



## RESIDUOS DE INDUSTRIAS EXTRACTIVAS

GESTIÓN DE RESIDUOS  
Master en Ingeniería y Gestión  
Medioambiental

Curso 2015/2016

PROFESOR/A  
IVAN BOTAMINO GARCÍA



Esta publicación está bajo licencia Creative Commons Reconocimiento, Nocomercial, Compartirigual, (by-nc-sa). Usted puede usar, copiar y difundir este documento o parte del mismo siempre y cuando se mencione su origen, no se use de forma comercial y no se modifique su licencia. Más información:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

## 1. GENERACIÓN, CLASIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS INDUSTRIAS EXTRACTIVAS

Las actividades de extracción y concentración del mineral generan residuos mineros. Las características de estos residuos dependen del tipo de yacimiento y de las tecnologías de explotación y preparación utilizadas. Los residuos generados pueden clasificarse en dos tipos fundamentales: roca estéril (WASTE ROCK) y estériles de procesado del mineral (TAILINGS).



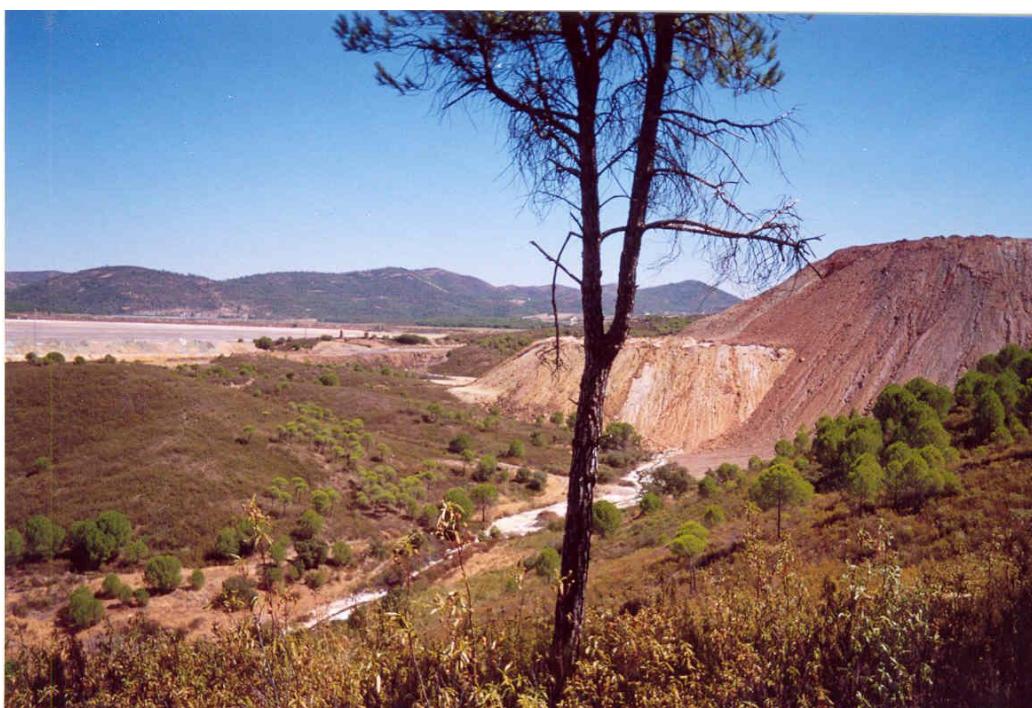
Figura 1: Diferentes áreas de explotación, procesado y almacenamiento de residuos en una explotación minera

Según los datos recogidos en el informe “Management of mining, quarrying, and ore-processing waste in the European Union” existen en la Unión Europea un total de 4.700 millones de toneladas de roca estéril almacenadas en escombreras (de los cuales 2.500 millones de toneladas corresponden a España) y 1.200 millones de toneladas de estériles de procesado de mineral (323.000 toneladas en España).

Atendiendo a su origen la minería del carbón produce la mayor cantidad de residuo minero (2.400 millones de toneladas de roca estéril), seguida de las explotaciones de metales no ferrosos (1.550 millones de toneladas de roca estéril y 860.000 toneladas de estériles de procesado).

## 1.1. Residuos de extracción de mineral

Las rocas estériles de mina son aquellos materiales sin valor económico extraídos para permitir la explotación del mineral útil. Estos materiales son almacenados en escombreras en zonas próximas a la explotación, fundamentalmente debido a los costes de transporte asociados.



