



Trabajo elaborado por:

Ing. Priscila Gamonal Pajares



Tratamiento de drenaje de ácidos de minas en humedales construidos

RESEÑA

Varios estudios referentes a humedales construidos para el tratamiento de drenajes ácidos de mina demuestran resultados satisfactorios en la reducción de la cantidad de metales pesados y acidez. Los procesos aeróbicos y anaeróbicos apuntan a quitar este agente contaminador pero principalmente los procesos anaerobios tales como reducción bacteriana del sulfato muestran un mejor funcionamiento. La presencia de plantas, microorganismos y sustancias orgánicas es esencial para alcanzar un tratamiento acertado. Las plantas sirven como hábitat para poblaciones microbianas que actúan en el proceso de remoción y las sustancias orgánicas proporcionan una fuente de carbón para plantas y microorganismos, de tal modo realzan el proceso de remoción también.

Los mecanismos complejos implicados en el tratamiento de drenajes ácidos de la mina todavía no se explican en toda su magnitud. La carencia de un diseño claro hace difícil la aplicación de humedales construidos en el campo de la industria de explotación minera. Por lo tanto, otras investigaciones serán, de hecho, muy útiles para la aplicación posterior de esta tecnología en el mejoramiento de aguas contaminadas por drenaje ácido de la mina.

I. INTRODUCCIÓN

La industria de explotación minera es una de las actividades más problemáticas en todo el mundo. La extracción minera y su proceso son fuente de muchos contaminantes que están dispuestos en el ambiente, de ahí la contaminación del agua, el suelo y el aire. La exposición de los minerales sulfurosos al aire, agua, procesos microbianos y oxidación produce drenaje ácido de mina, caracterizado por su alta acidez y alta cantidad de metales pesados disueltos. Cuando esta agua contaminada alcanza los cuerpos del agua, las alteraciones del ecosistema de hecho ocurrirán. La flora y la fauna pueden ser afectadas y los recursos hídricos pueden tornarse dañinos para el consumo humano o los propósitos agrícolas e industriales. También la infiltración del drenaje ácido de la mina puede contaminar suelos y el agua subterránea.

Los humedales construidos se han considerado como una de las posibles soluciones a largo plazo del drenaje ácido de la mina. Varias investigaciones han revelado los resultados positivos con respecto al uso de humedales artificiales para tratar las aguas contaminadas por actividades mineras.

Esta tecnología permite optimizar los mismos procesos que se encuentran en humedales naturales: filtración, sedimentación, inmovilización física y química, y descomposición química y biológica. Además, los humedales construidos proporcionan a un método efectivo y de bajo costo para remover agentes contaminadores del drenaje ácido de la mina.

Aunque en algunos casos el tratamiento en humedales construidos no puede alcanzar el estándar de efluentes, centenares de estos sistemas son ahora usados para disminuir concentraciones de contaminantes de minas activas, reclamadas y abandonadas antes de que el agua sea liberada.

1.1. Objetivo

El objetivo del presente estudio es proporcionar información sobre el funcionamiento de humedales construidos en el tratamiento de drenaje ácido de mina, explicando el mecanismo utilizado en el proceso de remoción e identificando las principales ventajas y limitaciones de esta tecnología.

II. DRENAJE de ÁCIDO DE LA MINA (DAM)

2.1. ¿Qué es DAM?

Drenaje ácido de mina es el agua contaminada originada de la explotación minera, ya sea superficial o profunda, típicamente de alta acidez, rica en sulfato y con niveles elevados de metales pesados, principalmente hierro, manganeso y aluminio. Debido a la alta cantidad de hierro oxidado, el drenaje ácido de la mina es a menudo rojizo coloreado.

Las concentraciones medidas del drenaje de la mina de carbón se extienden a partir del 50 a 300 mgFe/L, 20 a 30 mgMn/L, 20 a 2000 mg SO₄²⁻/L, y 3,0 a 5,5 unidades estándares del pH.

2.2. Cómo se forma el DAM?

El drenaje ácido de la mina ocurre cuando los minerales del sulfuro se ponen en contacto con el oxígeno y el agua, condiciones favorables para su oxidación química o a la oxidación rápida por bacterias tales como *Thiobacillus ferrooxidans*. Algunos autotrophs de hierros oxidados tales como *Leptospirillum ferrooxidans*, *Thiobacillus thiooxidans* y *Sulfolobus brierleyii* se pueden asociar también a la oxidación mineral biológica.

