

# Mitigación de drenaje ácido en minas subterráneas aplicando fangos artificiales. Caso: mina Orcopampa

Mitigation of acid drainage in underground mines applying artificial wetland.

Case: Orcopampa mine

Estanislao De la Cruz Carrasco<sup>1</sup>

---

## RESUMEN

Los drenajes ácidos de minas subterráneas son una de las principales fuentes de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas por consiguiente del medio ambiente.

Este fenómeno puede permanecer por mucho tiempo si no se toman medidas adecuadas como el tratamiento pasivo cuyo fundamento son los procesos físico, químico y biológico que tiene lugar en los fangos naturales, en las que la reducción bacteriana de los sulfatos y la oxidación e hidrólisis catalizada por bacterias son las actividades más importantes. La aplicación práctica son los fangos aeróbicos y los fangos anaeróbicos artificiales, los que demuestran resultados satisfactorios en la reducción de la cantidad de metales disueltos y la elevación del pH de los efluentes y la disminución de sulfatos.

Esta tecnología se investigó, estudió e implementó en los Estados Unidos, cuyos resultados han sido muy satisfactorios en lo que se refieren a la disminución de los metales disueltos, el aumento del pH y la disminución de sulfatos.

En el Perú se implementó, en la unidad Orcopampa de la Cía Minas Buenaventura en la Quebrada Tintaymarca, como parte del Programa de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA) (BISA 1996) cuyo procedimiento tiene dos fases: De laboratorio y la implementación en el terreno. Los resultados han sido satisfactorios en el que los fangos aerobios y los fangos anaerobios son los elementos fundamentales en la Mitigación del Drenaje Ácido de Mina (DAM).

**Palabra Clave:** Mitigación, Drenaje ácido.

## ABSTRACT

The Acid drainages of underground Mines, are one of the main sources of contamination of superficial and underground waters therefore of environment.

This phenomenon can remain for a long time if it does not take suitable measures as the passive treatment whose foundation are the processes physical, chemical and biological that takes place in the natural wetland in which the bacterial reduction of sulphates and the oxidation and hydrolysis catalyzed by bacteria, are the most important activities. The practical application are the aerobics wetlands and the artificial anaerobic wetlands, those that demonstrate to satisfactory results in the reduction of the amount of dissolved metals and the elevation of pH of the effluents and the sulphate diminution.

This technology was investigated, studied and implemented in the United States, whose results have been very satisfactory in which they talk about the diminution of dissolved metals, the increase of pH and the sulphate diminution.

In Peru was implemented, in the unit Orcopampa of the Company Minera Buenaventura in the broken Tintaymarca, as part from the Program of Adjustment and Environment Manager (PAMA) whose procedure has two phases: Of laboratory and the implementation in the land. The results have been satisfactory in which the aerobic wetlands and the anaerobic wetlands are the fundamental elements in the Mitigation of the Acid Drainage of Mine (DAM).

**Keywords:** Mitigation, Acid drainage.

---

<sup>1</sup> Profesor del Departamento Académico de Ingeniería de Minas - FIGMMG.  
E-mail: edelacruz@unmsm.edu.pe

## INTRODUCCIÓN

Las operaciones mineras causan impacto en el ambiente por la formación de aguas ácidas en el interior de la mina, en las canchas de desmontes y las canchas de relave.

El presente trabajo de «Mitigación de drenaje ácido en minas subterráneas aplicando fangos artificiales», es una aplicación práctica del tratamiento pasivo.

Los métodos de tratamiento activos de aguas ácidas tienen un costo muy elevado, por lo que no se puede mantener esta tecnología por un período prolongado una vez finalizada la vida de la mina. Máxime teniendo en cuenta que el problema de las aguas ácidas puede perdurar, según las estimaciones de Younger (1997) por cientos de años. Se han investigado diversos métodos de tratamiento pasivo los que da buen rendimiento en la neutralización del pH y la eliminación de metales pesados. Además, requieren poco mantenimiento y por su bajo costo pueden ser asumidas por las empresas durante períodos de tiempo una vez clausurada la instalación minera (Watzlaf, 1997b).