*Fig. 2: Escombreras de estériles en las minas de Río Tinto*

La cantidad de estéril generado depende del sistema de extracción minero empleado. Así, las explotaciones a cielo abierto generan un volumen mucho mayor de estériles que las explotaciones subterráneas. También tiene una influencia decisiva las características geológicas del yacimiento.

## 1.2. Residuos de procesado de mineral

El proceso de concentración de las menas sulfuradas (Cu, Pb y Zn), se basa en la separación densimétrica del material concentrado mediante flotación. En ella, tras la molienda fina del material, éste se introduce en unas celdas de flotación donde, mediante espumantes, la mena es concentrada y retirada como espumas por la parte superior. El resto de los sulfuros no aprovechables son retirados en forma de lodo acuoso (tailings) hasta la balsa de estériles (o relaves).

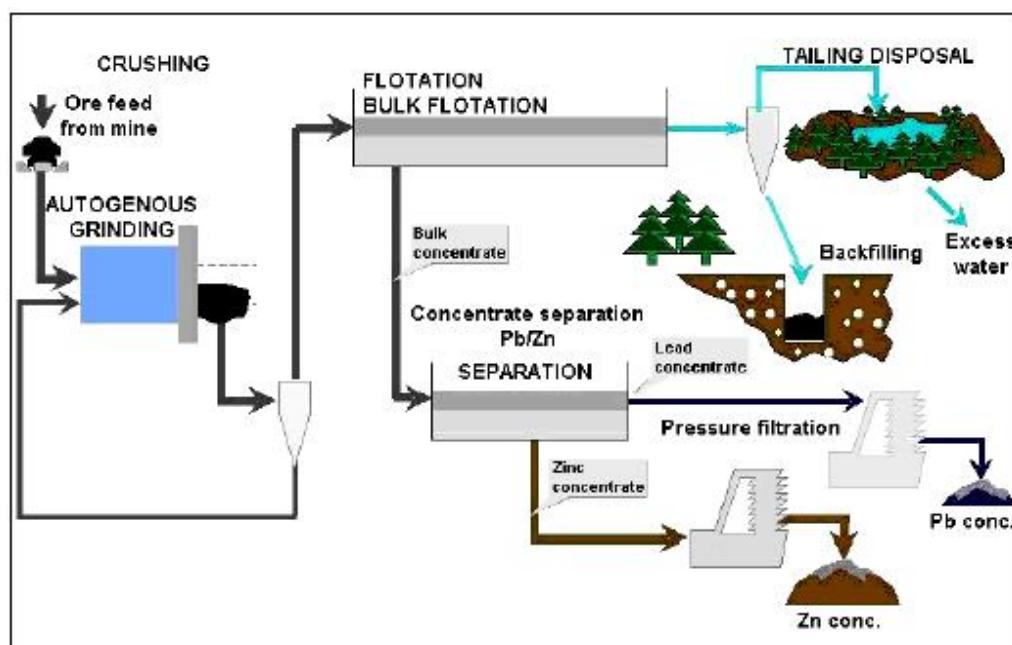


Fig. 3: Proceso de concentración por flotación de una mena mixta de Pb y Zn



Fig. 4: Imagen de una balsa de estériles (AURUM Dam, Baia Mare, Rumania)

La formación de la balsa de estériles requiere la construcción de un dique de contención. El desarrollo de las balsas de estériles es secuencial, construyéndose diques sucesivos a medida que se va llenando la balsa.

En ocasiones, y cuando las características del emplazamiento lo permiten, las rocas estériles procedentes de la explotación y los lodos de concentración son almacenados en antiguas zonas que ya no se encuentran en actividad (“backfilling”), tanto en el caso de explotaciones a cielo abierto como subterráneas.

## 2. MARCO LEGAL. DIRECTIVA 2006/21/CE

Con fecha 15 de marzo de 2006 se aprobó la **Directiva 2006/21/CE, sobre la gestión de los residuos de las industrias extractivas**, normativa específica para la gestión de los residuos mineros, con especial incidencia en aquellos aspectos que afectan a los riesgos para la salud y el medio ambiente. La propuesta abarca los residuos de todos los sectores de las industrias extractivas, si bien afecta principalmente a aquellos sectores que constituyan la causa más probable de riesgos para el medio ambiente o accidentes graves. Por ello, se excluyen los residuos con bajo riesgo, tales como las tierras y los inertes procedentes de la prospección.

