas contaminadas. En general, la actuación no se ciñe a un sólo procedimiento, sino que es combinación de varios, y se acomete en función del problema específico a resolver, ya que su eficiencia puede ser muy diferente de unos casos a otros. Los métodos preventivos se basan en la eliminación de alguno de los elementos esenciales en la generación de aguas ácidas (sulfuro, oxígeno, humedad o bacterias catalizadoras). La elección entre uno u otro método, depende de las condiciones (origen, desagüe, grado de actividad, etc.), características (físicas y químicas) y carácter (permanente y temporal) del efluente, así como espacio disponible. Los tratamientos aquí expuestos, son tanto in situ, como confinados en espacios inundados o bajo lámina de agua, en huecos mineros superficiales aislados del agua, o eliminando la humedad mediante procesos de evaporatranspiración.

This article refers solely to the prevention and minimization of acid water when generated, without including any description of active, passive or mixed treatments for such water. When there is a risk of acid water being generated, design criteria and risk management should be taken into account for eliminating or at least minimizing it. Prevention of the contamination caused by mining is closely related to mining methods, the abundance of water (both surface and underground) and water treatment. With regard to the different approaches, a distinction must be made between actions aimed at reducing the formation of contaminating substances, and others involving the treatment of the contaminated water. In general, the measures taken are not limited to just one procedure, but are rather a combination of several different ones, and are undertaken according to the specific problem to be resolved, since their effectiveness may vary considerably in the different cases. Preventive methods are based on the elimination of one of the fundamental elements required for generation of acid water (sulphur, oxygen, humidity or catalyzing bacteria). Choosing one method or another depends on the conditions (origin, drainage, degree of activity, etc.), characteristics (physical and chemical) and nature (permanent or temporary) of the effluent, and on the available space. The treatments set out here are both on site and confined in flooded areas or under a sheet of water, in surface mines isolated from water, or by eliminating humidity using evapotranspiration processes.

Tratamiento de Aguas Ácidas. Prevención y Reducción de la Contaminación

/ JUAN CARLOS BAQUERO ÚBEDA (1,2) / RAFAEL FERNÁNDEZ RUBIO (2,3) / JULIO VERDEJO SERRANO (3)
/ DAVID LORCA FERNÁNDEZ (3)

(1) Cobre Las Cruces, S.A. Avda. 1º de Mayo, 46. 41860 Gerena (Sevilla); (2) Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Universidad Politécnica de Madrid. C/ Ríos Rosas, 21. 28003 Madrid; (3) FRASA Ingenieros Consultores. C/ Luna 45, 28120 Ciudad Santo Domingo (Madrid)

ANTECEDENTES

Un agua es ácida cuando su $\text{pH} < 7$. No obstante, ello no exige que deje de ser potable o resulte nociva hasta alcanzar niveles bastante inferiores (por ejemplo, deja de ser potable para $\text{pH} < 5.5$).

A no ser por causas antrópicas, resultan muy raros de encontrar $\text{pH} < 3.5$ ó $\text{pH} > 10.5$, existiendo una tendencia natural a su neutralización (por saturación,

precipitación, dilución, etc.), resultando estas anomalías las más agresivas.

La solubilidad de rocas y minerales, se ve fuertemente afectada por el pH del medio, de forma que, un agua ácida suele, además de ser nociva por su pH, ir acompañada de numerosos metales en disolución, que aportan una importante toxicidad al efluente.

Las aguas ácidas (Fig 1) se pueden formar

tanto en el interior como en la superficie, por oxidación de la pirita (FeS_2 u otros sulfuros) en presencia de humedad, expuesta a las condiciones atmosféricas, pudiendo acceder al sistema hidráulico subterráneo, contaminando acuíferos, o surgir como efluentes que vierten en cursos de agua superficial.

El presente artículo se refiere únicamente a la prevención y minimización de aguas ácidas, en su generación, sin entrar en la



fig 1. Problemática ambiental de las aguas ácidas. (a) Efluente de agua ácida cargada en metales pesados (cobre), en la Mina de Sossogo (Carajás, Brasil); (b) Efluentes ácidos en área minera abandonada de São Domingos (Portugal); (c) Río Odriel.

palabras clave: Aguas ácidas, factores generadores, control y minimización, tratamientos preventivos.

key words: Acidic waters, generation factors, minimization and control, preventive treatments.

descripción de tratamientos activos, pasivos o mixtos de dichas aguas.