Los métodos de tratamiento pasivo se basan en los mismos principios físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en los fangos naturales (wetlands), en donde se mitigan las aguas contaminadas, consiguiendo la eliminación de metales y la neutralización del pH. Hay una variedad de fangos: los aerobios, los anaerobios, los drenajes anóxicos calizos (ALD, Anoxic Limestone Drains), los sistemas sucesivos de producción de alcalinidad (SAPS, Successive Alkalinity Producing Systems) y las barreras reactivas permeables cuando son aguas subterráneas (PRB, Permeable Reactive Barriers). En la práctica estos métodos se emplean solos o combinados, dependiendo de la caracterización que se tiene al drenaje ácido (Aduvire O., 2000).

## JUSTIFICACIÓN

La mitigación de aguas ácidas aplicando fangos artificiales es una técnica nueva que se requiere implementar en el Perú, para remediar las aguas ácidas que drenan de las bocaminas de muchos pasivos ambientales existentes en el territorio y tiene una gran importancia desde el punto de vista ambiental, social, económico y tecnológico.

- Ambiental: La mitigación por fangos artificiales es un procedimiento que en forma pasiva nivela el pH del agua y reduce los metales disueltos, hasta alcanzar los límites máximos permisibles que fija el sector correspondiente, cuyo producto del tratamiento no contaminan ríos, laguna, flora y la fauna.
- Social: Desde el punto de vista social, la mitigación cuida el entorno en el que viven las comuni-

dades o las ciudades, no degradando los suelos, no generando enfermedades y por consiguientes favoreciendo el desarrollo sostenible de la zona.

- Económico: El tratamiento activo con cal, hidróxido de calcio e hidróxido de sodio es muy costoso, por lo que el tratamiento pasivo con fangos artificiales es muy económico, basta preparar las pozas de tratamiento aerobio y anaerobio, el substrato correspondiente para cada fango y se hace discurrir el agua ácida. Los fangos mitigan como consecuencia de los fenómenos físico, químico y bacteriano hasta alcanzar los límites máximo permisible.
- Tecnológico: Es una tecnología nueva de tratamiento de aguas ácidas que se forma en la explotación de minerales, que se pueden aplicar en la mediana y pequeña minería.

## OBJETIVO

### Objetivo general

Disminuir el grado de contaminación del drenaje ácido, para ello será necesario la supresión de la acidez, la precipitación de los metales pesados, la eliminación de los sólidos en suspensión y la disminución de sulfato.

### Objetivos específicos

- Buscar el substrato apropiado para el tratamiento eficiente de los efluentes del drenaje ácido en la zona en estudio.
- Configuración y construcción de fangos artificiales.
- Difundir el resultado del estudio para solucionar problemas de drenaje ácido en las minas subterráneas en el Perú

## FUNDAMENTO TEÓRICO

La formación de las aguas ácidas en las minas subterráneas (Nordstrom y Alpers (1999)) describen el proceso de oxidación de la pirita; debido a la facilidad con la que el aire entra en contacto con los sulfuros –a través de las labores mineras (galerías y cruceros), por los poros existentes en las Canchas de Desmonte y el contacto de los depósitos de relave con la atmósfera–. Dichos autores consideran que los factores que más afectan a la generación ácida son el volumen, la concentración, el tamaño de grano y la distribución espacial de la pirita.

La oxidación de la pirita va a dar lugar a la formación de  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{H}^+$ . Esta reacción provoca un incremento en el total de sólidos disueltos y un aumento de la acidez, que irá asociado a una disminución del pH, a menos que sea neutralizada la acidez generada. Si el ambiente circundante es lo suficiente-

mente oxidante, entonces muchos iones ferrosos se oxidarán a iones férricos (etapa 2). Por lo general, por encima de un pH 3, el ion férrico formado precipita mediante hidrólisis como hidróxido, disminuyendo por tanto el  $\text{Fe}^{3+}$  en solución, mientras que el pH baja simultáneamente. Por último, algunos cationes férricos ( $\text{Fe}^{3+}$ ) que se mantienen en solución, pueden seguir oxidando adicionalmente a la pirita y formar  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{H}^+$ .

## ESTUDIO GENERAL DE FANGOS

Los fangos son depósitos o estanques poco profundos excavados que contienen: agua, tierras naturales, substrato, plantas y microorganismos (ÑIQUE 2004).