Se define como “**instalación de residuos**” como cualquier zona asignada para la acumulación o depósito de residuos, tanto en estado sólido como líquido, durante un período superior a un año. Dentro de esta definición estarían incluidas las escombreras y las balsas de estériles.

En la propuesta se establecen las condiciones que debe cumplir una instalación para la obtención de una licencia de explotación, de forma que se garantice la existencia de las medidas medioambientales y de seguridad suficientes en las instalaciones de residuos. En este sentido, el explotador deberá definir las características de la instalación de residuos y el plan de gestión de residuos; asegurar el cumplimiento de una política de prevención de accidentes graves y adopción de un sistema de gestión de la seguridad, así como un sistema de garantías económico y medioambiental.

Un concepto importante es que se establece la obligatoriedad de caracterizar los residuos de forma previa a su eliminación, con lo que se asegura que los métodos de gestión aplicados son los adecuados, con vistas a asegurar la estabilidad a largo plazo de las escombreras y las balsas de estériles. Los criterios de caracterización se definen en la propia Directiva (Anexo II).

En el texto se definen las obligaciones generales para la gestión de residuos, con el fin de conocer, antes de iniciar la extracción minera, la cantidad y características de los residuos que se van a producir, así como cual va a ser su gestión futura. Para ello, la entidad explotadora elaborará un **Plan de Residuos** en el que se definirán las características de los residuos mineros y cantidades totales estimadas que se producirán; descripción de la actividad que genera dichos residuos y tratamientos posteriores; posibles afecciones al medio que puede provocar la eliminación de los residuos y medidas preventivas que se adoptarán; procedimientos de control y vigilancia propuestos; plan propuesto para el cierre y mantenimiento posterior; y las medidas de prevención de la contaminación del agua y el suelo. Este Plan de residuos se revisará periódicamente.

Así mismo, se definen las medidas para garantizar la seguridad en las instalaciones de residuos, de forma similar a la Directiva Seveso II, estableciendo una política de prevención de accidentes graves y el sistema de gestión de la seguridad. En este sentido, la entidad explotadora elaborará un **Plan de emergencia**, con el fin de controlar y contener los accidentes graves reduciendo al mínimo sus efectos, estableciendo las medidas necesarias para proteger la salud de las personas y el medio ambiente; comunicar la información necesaria al público y autoridades competentes; y restauración y limpieza del medio ambiente tras un accidente grave.

Otro aspecto importante de la propuesta es que establece la obligatoriedad de elaborar planes de cierre para las instalaciones de gestión de residuos, así como que la entidad explotadora presente las garantías financieras que aseguran la rehabilitación medioambiental adecuada de las instalaciones de eliminación tras su cierre.

En el año 2009, esta norma se traspone al derecho español mediante la publicación del **REAL DECRETO 975/2009**, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras.

### 3. PROBLEMAS AMBIENTALES ASOCIADOS A LOS RESIDUOS MINEROS

Los residuos mineros pueden provocar alteraciones sobre el medio ambiente, fundamentalmente sobre el agua, que se relacionan seguidamente:

- Transporte de los materiales sólidos como polvo a otras áreas debido a procesos erosivos y el viento.
- Incorporación de las partículas sólidas al agua, por arrastre superficial de polvo en las escombreras.
- Modificación de la concentración de metales e iones en el agua, debida fundamentalmente a los efectos del drenaje ácido (ver capítulo siguiente).
- Cambio del pH del agua.
- Las escombreras producen un efecto importante de compactación del suelo, que modifican sus características geomecánicas y alteran el desarrollo natural del suelo.
- En las balsas de lodos, puede producirse una oxidación *in situ* del material sulfurado incluido en los lodos, que suele implicar la puesta en solución de metales pesados.
- Muerte de aves por contacto con la fase líquida superior de la balsa.
- Muerte de otros animales por atrapamiento en estos materiales.
- Fuerte Impacto visual de las escombreras y balsas de estériles, que habitualmente son de gran tamaño.