Producción de aguas ácidas

La producción de aguas ácidas, está controlada por los siguientes factores:

- disponibilidad de pirita
- presencia de oxígeno
- existencia de humedad en la atmósfera
- disponibilidad de agua para transportar los productos de oxidación
- características de la mina o de los depósitos estériles

La velocidad de reacción depende de numerosas variables, como:

- pH y temperatura, del agua y ambiente
- tipo de mineral sulfuroso y superficie expuesta
- concentración de oxígeno
- agentes catalíticos y actividad química del hierro férrico
- energía de actuación química requerida para que se inicie la reacción
- presencia de *Thiobacillus ferrooxidans* u otras bacterias, que actúan como catalizadoras

Sobre algunas de estas variables se puede actuar, para reducir dichas aguas ácidas. El problema se plantea, muchas veces, cuando sobre una explotación minera subterránea se implanta una a cielo abierto, que es colectora de aguas de escorrentía, las cuales se introducen en la mina; este ha sido el caso, por ejemplo, de la Corta del Zanjón, en la mina de Reocín en Cantabria.



fig. 2. Muestreo hidroquímico en arroyos del entorno a Lousal (Portugal).

En ocasiones, la generación de aguas ácidas muestran fluctuaciones estrechamente ligadas a los ciclos de lluvias (Fig 2), como ha sido puesto de manifiesto en la mina de cobalto cuprífero de Black Bird (Idaho, USA), donde, por término medio, cerca del 75% de la descarga de metales pesados, tiene lugar en los meses de Abril y Mayo.

La acidez, con el descenso del pH del agua, tiene las siguientes consecuencias principales:

- el agua se hace fuertemente corrosiva
- la solubilidad de muchos metales pesados aumenta, con lo que las

aguas llegan a ser tóxicas

- el ecosistema fluvial se degrada, hasta ser incapaz de mantener muchas formas de vida acuática, y los sistemas acuíferos se contaminan

Cuando, por causas naturales o provocadas, se eleva el pH del agua comienza la precipitación de metales pesados. En este sentido puede decirse que cada metal disuelto precipita a un determinado pH (el manganeso es de los que requiere pH alcalinos más elevados para su precipitación).

GESTIÓN PREVENTIVA DE AGUAS ÁCIDAS

Cuando existe riesgo de generación de aguas ácidas, con el fin de eliminar o, al menos, minimizar su aparición, deberían tenerse en cuenta los siguientes criterios de diseño y gestión del riesgo:

1. Prevenir y minimizar la generación de aguas ácidas: Planificar adecuadamente la actividad y su entorno, caracterizando los posibles efluentes (sistemáticos o accidentales), así como sus efectos sobre el medio.
2. Detectar y caracterizar (caudales y concentraciones), tanto posibles focos generadores de contaminación (equipos o actividades), como puntos de vertido (continuo o accidental)
3. Actuar con rapidez y eficacia en la construcción de barreras.
3. Concentrar los efluentes y aislarlos del entorno.
4. Controlar la red hidráulica del entorno de forma continua, espacio-temporal, de acuerdo con valores guía.
5. Realizar el tratamiento de las aguas ácidas (caso de producirse).
6. Regenerar el medio.
7. Cuantificar los efectos.

La prevención de la contaminación derivada de las actividades mineras se relaciona, estrechamente, con los métodos de explotación, el aporte de aguas (superficiales y subterráneas) y el tratamiento de las mismas.

Con respecto a las formas de actuar, cabe distinguir aquellas acciones que se orientan hacia el objetivo de reducir la formación de contaminantes, y aquellas otras que implican el tratamiento de las aguas contaminadas.

En general, la actuación no se ciñe a un sólo procedimiento, sino que es combinación de varios, y se acomete en función del problema específico a resolver, ya que su eficiencia puede ser muy diferente de unos casos a otros.

Los métodos preventivos (Fig 3) se basan en la eliminación de alguno de los elementos esenciales en la generación de aguas ácidas (sulfuro, oxígeno, humedad



fig. 3. Tratamientos preventivos para la restauración minera. (a) Sellado de galerías mineras (Aljustrel, Portugal); (b) Sellado de pozos y galerías en Colliery, Shortwood (Bristol, Reino Unido).

o bacterias catalizadoras), tales como:

- impermeabilización de escombreras, cauces y áreas de riesgo potencial
- construcción de socavones de desagüe y canales perimetrales
- retirada, segregación y depósito selectivo de los materiales potencialmente acidificadores
- sellado de comunicaciones con el subsuelo
- depósitos subacuáticos e inundación,
- enmienda con materiales neutralizadores
- adición de bactericidas (sulfato de lauril sodio, benzoato de potasio, etc.) y enmiendas.

