

MECANISMOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINAS USANDO «WETLANDS»

Fabiana Tessele y David da Motta Marques

Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.



WETLAND construido en la Universidad Federal do Rio Grande do Sul - Brasil para el tratamiento de drenaje ácido de minas.

Resumen

Métodos pasivos de control de los drenajes ácidos y metales usan procesos químicos y biológicos que reducen la concentración de metales y remueven la acidez. Estos sistemas son movidos por la energía solar y su cinética depende de la actividad metabólica de organismos vivos y reacciones físicoquímicas. Comparado con técnicas convencionales, este método requiere mayor área, pero elimina el uso de reactivos y reduce los costos de operación y mantención. Tierras húmedas (Wetlands) construidas representan un importante método pasivo para el control de los drenajes ácidos y metales.

Abstract

Passive methods to control acid drainage and metals make use of natural chemical and biological processes that diminish metal concentrations and remove acidity. These systems are moved by solar energy and its kinetics depends on metabolic activity of various living organisms and chemical and physical reactions. Therefore, Wetlands provide effectiveness and reduced operating and maintenance costs to control acid drainage and metals.

En los últimos 15 años, el empleo de tecnologías materiales, denominados también de sistemas «Wetlands» o sistemas pasivos o de pantanos, está siendo utilizado en los países industrializados, como una alternativa técnica con relación a los procesos convencionales de Mitigación de Drenajes Ácidos de Minas que emplean aditivos químicos y/o una combinación de estos reactivos, utilizando agitadores mecánicos seguidos de estanques de sedimentación.



Fabiana Tessele

Ingeniero Químico (Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Brasil), Master en Ingeniería Sanitaria y Ambiental (UFRGS) y estudiante de doctorado en el Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH – UFRGS, Brasil). Sus áreas de interés de investigación y desempeño profesional son sistemas de tratamiento de efluentes líquidos para el reuso del agua, sistemas naturales de tratamiento (wetlands) y aplicaciones de la flotación en el tratamiento de efluentes orgánicos, biológicos e inorgánicos.

Consejo de Biologia-Brasil, Society of Wetland Scientists (SWS), International Association of Theoretical and Applied Limnology (SIL) y Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). Ha formado numerosos alumnos en nivel de magister y doctorado y publicado más de 50 artículos técnico-científicos. Actualmente es Presidente de la Sociedad Brasileira de Limnología.

INTRODUCCIÓN

El drenaje ácido de minas (DAM) es el resultado de la oxidación natural de minerales sulfurados cuando son expuestos a la acción combinada del oxígeno y agua, en presencia de bacterias (Stumm y Morgan, 1970; Gazea *et al.*, 1996; Kontopoulos, 1998). El DAM es caracterizado por el bajo pH, alta acidez y por contener metales y sulfuros (Kuyuck, 1999). Cuando no es controlado, el drenaje ácido puede fluir hasta los cuerpos de agua adyacentes, causando modificaciones substanciales en el ecosistema acuático, constituyéndose en una fuente difusa de polución (Motta Marques *et al.*, 1997).

En los últimos 15 años, el empleo de tecnologías naturales y/o denominados también de Sistema Wetland o Sistemas Pasivos o de Pantanos, está siendo utilizado en los países industrializados (EE.UU., Canadá, Inglaterra y otros) como una importante alternativa técnica con relación a los procesos convencionales de Mitigación de Drenajes Ácidos de Mina que emplean Aditivos Químicos alcalinos como: Cal (CaO), Hidróxido de Calcio Ca(OH)_2 , Hidróxido de Sodio (NaOH), Caliza (CaCO_3), Carbonato de Sodio Na_2CO_3 y/o una combinación de estos reactivos, utilizando agitadores mecánicos seguidos de estanques de sedimentación.

Alternativamente a los procesos activos, están disponibles las tecnologías pasivas de tratamiento (Wetlands construidos) que se basan en los procesos químicos y/o biológicos naturales para mejorar las condiciones del agua contaminada. La base de los sistemas pasivos de tratamiento es la creación de condiciones físico-químicas que promuevan procesos que precipiten rápidamente los contaminantes (Tyrrell *et*

al., 1997; Noller *et al.*, 1994; Brodie *et al.*, 1989).

La principal función de un Wetland es mejorar la calidad de agua. Un Wetland es normalmente efectivo y requiere bajos costos de tratamiento para muchos tipos de aguas contaminadas (Henrot *et al.*, 1989) y pueden remover grandes cantidades de contaminantes, incluyendo material orgánico, sólidos en suspensión, metales pesados y exceso de nutrientes. La sedimentación, filtración natural y otros procesos, participan activamente en la limpieza de las aguas ácidas que presentan muchos contaminantes. Las reacciones químicas y de descomposición biológica generan ruptura y transformación de sustancias complejas a sustancias simples. Las plantas acuáticas remueven nutrientes a través de procesos de absorción, asimilación y producción de biomasa (Tchobanoglous & Crites, 1998).

ORIGEN DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINAS (DAM)

Las fuentes de DAM son sulfuros formadores de ácidos resultado de una serie compleja de reacciones químicas, incluyendo de acuerdo con Kontopoulos, 1998:

- generación de ácido sulfúrico en función de la oxidación de sulfuro por la acción combinada del oxígeno y agua. Estas reacciones son auto-catalizadas y su tasa es adicionalmente incrementada por la acción de microorganismos;
- consumo del ácido por los componentes alcalinos: estas reacciones resultan en la precipitación de hidróxidos metálicos y oxihidróxidos, además de otros compuestos más complejos. Si la capacidad de consumo de ácido es mayor que su generación, es posible que el pH en la salida sea neutro o alcalino. Pero, en la gran mayoría de las minas, debido a la alta concentración de sulfuros y metales, predomina la generación de ácido.