Un problema muy importante respecto a los depósitos mineros, y en especial en las balsas de estériles, es la estabilidad mecánica de los diques de contención. La rotura de los diques puede provocar el vertido y dispersión de los contaminantes contenidos en las aguas y en los lodos de estériles mineros.

Este es el caso de la rotura del dique de contención de la balsa de estériles de la mina de **Aznalcóllar** el 25 de abril de 1998 (Sevilla). El resultado fue el vertido de unos 3,6 Hm<sup>3</sup> de agua y 0,9 Hm<sup>3</sup> de lodos, sobre las riberas del río Guadiamar a lo largo de 40 Km para los lodos y 50 Km para las aguas, con una anchura media de 400 metros. La superficie total abarcada fueron 4.400 Ha. Los lodos no llegaron al Parque Nacional de Doñana, pero las aguas invadieron la región externa de éste, desembocando en el Océano Atlántico.



Rotura de la presa de la balsa que contenía los residuos tóxicos en la mina de Aznalcóllar, el día del vertido.

En este vertido produjo una contaminación intensa debida al Sb, Pb, As, Bi y Cu, aunque por su toxicidad destacan el Cu, Cd, Pb, As y Zn. La concentración media en los suelos de todos los elementos considerados como contaminantes superaban claramente los valores de referencia de los suelos no contaminados. En el caso del As, Zn, Cd, Cu y Pb se superaban los niveles de intervención.



Lodos tóxicos recubriendo el suelo. Al fondo suelo no contaminado.  
Río Guadiamar, proximidades de Aznalcázar

## 4. DRENAJE ÁCIDO DE MINA

### 4.1. Drenaje ácido de roca

El drenaje ácido de roca (*Acid Rock Drainage ARD*) es el proceso de formación de soluciones sulfatadas, con frecuencia con un contenido importante de metales disueltos, resultado de la oxidación química y biológica (principalmente por la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans*) de los minerales sulfurados, concretamente la pирита ( $FeS_2$ ) y la pirrotina ( $FeS$ ), así como de la lixiviación de los metales pesados asociados.

El drenaje ácido se caracteriza por un pH bajo (con valores que oscilan entre 1,5 y 5,5), asociado a una acidez creciente en el tiempo y una alcalinidad decreciente, y concentraciones elevadas de sólidos totales disueltos, de sulfato de hierro y otros metales.

Es frecuente que estas aguas presenten un color rojizo debido a la presencia del ión férrico ( $Fe^{+3}$ ); aunque a veces, puede aparecer un color azul verdoso en caso de que el hierro disuelto se encuentre en la forma de ión ferroso ( $Fe^{+2}$ ), que tenderá a oscurecerse por oxidación a ión férrico. Debido a ello, se origina la habitual coloración rojiza en cauces y canales de escorrentía del drenaje ácido.

Este proceso se produce de forma natural, debido a la exposición de las menas sulfuradas, por efecto de la erosión y la actividad tectónica, a la acción de la oxidación atmosférica y de las bacterias. La neutralización de estas aguas ácidas, bien *in situ*, como a una cierta distancia de la fuente de generación, provoca la precipitación de los metales disueltos, generando un yacimiento de tipo “gossan”, que han sido históricamente objeto de aprovechamiento minero.

Bajo condiciones naturales, el suelo que recubre los minerales sulfurados minimiza su contacto con el agua y el oxígeno, permitiendo que la generación de ácido prosiga a una velocidad tan baja cuyo efecto en la calidad general del agua sea insignificante o indetectable. Sin embargo, las operaciones de extracción y concentración asociadas a la actividad minera aceleran la producción de estas reacciones químicas, al exponer enormes volúmenes de roca sulfurada (con el correspondiente aumento de su superficie de contacto) a la acción del aire y del agua.

En este caso, se habla de un drenaje ácido de mina (*Acid Mining Drainage AMD*), de las mismas características que el anterior, pero en este caso de origen antropogénico. Debido a

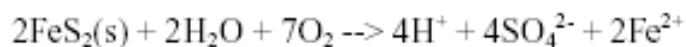
Este efecto, las principales fuentes de contaminación por drenaje ácido son las escombreras y las balsas de lodos.

## 4.2. Proceso de formación

La generación del drenaje ácido se desarrolla en tres fases caracterizadas por el pH del agua. Estas etapas permiten determinar la evolución del drenaje en el tiempo empleándose para el diagnóstico de la situación de un emplazamiento concreto.