La elección entre uno u otro método, depende de las condiciones (origen, desagüe, grado de actividad, etc.), características (físicas y químicas) y carácter (permanente y temporal) del efluente, así como espacio disponible.

Donde es imposible evitar la oxidación de los sulfuros, la estrategia preferible es aislar los materiales que entrañan mayor riesgo y retener los productos de la oxidación para minimizar el daño ambiental. La opción menos deseable es tratar los drenajes ácidos resultantes y corregir los impactos que éstos generen.

Sea como fuere, es muy importante planificar las operaciones de prevención efectiva de la contaminación, desde el inicio de

la investigación minera, hasta el abandono de la explotación y, para ello, se requiere un conocimiento profundo de la hidrogeología del sector afectado, para prever los mecanismos de transferencia de los contaminantes hasta el sistema acuífero.

Pero no se puede perder de vista que, con respecto a la prevención de la contaminación, sólo se ha tomado conciencia en los últimos años, y que, con anterioridad, la minería se ceñía a conseguir la máxima recuperación económica del mineral, sin prestar mucha atención a la contaminación misma.

Esta pre-planificación permite evitar, o al menos minimizar, la contaminación, si ésta se produce. Existen en la actualidad técnicas adecuadas para la manipulación o el tratamiento corrector de dichas aguas, aunque a menudo dichas soluciones son complejas de aplicar, que precisa de asesoramiento experto en la materia.

Tratamiento in situ

Lo ideal podría ser proceder a la estabilización, impermeabilización y rehabilitación in situ, de los depósitos susceptibles de causar estos efluentes (Fig 4), ya que: se evitaría su manipulación; no se requeriría transporte; no se afectaría ambientalmente a otras áreas; se recuperarían áreas degradadas; etc.



fig 4. Tratamiento activo de aguas ácidas de mina. (a) Balsas de concentración y evaporación de aguas ácidas, en Aljostrel (Aljostrel, Portugal); (b) Cubrición y revegetación de taludes en escombreras activas (Carajás, Brasil).

La valoración de esta opción requiere:

- definir cartográficamente las superficies afectadas por cada uno de los depósitos de estériles,
- analizar la posibilidad de reducir estas superficies, apilando sobre depósitos existentes los residuos de

- poco espesor,
- estudiar la estabilidad geotécnica de los apiles, especialmente frente a deslizamientos,
- analizar la integración morfológica en el paisaje y, caso necesario, planificar su remodelación,
- calcular los volúmenes de materiales de baja permeabilidad y no reactivos, necesarios para encapsular los depósitos con un recubrimiento
- localizar áreas que pudieran aportar materiales litológicos de las calidades requeridas
- estudiar, como alternativa, el empleo de geomembranas de recubrimiento, con una cobertera de materiales inertes
- estudiar y definir la cobertera vegetal adecuada, para estabilización, lucha contra la erosión, e integración paisajística.

La secuencia típica de operaciones, para restituir la salida de efluentes ácidos de un depósito de estériles susceptible de generarlos, es la siguiente:

- Explanar y remodelar la superficie, de modo que el drenaje se produzca desde el centro hacia la periferia, de manera que no queden pendientes superiores al 15%. Se construirán canales periféricos, para desviar el agua de escorrentía que pudiera infiltrarse o acceder a los materiales apilados.
- Compactar la superficie del apile, de forma que se reduzca su permeabilidad y porosidad, y se mejoren sus características geotécnicas.
- Extender un material impermeable de cobertera.
- Colocar una capa drenante, para facilitar la circulación del agua, evitando su tendencia a infiltrarse.
- Extender una capa de tierra vegetal o mezcla, de materiales capaces de sostener una cubierta vegetal.

Un paso previo, a la resolución de los múltiples problemas que plantean las aguas ácidas, desde la óptica preventiva, pasa por reducir al máximo sus caudales, para tener que tratar menores volúmenes.

Este estudio, debe plantearse a nivel de anteproyecto, al objeto de tener no sólo una valoración técnica, sino también económica, que permita definir su viabilidad, bien para la totalidad de los depósitos de estériles, bien para parte de ellos. (Fig 5)

Almacenamiento en minas subterráneas inundadas o bajo lámina de agua

La mejor forma de evitar la oxidación de los materiales piríticos es su almacenamiento en condiciones anóxicas, es decir: bajo agua (al menos a 1.20 m de profundidad).