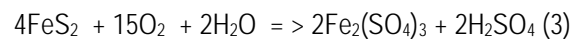
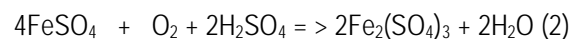
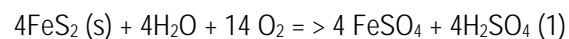
La alta acidez de DAM es causada a menudo por la oxidación de la pirita, la forma cristalina del sulfuro del hierro (FeS₂). Como resultado de esa oxidación, el ácido sulfúrico se genera dando condiciones ácidas a los efluentes de la mina. La pirita es comúnmente asociada tanto con las situaciones de minas de carbón como las minas de metal, "pero el drenaje ácido de minas de metal presenta un problema más severo que la mayoría de drenajes de mina de carbón porque los agentes prioritarios de contaminación tal como AS, Cd, Pb, Hg, Cu y Zn pueden estar presentes en peligrosas concentraciones" (Wildeman y Laudon, 1989).



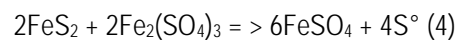
Forma Natural de la Pirita

2.3. ¿Cómo se oxida la pirita se oxida?

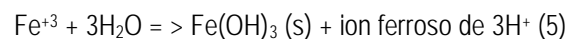
La pirita, el mineral más común de sulfuro, se puede oxidar por mecanismos directos. Estos mecanismos han sido explicados por Silver (1989), y son ilustrados por la serie siguiente de ecuaciones:



La ecuación (1) muestra la oxidación directa de la pirita con formación de sulfato ferroso, que es entonces oxidado a sulfato férrico, en la ecuación (2) los "microorganismos pueden catalizar significativamente el índice de oxidación de la pirita especialmente cuando median la oxidación de FE (II) a FE (III)" (Wildeman y Laudon, 1989). El ion férrico formado puede entonces oxidar rápidamente el mineral según la ecuación (4):



O puede ser hidrolizado produciendo el hidróxido férrico como precipitado:



El ión ferroso (ecuación 4) puede entonces ser oxidado biológicamente al ion férrico, y del sulfuro elemental al ácido sulfúrico.

III. TECNOLOGÍA DEL TRATAMIENTO: CONSTRUIR HUMEDALES

3.1. Descripción de la tecnología

El término "humedales construidos" se refiere a un área diseñada y construida para contener la planta de humedales a través de la cual, las aguas residuales pasan para ser tratadas.

El propósito de los humedales construidos para tratamiento es permitir que ocurra la reacción química y biológica natural en el sistema de tratamiento, y no en el cuerpo de recepción de agua. Las plantas y los microorganismos desempeñan un papel importante. Las plantas proporcionan un área superficial para microbios y para transportar el oxígeno produciendo una zona de oxidación en la rizosphere donde adicionalmente existen poblaciones microbianas. Este complejo de vegetación y microbios tiene una alta eficiencia en modificar nutrientes, metales y otros compuestos.

Esta tecnología se está volviendo atractiva para tratamiento de drenaje de mina puesto que él ofrece mayores ventajas sobre el sistema de tratamiento convencional (como método de tratamiento químico). El uso de químicos y energía están virtualmente eliminados. Sin embargo después del tratamiento, el agua puede requerir un tratamiento químico adicional, de tal modo que se ahorra dinero.

Debido a sus características cómodas, los humedales construidos están siendo utilizados en muchos países alrededor del mundo mejorando la calidad del agua del drenaje ácido de mina. Los humedales construidos ofrecen varias ventajas Hammer (1989), porque son:

- Relativamente económicos para construir y operar
- Fáciles de mantener
- Eficaces y confiables para el tratamiento de aguas residuales
- Relativamente tolerantes a los cambios en las tarifas de cargamento hidráulicas y biológica
- Puede proporcionar beneficios ecológicos ,
- Reconocidos como una buena alternativa de tratamiento por muchos reguladores y grupos ambientales.

Sin embargo, algunas desventajas de los humedales construidos incluyen:

- Requisitos de área a ser usada relativamente grandes
- Criterios de diseño y operación actual imprecisos
- Complejidad biológica e hidrológica
- Diferencias en funcionamiento con el cambio de las estaciones
- Posibles problemas con olor y mosquitos

3.2. Los tipos de humedales construidos

Hay dos tipos básicos de humedales construidos clasificados por régimen hidrológico. Los sistemas de aguas superficiales y los sistemas de aguas subterráneas. Ambos tipos son excavaciones bajas, alineadas para prevenir la infiltración y llenadas de grava o de la piedra. La grava o la piedra soporta las raíces de la planta y proporciona superficies en las cuales los microorganismos crecen. Las plantas y los microbios están implicados en el proceso del tratamiento de aguas residuales. Muchos humedales construidos consisten en dos o tres células en series. Las plantas que son usadas en el humedal varían de entrada a salida con las plantas cercanas a la entrada que son arraigadas y capaz de manejar grandes cantidades de aguas residuales; plantas arraigadas más profundas están situadas cerca del extremo del enchufe.