### Fase I

Los minerales sulfurados, fundamentalmente la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), son oxidados químicamente por el oxígeno presente en la atmósfera, que es el oxidante principal.

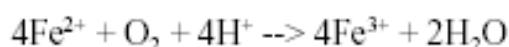


En esta fase, el disulfuro es oxidado para producir iones hidrógeno y sulfato, que son los productos de disociación del ácido sulfúrico en disolución. El ión ferroso, se oxida más lentamente, a valores más bajos de pH.

Dentro de un rango de pH entre 5 y 7, los metales liberados por el desgaste de los minerales generalmente precipitan y están relativamente inmóviles, debido a que los minerales alcalinos presentes en la matriz de la roca neutralizan la acidez, originando la precipitación del hierro como óxido o hidróxido. A medida que estos materiales se consumen, o se encapsulan por cubiertas de precipitado, el pH disminuye progresivamente, entrando en la siguiente fase del desarrollo.

### Fase II

El pH del microambiente desciende hasta el valor de 4,5. En esta fase, las reacciones de oxidación son tanto de tipo químico como biológico. Así, para valores de pH entre 3,5 y 4,5 la oxidación del ión ferroso según la reacción:



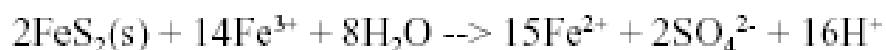
Es catalizada por una variedad de la bacteria filamentosa *Metallogenium*. Cuando el pH se sitúa por debajo de 3,5 la reacción es catalizada por la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans*.

En esta fase aún persisten concentraciones elevadas de ión ferroso y sulfato, y pese a la elevada acidez, las concentraciones de metales pueden ser bajas.

### Fase III

Las reacciones catalizadas por bacterias son predominantes. Como se ha comentado, se produce la oxidación del ión ferroso a férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ), el cual se convierte en el oxidante dominante, reemplazando al oxígeno.

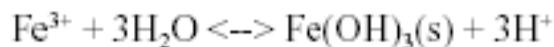
Si la formación del ión férrico tiene lugar en contacto con la pirita, se produce la disolución de la misma, de acuerdo con la siguiente reacción:



La disolución de la pirita por acción del ión férrico, junto a la oxidación del ión ferroso constituye el ciclo de disolución de la pirita.

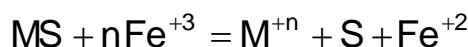
Debido a la oxidación de la pirita, el pH desciende rápidamente para estabilizarse en torno a valores de pH entre 2,5 y 3. Dicha estabilización está determinada por las condiciones óptimas requeridas para el desarrollo de las bacterias, que como se ha mencionado, controlan las reacciones que se producen en esta fase.

Para valores de pH superiores a 3, el ión férrico precipita como hidróxido férrico, que da el color rojizo característico asociado a la oxidación de los sulfuros, según la reacción:



Sin embargo, para valores de pH entre 2,5 y 3, y en presencia de ácido sulfúrico y sulfato férrico, se dan las condiciones adecuadas para que el ión férrico pueda actuar como oxidante. En ausencia de este ión, el ácido sulfúrico es capaz de disolver algunos carbonatos metálicos y óxidos minerales, pero tiene un efecto poco significativo sobre los sulfuros metálicos.

Sin embargo, el ión férrico es capaz de disolver muchos sulfúricos metálicos (plomo, cobre, zinc, cadmio, etc.) según la reacción:



Donde  $MS$  corresponde a un sulfúrico metálico mineral, y el resto de las especies se encuentran en estado acuoso.

#### 4.3. Técnicas de control

Se denomina control del drenaje ácido a las medidas empleadas para reducir la producción del drenaje ácido y minimizar su impacto sobre el medio ambiente. La técnica aplicada varía en función de la etapa de desarrollo en la que se encuentre el proceso de formación del drenaje ácido.