Para ello se requiere conocer el volu-

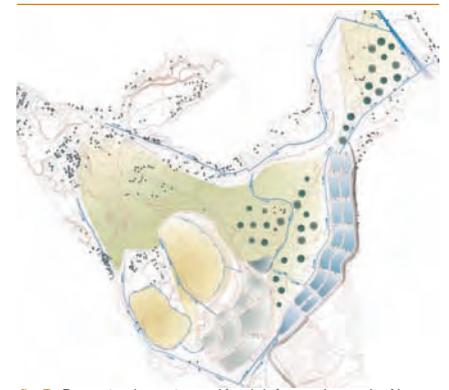


fig 5. Proyecto de restauración del área minera de Aljostrel (Aljostrel, Portugal).

men disponible en cada embalse, por debajo de la cota máxima de agua admisible, información que podrá conseguirse mediante batimetría. En todo caso, hay que tener en cuenta si existe algún problema geotécnico de estabilidad y de evacuación de máximas lluvias (balance hídrico), que deberá ser resueltos previamente.

Un procedimiento de actuación, que podría evitar problemas de estos depósitos de estériles (generación de aguas ácidas, degradación superficial del suelo, e impacto paisajístico), consiste en su reintroducción en las minas subterráneas, y su posterior inundación controlada.

Para analizar las posibilidades que ofrece esta opción será necesario determinar los emplazamientos, en la minería subterránea, que pudieran reunir condiciones adecuadas para este almacenamiento, en minas que esté previsto su abandono definitivo e inundación. Estos huecos mineros existentes deberán ubicarse, al tiempo que tendrá que ser analizada la viabilidad técnica de reintroducción de los estériles.

El aire no debe acceder al hueco minero, con lo cual cesa la producción de agua ácida, al evitarse la oxidación de la pirita.

Hay que tener en cuenta que si los hastiales de cualquier galería subterránea contienen sulfuros, se produce la oxidación directa, durante la explotación, por acción conjunta del aire y el agua. Los productos que se forman son ácido sulfúrico y depósitos metálicos solubles, que dan lugar a costras y sedimentos de vivos colores. Esta oxidación puede penetrar profundamente en la roca, a través de las fracturas mineralizadas. Cuando la mina se inunda, los productos de oxidación pueden afectar al agua allí almacenada.

Esto explica que la calidad de los efluentes de una mina inundada mejore

muy lentamente, ya que el agua que produce la mina no será de buena calidad hasta que no haya sido desalojada todo el agua contaminada contenida en ella, y ello requiere, normalmente, un período de muchos años.

Aunque la inundación reducirá la posterior oxidación de los sulfuros, puede contribuir a la contaminación, en algunos casos, al incorporar a minerales oxidados previamente, o al producirse un aporte de aguas ya mineralizadas que fluyan hacia los acuíferos, o a la escorrentía superficial.

Almacenamiento en huecos mineros de superficie

Una opción, que debe ser analizada para confinar, al menos, una parte de los depósitos de estériles reactivos, es la referente a la utilización de excavaciones realizadas en superficie para la explotación minera o para extraer materiales de relleno para la minería subterránea.

Los aportes de agua a los huecos mineros tienen una clara dependencia de las aguas superficiales. En estas condiciones es indudablemente que la mejor forma de reducir el aporte de aguas ácidas, a las labores mineras, consiste en disminuir el acceso de aguas superficiales a favor de las vías de circulación, que básicamente son las propias labores mineras y las fallas subverticales. Se requiere para ello:

- ubicar estos huecos hasta alcanzar una morfología superficial adecuada
- estudiar las características hidrogeológicas del entorno
- analizar la integración morfológica en el paisaje
- calcular los volúmenes de materiales de baja permeabilidad y no reactivos, necesarios para recubrir a los estériles aquí apilados
- localizar áreas que puedan aportar materiales litológicos de recubrimiento de las calidades requeridas
- estudiar, como alternativa, el empleo de geomembranas de recubrimiento, cubiertas por materiales inertes
- estudiar y definir la cobertura vegetal adecuada, para estabilización, lucha contra la erosión, e integración paisajística.

Por supuesto toda posibilidad de actuación tiene que tener en cuenta los nuevos volúmenes de estériles que proporcionará la reanudación de la actividad minera, caso de que así se decida y, en cualquier caso, tiene que evitar invalidar cualquier opción de actividad minera futura.