Es necesario conocer las otras denominaciones de los fangos para tener idea del tema que se está desarrollando.

En los tratados, estudios e investigación que se realiza en los EE.UU. se denomina *Wetland* y sus traductores los hacen como humedales, pero el concepto se refiere a la definición ya descrita; otros, lo denominan Pantanos que abarca una gran variedad de ellos.

También se llama ciénaga, marisma, pradera mojada y otras denominaciones.

## Componentes principales de fangos

### Agua

El agua es el factor más importante para diseñar un fango, pequeños cambios en la hidrología pueden tener efectos significantes en un fango. Por la gran superficie y poca profundidad, el sistema de fango interactúa bastante con la atmósfera por la lluvia y a la evapotranspiración.

### Substratos

Utilizados para construir fangos, incluye, tierra, arena, grava, rocas y materiales orgánicos como el compost. Sedimentos y humus se acumulan en el fango por la baja velocidad del agua. Los substratos, sedimentos y humus son importantes por varias razones:

- Material orgánico donde se realiza el intercambio de materiales y es el ambiente para microorganismos y es fuente de carbón, la fuente de energía de las actividades bacterianas.

### Vegetación

Las plantas juegan un importante papel en el proceso de tratamiento:

- El detritus orgánico y el carbono expulsado por las plantas durante la función clorofílica proporcionan abundante alimento a las bacterias oxidantes.
- La presencia de vegetación intensifica la actividad bacteriana y favorece la eliminación de hierro en el agua y la sedimentación de los precipitados.
- La densidad de la vegetación de un fango afecta muchísimo su hidrología, primero el agua encuentra obstrucción en las ramas, hojas, raíces y segundo bloquea el sol y el viento.

Las especies más utilizadas y que han dado mejores resultados es el carrizo (*Thypha latifolia*) y la totora (*Juncos Lubricatus*).

## ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

La mitigación del drenaje ácido en minas subterráneas aplicando fangos artificiales comprende dos etapas de estudio que tienen objetivos definidos:

- Investigación en laboratorio.
- Implementación en el terreno (Figueroa R., 2005).

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

Para la mitigación de drenaje ácido que sale de la bocamina Santiago y bocamina Tudela, minas subterráneas de unidad de producción Orcopampa, se han aplicado fangos artificiales, los que se han hecho en dos etapas:

- A nivel de laboratorio y
- En el terreno.

### Prueba Estática

#### Laboratorio Caracterización Físico-Químico del Efluente, en la estación Santiago y Tudela

La Tabla 1 muestra el resultado del análisis de los efluentes de la estación Santiago ES-1, Tudela ET-1 y la mezcla de ambos ET-2.

Luego de buscar los diferentes substratos en la zona en estudio, se formó 29 combinaciones de diferentes proporciones, las que se dejó macerar dos semanas, se agregó aguas ácidas a razón de 150 ml en cada botella. Realizado el muestreo, se encontró 7 botellas con resultados satisfactorios, de los cuales la botella N° 6 ha tenido los mejores resultados, de un pH inicial 3,8 sube a pH 7,3 (C.M. Buenaventura, 1996).

La reducción de sulfato de un inicial de 1332 y un final de 370.

Con relación al número de bacterias sulfato reductores, se tiene lo siguiente:  $8,0 \times 10^{-8}$  nmp/g, que significa que el número de bacterias es lo suficiente para que pueda reducir el sulfatos.

Tabla 1. resultado del análisis de los efluentes

Parámetro	ES-1	ET-1	ET - 2	NMPELMM*
PH	2,80	3,30	3,17	>5,5 - 10,5<
MV	225	201	183	
O <sub>2</sub> (mg/l)	2,90	3,60	1,62	
US/cm	2402	1675	1848	
Temp °c	11,4	11,0	10	
Q l/seg	0,52	0,42	2,54	
TSS (mg/l)	85	80	81	50,0
Cu (mg/l)	2,74	0,93	5,16	1,00
Fe (mg/l)	24,2	19,60	20,6	2,00
Pb (mg/l)	0,26	0,18	0,08	0,50
Zn (mg/l)	38,39	12,02	10,18	3,00

\* NMPELMM: Niveles Máximos Permisibles para Efluentes Líquidos Minero-Metalúrgicos. Promedio anual. Fuente: Cia. Minas Buenaventura S.A.