##### A) Control de la interacción entre el mineral y el oxígeno

Se pretende reducir o minimizar la interacción entre el mineral y el oxígeno, evitando que se produzcan las reacciones de oxidación de los minerales sulfurados que dan lugar al drenaje ácido. Algunas de las técnicas empleadas son:

- Cubiertas y sellos
- Desulfuración y aislamiento selectivo de residuos sulfurosos
- Mezcla o aditivos básicos
- Inhibición de las bacterias
- Microencapsulación de la piritita
- Cubiertas de agua y descarga subacuática

##### B) Control de la interacción entre el mineral y el oxígeno

Otra metodología de control es actuar sobre la relación entre el agua y el residuo, minimizando la movilización de los contaminantes mediante escorrentía e infiltración. Se emplean las siguientes técnicas:

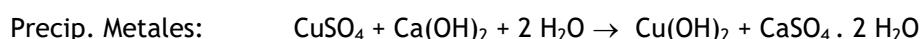
- Reducción de la infiltración
- Vertido conjunto de escombros y lodos
- Recogida y desvío de las aguas superficiales

## 4.4. Recogida y tratamiento

La recogida de las aguas procedentes de un depósito de residuos mineros se lleva a cabo, en el caso de las aguas de escorrentía superficial, mediante la construcción de una red de cunetas y zanjas de recogida que las conducen hasta el punto de tratamiento. Para el control de las aguas subterráneas se emplean zanjas profundas de intercepción, muros pantalla para el desvío y conducción, y pozos de bombeo y extracción. Su dimensionamiento estará condicionado, en un caso, por la escorrentía superficial del emplazamiento y por el modelo hidrogeológico del terreno.

### 4.4.1. Tratamientos activos

Consisten en la neutralización del drenaje ácido mediante la adición de compuestos alcalinos como el hidróxido sódico, bicarbonato sódico o el carbonato cálcico. Como resultado se produce una elevación del pH, lo que provoca la precipitación de los metales presentes en el agua, en forma de lodos.



Habitualmente, se realizan en plantas de tratamiento situadas en la propia instalación minera. Su coste es elevado, y el volumen nominal de tratamiento suele ser reducido.

Los lodos generados deben ser depositados en una zona especialmente acondicionada, con el fin de mantener las condiciones de pH, evitando la redisolución de los metales. Una práctica actual consiste en mezclar estos lodos con los procedentes de la concentración por flotación, de naturaleza alcalina, para su disposición conjunta.

### 4.4.2. Tratamientos pasivos

Estos sistemas se basan en la neutralización del drenaje ácido mediante el contacto con reactivos naturales, o creando un entorno cuyas condiciones limiten la producción de este fenómeno. Algunas de las técnicas empleadas se describen seguidamente.

#### Canal de caliza abierto

Este es el sistema más simple de tratamiento pasivo. Consiste en poner hacer circular el drenaje ácido a través de un canal recubierto de caliza. El principal problema es que, debido al contacto con el oxígeno atmosférico, el ión férrico presente en las aguas precipita como

hidróxido sobre la caliza, reduciendo en el tiempo la generación de alcalinidad. En ocasiones se instala una lámina sintética en el fondo del canal para evitar la infiltración.

### Open Limestone Channel

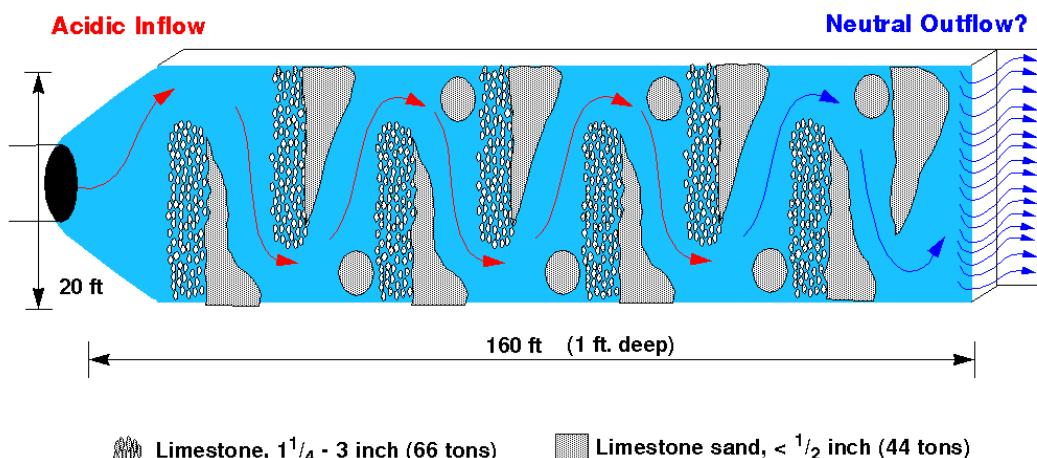
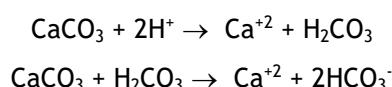