Varias encuestas indican que tanto los humedales superficiales y como los subterráneos se pueden utilizar con eficacia en el tratamiento de DAM.

La mayoría de sistemas de lámina de cama utilizados para tratamiento aeróbico de DAM son operados bajo condiciones de flujo superficial, mientras que el flujo subterráneo es recomendado para régimen anaeróbico para promover el proceso de reducción de sulfato.

3.2.1. Sistemas de humedales superficiales para flujo libre de agua

Este sistema consiste en canales donde el nivel del agua está sobre la superficie de la tierra y la vegetación se arraiga y emerge hacia la superficie. Las bajas velocidades y la presencia de plantas proporciona las condiciones propicias para la sedimentación y la filtración. Biofilms en superficies de la planta transforman a los agentes contaminadores en formas inofensivas.

La mayoría de los humedales de libre agua superficial son charcas bajas con una profundidad de agua de 10 a 50 centímetros. El cuadro 2 ilustra conceptos básicos de humedales superficiales construidos.

Witthar (1993) indica que un mayor éxito ha sido obtenido con humedales superficiales en tratamiento de drenaje de ácidos de mina debido al bajo mantenimiento requerido para su funcionamiento.

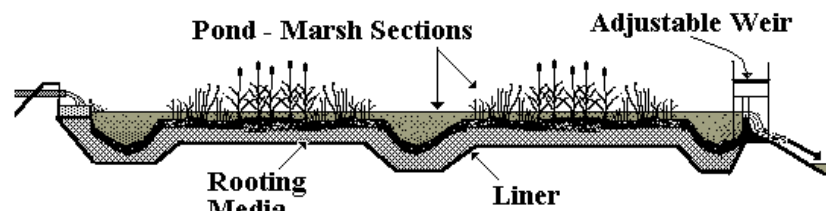


Figura 2. Sistema de aguas superficiales

3.2.2. Humedales subterráneos para el tratamiento de flujos

Este sistema consiste en canales donde las aguas residuales se infiltran por un medio poroso, tal como rocas, grava o arena gruesa que utilizan el sistema de raíces de vegetación. Las plantas de humedales fueron desarrolladas para contribuir al retiro y transformación de la contaminación proporcionando áreas superficiales activas biológicamente, a través de la captación de nutrientes y con la creación de una rizosfera oxidada. La última característica resulta del transporte activo del oxígeno a las raíces sumergidas de las plantas.

Las profundidades están típicamente entre 0,6 y 1,0 m y el fondo del cauce se inclina para reducir al mínimo el flujo del agua por tierra (Kadlec et al., 2000).

Este sistema ofrece algunas ventajas como: (1) menos área requerida, ya que las áreas superficiales para la absorción, filtración y los biofilms son mucho más altos; y (2) se reducen los insectos y los problemas del olor, puesto que las aguas residuales permanecen debajo de la superficie de la grava (EPA, 1993). Pero se debe hacer notar que un problema común encontrado es el inadecuado gradiente hidráulico, que da lugar a flujos superficiales (Kadlec et al., 2000) y también es más difícil de mantener (Witthar, 1993).

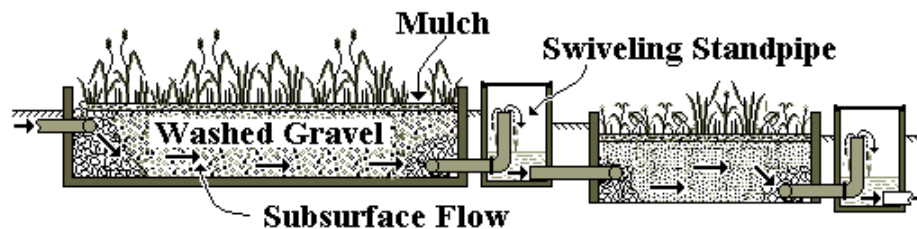


Fig. 3. Sistemas de flujo superficial

3.3. Los procesos de retiro

El drenaje ácido de mina principalmente es problemático debido a la alta cantidad de metales disueltos y a la alta acidez en su composición. El tratamiento en humedales construidos está dirigido a la remoción de los metales pesados y al aumento del pH. En esta sección se explican ambos procesos.