### Prueba Dinámica - Laboratorio

Con los substratos de la botella N° 6, se prepara un biorreactor en el que se deposita los siguientes componentes:

- Piedra clasificada de río
- Arena clasificada de río
- Substrato:
  - Estiércol de cordero
  - Sedimento del parque ecológico
  - Aserrín

Luego de tres semanas de incubación, se hace pasar el efluente problema, luego se recibe en un pequeño recipiente. El resultado es el siguiente:

- Se observa que el pH sube a 7.01.
- Hay reducción en mg/L de cobre, fierro, zinc y plomo.
- Mayor concentración de las bacterias sulfato reductoras.  
(C.M. Buenaventura, 1998).

### Implementación en el terreno

Una vez diseñado y construido el diagrama de flujo el agua ácida proveniente de la bocamina Santiago y bocamina Tudela ingresan:



Fotografía de las instalaciones del fango artificial en el terreno.

Primero a la poza de sedimentación, la caracterización del agua ácida que ingresa es la siguiente:

Ph = 3,17, T.S.S. (mg/l) = 81, Cu . (mg/l) = 4,8, Fe. (mg/l) = 26,7,  
Pb . (mg/l) = 0,07, Zn . (mg/l) = 9,64.

Los mismos que ingresan al fango aeróbico con la siguiente caracterización:

Ph = 3,3, T.S.S . (mg/l) = 28,7, Cu .(mg/l) = 4,8,  
Fe .(mg/l) = 26,7,  
Pb .(mg/l) = 0,07, Zn .(mg/l) = 9,64.

En este fango ocurren una serie de procesos de oxidación, formando óxidos e hidróxidos, el hierro ferroso que está en disolución, forma óxido férrico e hidróxidos, insoluble que precipitan con lo que disminuye cationes del agua.

Cuando el pH es menor a 4, la velocidad de oxidación es rápida; la reacción se debe fundamentalmente a la acción de una serie de bacterias aerobias oxidantes de género *Thiobacillus* cuyo resultado es:

pH = 4,71, T.S.S . (mg/l) = 28,7, Cu . (mg/l) = 0,39, Fe .(mg/l) = 0,31,  
Pb .(mg/l) = 0,2, Zn . (mg/l) = 5,28.

Además las plantas acuáticas juegan un papel importante en el proceso de tratamiento, especialmente la totora (*Juncos Lumbricatus*).

El efluente problema ingresa al fango anaeróbico. En éste hay bacterias del género *Disulfo*, que reducen el sulfato, esta reducción es un proceso que desencadena en forma natural, cuando hay ausencia de oxígeno y cuando existe abundante materia orgánica y sulfato.



## RECOMENDACIONES

- Hacer conocer la tecnología empleada en la mitigación del drenaje ácido de las minas subterráneas Santiago y Tudela a las Empresas de Pequeña y Mediana Minería Nacional para que puedan aplicar en la solución de los problemas del drenaje ácido.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Aduvire O. (2000). *Prevención de la formación y tratamiento por métodos pasivos de aguas ácidas de lluvias y escombreras*.
2. Ñique M. (2004). *Glosario ambiental*.
3. Figueroa R. (2005). *Treatment of mine acid effluent with wetlands at Orcopampa mine in the Peruvian Andes*.
4. Cía. Minas Buenaventura, Unidad Orcopampa (1996). *Trabajos internos. Muestreo en puntos estratégicos*.
5. Cía. Minas Buenaventura, Unidad Orcopampa (1998). *Trabajos Internos*.
6. B.I.S.A. (1996). *Programa de adecuación y manejo ambiental de la mina Orcopampa*.
7. Younger P.L. (1997). *The longevity of mini water pollution: a basis for desicion-making. The science of the total Environment*.
8. Watzlaf. (1997). *Passive treatment System for the treatments of mine drainaje: Annexing limestone drainages*.
9. Nordstom D.K. y Alfes C.M. (1999). *Geochemistry of acid mine water*.