Fig. 7.: Circulación del agua en un canal de caliza abierto

### Canal de caliza anóxico

Se construye un canal de grava caliza gruesa por el que se hace pasar el drenaje ácido, que disuelve la caliza generando alcalinidad como bicarbonato:



El canal se recubre con arcilla para evitar la entrada del oxígeno y la precipitación de los metales en forma de hidróxido sobre la caliza.

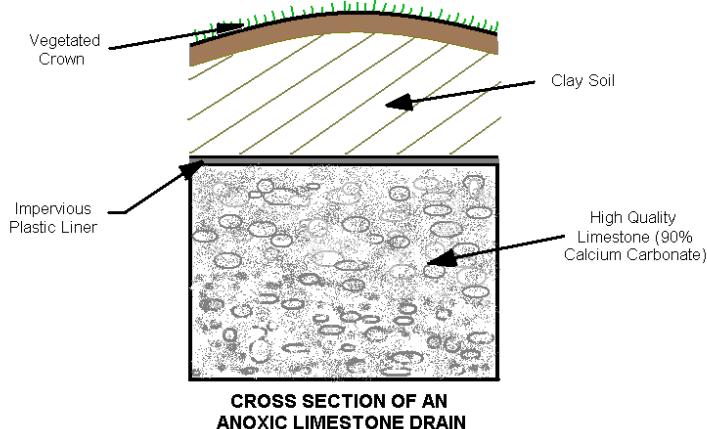


Fig. 8: - Sección transversal de un canal de caliza anóxico

### Pantanos

Los pantanos poseen una base con el substrato adecuado para sostener la vegetación emergente. El drenaje ácido es conducido mediante flujo continuo hacia el pantano, manteniendo una lámina de agua de 10-50 cm sobre la base del mismo. La vegetación habitual es la *Typha Latifolia*.

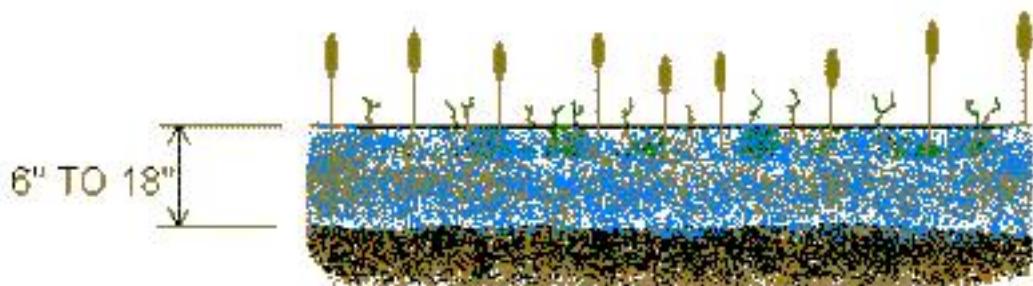


Fig. 9: Sección transversal de un pantano aeróbico

Los pantanos aeróbicos se utilizan únicamente para aguas que contienen hierro, aluminio y manganeso en forma reducida, o pretratadas mediante un canal de caliza anóxico. Los metales precipitan en forma de hidróxidos, en una secuencia controlada de concentraciones y pH. Su funcionamiento es similar al de los pantanos naturales. Presentan una elevada relación superficie/volumen que maximiza la disponibilidad de oxígeno.

Los pantanos anaeróbicos se caracterizan por un flujo subsuperficial, adecuado para el tratamiento de aguas con altos niveles de oxígeno disuelto, ión férrico y metales. Su forma es similar a la de los pantanos aeróbicos, pero contienen una capa delgada de sustrato, que genera alcalinidad y produce la reducción de la acidez.

Los metales precipitan como sulfuros o formando complejos. Esto es debido a la reducción directa del sulfato a sulfuro de hidrógeno, en una reacción catalizada por las bacterias especializadas (*Desulfovibrium* y *Desulfotomaculum*). El precipitado de sulfuro de hierro es más denso y menos voluminoso que el del hidróxido férrico, y se mantiene estable dentro del lodo siempre que no varíen las condiciones anóxicas.