3.3.1 El retiro del metal

La aplicación de los humedales para remover los metales en drenaje ácido de minas es relativamente reciente, comenzando en los años 80's (Campbell, 1999). Sin embargo, en los últimos 20 años, el conocimiento referente a esta capacidad de humedales construidos está creciendo y, hoy en día, éstos son altamente apreciados por su alta capacidad de acumular los metales de rastro principalmente por la adsorción, la precipitación y complexation, pero incluso cuando los estudios muestran resultados positivos en el mejoramiento de DAM, las preguntas todavía siguen buscando los mecanismos exactos y a los factores que controlan.

El retiro del metal se asocia altamente a la acción de plantas y de microorganismos. Varios investigadores destacan las capacidades de plantas para contribuir al retiro del metal. Cooper et al. (1996) indica que los macrofitos juegan un papel importante en estos procesos puesto que pueden proveer oxígeno y la materia orgánica a la matriz.

Adicionalmente, Kadlec et al. (2000) menciona que las plantas del humedal pueden potencialmente estimular el crecimiento de bacterias que oxidan el metal por transferencia del oxígeno en la rizosfera. Y de la misma manera Skousen et al. (1994) acentúa la capacidad de las plantas de los humedales de estimular procesos microbianos. Los procesos principales implicados en el retiro del metal se explican como siguen:

La adsorción y el intercambio catiónico

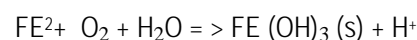
Implica el atascamiento de partículas o de sustancias disueltas en la solución ya sea en la planta o la superficie de la matriz. En una reacción del intercambio catiónico, los iones positivamente cargados del metal en la solución se unen a los sitios negativamente cargados en la superficie del material de la adsorción (Kadlec et al., 2000). "las características del intercambio catiónico de los substratos de los humedales se han atribuido a los grupos funcionales del carboxy (- COOH) en los ácidos de los tejidos finos celulares de las plantas " (Kadlec et al., 2000).

Debido a estas características de metales, los materiales orgánicos como setas, abono y aserrín se agregan a los suelos para realzar el retiro del metal. Por ejemplo, Skousen et al. (1994) señala que la absorción sobre turba y aserrín era responsable de quitar el 50% a 80% de los metales en DAM. Por otra parte, Kent (1994) indica que la presencia en los suelos de la arcilla en un sistema superficial, realza las oportunidades del retiro por la adsorción.

Procesos Microbiano-mediados

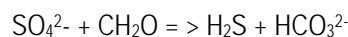
Zonas aerobias y anaerobias pueden estar presentes en un humedal construido. Las bacterias que oxidan el metal están presentes en la zona aerobia y causan la precipitación de los óxidos de metal, mientras que las bacterias sulfato reductoras están presentes en las zonas anaerobias y causan la precipitación de sulfatos.

Según Kadlec et al. (2000), la oxidación de metal mediada por microbios, *Thiobacillus ferrooxidans*, seguida por la precipitación subsecuente del oxyhidroxide del hierro, se considera el mecanismo más importante del retiro de metales de los humedales que tratan aguas residuales ricas en metal de la mina. En forma desequilibrada de la ecuación:



La oxidación del metal tiene la desventaja de producir iones de hidrógeno, de tal modo que la acidez aumenta. Cooper et al. (1994) informa que en el tratamiento de DAM usando las camas de lámina y la oxidación de los iones ferrosos resulta en gotas significativas en pH. También se puede observar que si no se presenta suficiente alcalinidad para proporcionar la capacidad tapón, la hidrólisis del ion férrico (Fe^{3+}) disminuirá en pH.

La reducción de sulfato por medio microbiano consume iones de sulfato y produce hidrógeno sulfuroso y alcalinidad en forma de ion de bicarbonato. En la forma desequilibrada de la ecuación, donde CH₂O representa una molécula orgánica simple:



El H₂S disuelve e ioniza para dar los iones del sulfuro, que reaccionan con un rango de los iones del metal para producir precipitaciones del sulfuro del metal. La precipitación de metales como los sulfuros más que los óxidos tiene las ventajas siguientes:

- La alcalinidad producida por la ayuda de la reducción del sulfato para neutralizar la acidez
- Los precipitados del sulfato son más densos que los precipitados del óxido, de tal modo el establecimiento es más rápido
- Los sulfuros se precipitan dentro de los sedimentos orgánicos y así son menos vulnerables a la interrupción por las oleadas repentinas en flujo.