Eliminación por evaporación

Las aguas ácidas almacenadas en balsas, están sujetas a los procesos natu-

rales de precipitación- evaporación, en superficie libre de agua. En todo caso, y a efectos de establecer balances hídricos, conviene cuantificarla (mediante pluviómetro y tanque evaporimétrico, con la precaución de que el agua colocada en este equipamiento sea semejante al agua embalsada, ya que la tasa de evaporación depende de la salinidad total del agua).

Además de esta evaporación, en embalses, los volúmenes evaporados se pueden incrementar mediante aspersores, que micronicen el agua en pequeñas gotas en contacto con el aire.

En la ubicación de estas áreas de evaporación intensa, hay que tener en cuenta que el fenómeno de la evaporación está muy relacionado con el viento (oreo), por lo que estos aspersores deben situarse, siempre que sea posible, en superficies abiertas, donde corra el viento sin obstáculos, cuidando que no se produzcan aportes no deseados hacia el entorno.

Eliminación por evapotranspiración

Una forma de reducir los flujos subsuperficiales, hacia los materiales reactivos, es mediante una evapotranspiración forzada, conseguida mediante plantas freatofitas que sean compatibles con la calidad de las aguas.

En este sentido es necesario estudiar la posibilidad, en ciertos entornos, de sembrar plantas adecuadas que, cubriendo el objetivo de producir una evapotranspiración intensa, puedan convivir con las aguas ácidas. Las mejores experiencias se tienen con plantaciones de eucaliptos, que son verdaderos "árboles pozo" (por los volúmenes que son capaces de evapotranspirar), y que soportan acidez relativamente elevada.

En todo caso hay que realizar un estudio de las condiciones locales de suelos, clima, calidad de las aguas, y vegetación natural existente, para seleccionar las plantas más adecuadas. Una vez realizada esta selección deberá experimentarse en parcelas piloto, previamente a la adopción de la especie o especies adecuadas para estas plantaciones.

Hay que tener en cuenta que las freatofitas pueden tener interés tanto para reducir el agua, que accede por infiltración directa o escorrentía superficial a las masas de estériles o rocas reactivas, como para reducir el volumen de efluentes.

Programa de Vigilancia y Control

Puede entenderse como tal todo programa de auscultación continua, que permita

definir, en cualquier momento, las causas de los cambios de calidad de las aguas, las fuentes de contaminación existentes o potenciales, y la predicción de la naturaleza de los futuros cambios de calidad.

Desgraciadamente, tal control sólo incluye con frecuencia el muestreo de pozos o manantiales, y así se incluye como única práctica a realizar en muchos programas de auscultación. Sin embargo, este muestreo puede ser minimizado si se identifican las causas motivadoras de la contaminación y sus mecanismos de transporte, para permitir una predicción anticipada de los posibles cambios de calidad de las aguas.

Los principales controles a desarrollar son los siguientes (si es posible, a diferentes profundidades):

- determinaciones in situ, de temperatura (aire y agua), pH, Eh y conductividad
- control de caudales, tanto en bombos, como en manantiales como en cauces superficiales
- muestreo físico-químico del agua (determinación de la concentración en metales pesados y elementos tóxicos, nocivos o peligrosos)
- control de nivel piezométrico
- controles geofísicos eléctricos de resistividad, basados en el incremento de conductividad de las aguas ácidas
- control de tanques de almacenamiento y conducciones
- balance hídrico (precipitación y evapotranspiración), cuantitativo y cualitativo
- muestreo físico-químico de suelos potencialmente contaminantes (determinación de su ubicación, emplazamiento, valoración del riesgo, composición y potencial de acidificación).

Referencias

Fernández Rubio, R., Baquero Úbeda, J.C., Lorca Fernández, D. & Verdejo Serrano, J. (2002): *Tratamientos pasivos en humedales, de aguas ácidas con carga en metales pesados*. V Congreso Nacional del Agua y el Medio Ambiente.

—, R., León Fábregas, A. & Baquero Úbeda, J.C. (2005): *Impacto de las actividades mineras sobre la calidad de las aguas. Medidas de prevención*.

Ford, K.L. (2003): *Passive treatment systems for acid mine drainage*. Technical Note 409, Bureau of Land Management, 13 pp.

Skousen, J. (2000): *Overview of passive systems for treating acid mine drainage*. In *Reclamation of Drastically Disturbed Lands* (eds. Barnhisel R.I., Darmody R.G., and Daniels W.L.), American Society of Agronomy.