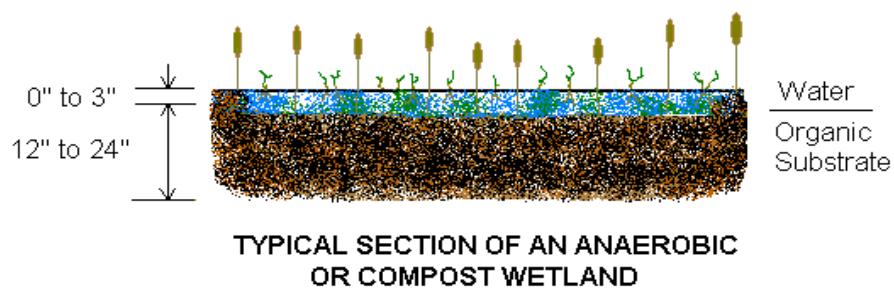


Fig. 10: Sección transversal de un pantano anaeróbico

#### Sistemas de flujo vertical

Estos sistemas combinan los mecanismos de tratamiento de los canales de caliza abiertos y de los pantanos anaeróbicos. Para ello, se forma celdas de tratamiento con una capa de grava caliza y drenaje de fondo sobre la que se dispone una capa de sustrato orgánico, y una lámina de agua estática. El agua circula a través del sustrato y posteriormente del nivel calizo, siendo descargado a través del drenaje de fondo. El oxígeno disuelto es eliminado por las bacterias aeróbicas y la bacteria reductora de la zona anaeróbica genera alcalinidad. En la capa caliza, el carbonato es disuelto por las aguas anóxicas, produciendo alcalinidad adicional.

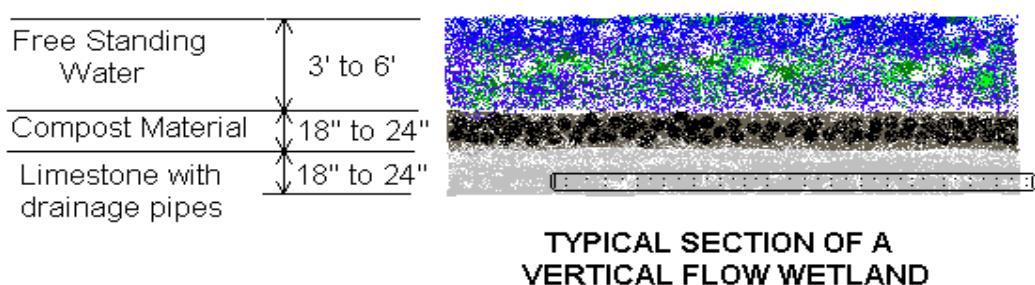


Fig. 11: Sección transversal de un sistema de flujo vertical

## 5. DOCUMENTACIÓN RECOMENDADA

### 5.1. Bibliografía

- “Plan Nacional Integrado de Residuos (dic. 2008)”. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- “Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería”, IGME (1999).
- “Management of mining, quarrying and ore-processing waste in the european union”, DG Environment, Comisión Europea (2001).
- “Acid Mine Drainage; Innovative Treatment Technologies”, C.Costello, U.S. Environmental Protection Agency (2003).
- “Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities”, Comisión Europea (Julio 2004).

## Índice

<b>1. GENERACIÓN, CLASIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS INDUSTRIAS EXTRACTIVAS .....</b>	<b>2</b>
1.1. Residuos de extracción de mineral.....	3
1.2. Residuos de procesado de mineral .....	3
<b>2. MARCO LEGAL. DIRECTIVA 2006/21/CE.....</b>	<b>6</b>
<b>3. PROBLEMAS AMBIENTALES ASOCIADOS A LOS RESIDUOS MINEROS .....</b>	<b>8</b>
<b>4. DRENAJE ÁCIDO DE MINA.....</b>	<b>10</b>
4.1. Drenaje ácido de roca.....	10
4.2. Proceso de formación .....	11
4.3. Técnicas de control.....	13
4.4. Recogida y tratamiento .....	14
4.4.1. Tratamientos activos.....	14
4.4.2. Tratamientos pasivos .....	14
<b>5. DOCUMENTACIÓN RECOMENDADA .....</b>	<b>18</b>
5.1. Bibliografía.....	18