La reducción del sulfato se reconoce como el mejor tratamiento para DAM. Eger (1994) indica que "la reacción primaria de importancia para el retiro del metal es la reducción del sulfato", porque no solamente se quitan los metales sino también se aumenta el pH y por lo tanto el drenaje ácido de la mina se trata con efectividad.

Filtración

Las plantas pueden contribuir al retiro del metal actuando como filtro para absorber algunos metales de rastro. "Las especies del *macrophyte* con grandes áreas superficiales de plantas han demostrado ser muy eficaces en las partículas de retención del hidróxido del metal que se han precipitado fuera de la solución " (Kadlec et al., 2000). La filtración en SFS puede ser eficaz en el retiro de los metales suspendidos (Kent 1994).

Para realizar la capacidad de filtración, la entrada de sustancia artificial y materia orgánica es usada como una estrategia exitosa. Se hace esto porque la capacidad de filtración física de un humedal será la última instancia de intercambio del metal para convertirse en metal saturado. (Skousen et al., 1994).

3.4. Consideraciones del diseño

A pesar del largo número de humedales construidos usados en el tratamiento de DAM, un diseño claramente indicado no están todavía disponible (Kadlec et al., 2000). Diseñar un sistema de humedales construidos para DAM requiere la comprensión de la química del agua de la mina, de la técnica que se aplicará y de la experiencia.

Algunos investigadores consideran que aunque los problemas presentados por las aguas ácidas de la mina son potencialmente mayores que éstos que implican aguas residuales domésticas, el proceso del diseño casi es igual (Witthar, 1993). Esencialmente, la tarea es caracterizar el flujo de las aguas residuales en términos del volumen y de los componentes (Campbell, 1999).

En general, el proceso de caracterización es más complicado debido a determinados problemas que se presentan, por ejemplo, el valor del pH que es muy bajo, metales, compuestos biológicamente tóxicos, y gran fluctuación estacional(Campbell, 1999).

Witthar (1993) discute algunas consideraciones del diseño desarrolladas. Campbell (1999) también recomienda algunas reglas para el diseño. Algunas de ellas se pueden mencionar como: (1) crear condiciones biológicas para asegurar el pH adecuado, (2) agregar macronutrientes, (3) la vegetación apropiada selecta y (4) conseguir ayuda de los expertos implicados en el campo de la ecología y de la toxicología. La tabla 1 resume algunas consideraciones del diseño.

Tabla 1. Resumen del criterio de diseño para tratamiento de humedales construidos (Whittar, 1993)

Profundidad de agua (cm)	< 45
Número de células	Multiple
Aspecto de ratio L/W	>4/1
Velocidad de flujo (ft/s)	0.1 - 1
Tiempo de retencion (days)	0.25 - 75
Substrate	Hongos, compost, turba, Aserrín, estiércol y fertilizante

3.5. La selección de la vegetación

La vegetación desempeña un papel importante en el tratamiento de DAM, especialmente en el estímulo de procesos microbianos del retiro del metal. La selección de plantas es una importante etapa para alcanzar un tratamiento acertado. Sin embargo, poco trabajo existe en la selección apropiada de la especie de planta para los humedales, todo esto puede tener implicaciones importantes para el éxito a largo plazo de un proyecto. Puesto que el DAM es altamente ácido y contiene altas cantidades de metales, las plantas tienen que ser seleccionadas considerando su capacidad de resistir estas condiciones. Además, la selección de la vegetación se debe hacer basándose en el conocimiento de condiciones locales, y su capacidad de proporcionar las funciones requeridas.

Dos especies principales se utilizan en el tratamiento de DAM en humedales construidos: cattails (typha) y turba (Sphagnum) (Kadlec et al., 2000; Skousen et al., 1994; Witthar, 1993;). Ambos son característicos de ser tolerantes al ácido y de prosperar bajo variedad de condiciones ambientales.

El typha es fácil de propagar, producir la biomasa grande, y puede crecer en aguas con concentraciones del hierro de hasta 100 mg/l. Existe en la mayoría de los sistemas de humedales subterráneos con densidades de la planta de 0,5 a 1,0 por pie cuadrado en la mayoría de los humedales (Witthar, 1993). Esta versatilidad y resistencia, junto con su capacidad de fijar el hierro y el manganeso por adsorción, le hacen una excelente opción vegetativa para remediar el drenaje de ácido de mina del humedal construido.

Los estudios en Sphagnum muestran influencia significativa en eliminación de los metales y el aumento del pH (Witthar, 1993). Sin embargo, Sphagnum es difícil de establecer y mantener (Kadlec et al., 2000) y "es susceptible a la acumulación de hierro tóxico, y a cambios en acidez, carga de sedimentos, clima, química del agua, profundidad, y flujos " (Witthar, 1993). Este problema de establecimiento lo hace menos viable que el uso del Thypha.

Sin embargo, esto no imposibilita su consideración en la investigación de DAM. Descubrimientos posteriores y el desarrollo de técnicas podrían probar su eficacia en humedales construidos.



Tratamiento de drenaje de ácidos de minas en humedales construidos

Otras plantas utilizadas en la construcción de sistemas de humedales incluye la lámina de cama (reed bed), que ha mostrado buen funcionamiento en tratamiento de DAM, reduciendo la concentración de hierro y manganeso y aumentando el pH.

IV. PROBLEMÁTICA EN PERÚ Y VIABILIDAD DE SOLUCIÓN

La industria de explotación minera es una de las actividades económicas más importantes de Perú. Las minas existentes en el norte, en el centro y en el sur del país han creado un gran problema ambiental. Por ejemplo, las actividades de extracción en minas de cobre en Cuajone y Toquepala, localizadas en el sur del país, exponen grandes cantidades de contaminantes, sulfuro mineral Cu_3S_4 , que producen el drenaje de ácido de mina cuando se ponen en contacto con agua y oxígeno. Los residuos mineros de la extracción de cobre y de las operaciones de las refineras contaminan el río Locumba. Otro problema sabido es la contaminación del lago Junín y el río de Mantaro, que indirectamente, reciben efluentes de la mina de Colquijirca.

Para mejorar el impacto del drenaje ácido de minas, algunos programas ambientales han sido desarrollados y grandes cantidades de dinero han sido invertidas, pero la mayoría incluye métodos químicos.

Un tratamiento pasivo fue realizado para tratar DAM en Orcopampa, Arequipa. Un sistema de empozamiento fue utilizado, donde las plantas acuáticas tal como el *Juncus imbricatus* "totora", y el alga del género *Cyanophyta* y *Chlorophyta* contribuyeron en la oxigenación del proceso. Los agentes contaminadores presentes en el DAM tales como pH, FE, Cu, Pb y zn fueron reducidos considerablemente y el efluente final fue utilizado para propósitos agrícolas (Beltran).

En resumen, la tecnología de tratamiento con humedales construidos todavía no está siendo aplicada en Perú, pero algunas tentativas para emplear el tratamiento pasivo han sido realizadas. Considerando la capacidad de tierra y tomando en cuenta los recursos económicos que se pueden ahorrar, los humedales construidos pueden ser considerados como un método eficaz en tratamiento de DAM. Sin embargo, los experimentos de campo necesitan ser observados y también es importante identificar la disponibilidad de los profesionales expertos.



Tratamiento de drenaje de ácidos de minas en humedales construidos

V. CONCLUSIONES

El uso de humedales construidos muestra buen funcionamiento en el retiro de agentes contaminadores del drenaje de ácido de la mina. Las reacciones químicas y biológicas ocurren en la célula, reduciendo así los agentes contaminadores. Los procesos aerobios y anaerobios pueden ser producidos pero principalmente los procesos anaerobios tales como reducción del sulfato muestran un funcionamiento mejor en la reducción de acidez y de los metales pesados. La presencia de plantas y de microorganismos es muy importante en un sistema del humedales. La presencia de plantas proporciona sitios para la conexión microbiana, libera oxígeno de sus raíces, y provee de materia orgánica para los microorganismos *heterotrophic*.

Muchos investigadores consideran esta tecnología eco-amigable como rentable y una solución al problema de la generación de ácidos de minas. Esta tecnología debe continuar siendo examinada en detalle. Ciertas áreas por ejemplo, las especificaciones del diseño de la construcción, deben ser examinadas más de cerca antes de que pueda ser considerado una solución ideal. Algunos de estos campos de investigación deben incluir los efectos que tales humedales pueden tener en las plantas y animales que viven dentro de estos sistemas acuáticos. También otra contribución importante podría ser una comprensión mejor de los procesos naturales del humedal y de los métodos para imitar estos procesos y condiciones que proporcionan las mejores circunstancias para el tratamiento del drenaje ácido de la mina.