La oxidación bacteriana de los minerales es la principal causa de la



David Da Motta Marques

Biólogo (Pontificia Universidade Católica do Rio Grande do Sul), Master en Ecología por la Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) y PhD en Ingeniería Ambiental por el Imperial College of Science and Technology (Londres). Actualmente es profesor e investigador del Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH – UFRGS). Sus áreas de interés de investigación y desempeño profesional son Ecología de Ecosistemas Acuáticos (Wetlands), calidad del agua, Redes de Monitoreo Calidad del Agua, Ecología Aplicada y Ecotecnología. Es investigador del CNPq-Brasil, miembro del

generación de ácido sulfúrico en efluentes de minas. Para ocurrir la oxidación del sulfuro mineral los requerimientos son los mismos que para cualquier otro sistema de oxidación: un sustrato oxidable, un agente oxidante y un promotor (catalizador). En este caso, el mineral es el sustrato oxidable, el oxígeno es el agente oxidante y las enzimas de los microorganismos son los catalizadores.

Las bacterias actuantes en este proceso son de los géneros *Thiobacillus* y *Leptospirillum*, siendo la especie *Thiobacillus ferrooxidans* el microorganismo más comunmente responsable por la oxidación de sulfuros. Esta es una especie quimiotrófica acidofílica obligatoria, capaz de oxidar Fe^{2+} , S^0 y otros metales sulfurados, tanto como a otros compuestos de azufre. El proceso puede ser representado por las reacciones de la Fórmula N° 1 (Silver, 1989).

CONDICIONES EN UN WETLAND

En un Wetland prevalecen condiciones oxidantes en la superficie, tornándose gradualmente anaeróbicas en dirección al fondo. Los mecanismos activos de remoción de metales en el Wetland son diferentes en cada zona: oxidación e hidrólisis, reducción bacteriana de sulfato, adición de alcalinidad, adsorción, intercambio iónico, complejación con material orgánico, bioacumulación en los tejidos de plantas y algas, entre otros.

Zona Aeróbica: En esta zona, la materia orgánica (CH_2O) es decompuesta por bacterias aeróbicas. El primer aceptor de electrones a ser consumido es por lo tanto, el oxígeno: Fórmula N° 2.

Cuando el oxígeno es consumido, el próximo aceptor de electrones disponible es usado para decomponer la materia orgánica. Los aceptores de electrones son consumidos empezando por el más oxidante, de acuerdo con la siguiente secuencia: O_2 (respiración aeróbica), NO_3^- (denitrificación y reducción del nitrato), Fe^{+3} , que produce Fe^{+2} , llevando a la disolución reductora de los óxidos y hidróxidos férricos, de acuerdo con la

reacción de la Fórmula N° 3 (Wildeman, 1994).

Zona Anaeróbica: Las condiciones anaeróbicas se encuentran en la zona saturada, abajo de la interface suelo/agua (Eger, 1994). Siguiendo la secuencia, el próximo aceptor y donador de electrones es la materia orgánica, a través de la decomposición anaeróbica proporcionada por bacterias. Genéricamente, las bacterias convierten el carbono en dos productos: una parte es oxidada a CO_2 y otra parte es reducida a CH_4 : Fórmula N° 4.

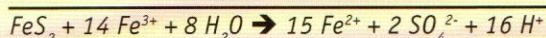
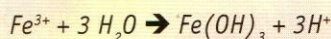
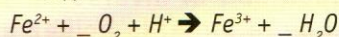
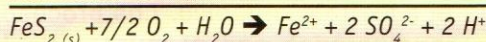
El próximo aceptor de electrones es el SO_4^{2-} (reducción del sulfato). La reducción del sulfato por las bacterias sulfato reductoras (BSR) es un mecanismo importante para reducir la biodisponibilidad de diversos metales

pesados en el ambiente acuático. El lactato y el acetato utilizados por las BSR son productos finales comunes en el proceso de fermentación en ambientes anóxicos. Las BSR funcionan mejor a $\text{pH} > 4$ y en ausencia de agentes oxidantes, como O_2 , Fe^{+3} y Mn^{+4} , requisitos que pueden ser normalmente satisfechos en la zona anóxica de un wetland (Kontopoulos, 1998). Sobre estas condiciones, las bacterias reductoras de sulfato reducen el sulfato con ácido pirúvico o láctico, conforme las reacciones de la Fórmula N° 5 (Silver, 1989).

MECANISMOS PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES

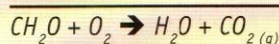
Diversos mecanismos físicos, químicos y biológicos participan en la remoción de

Fórmula N° 1

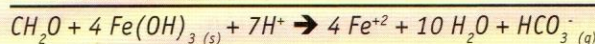


Reacción Global

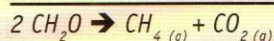
Fórmula N° 2



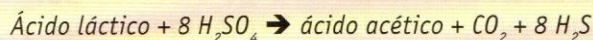
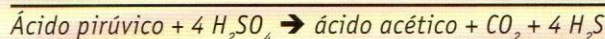
Fórmula N° 3



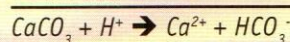
Fórmula N° 4



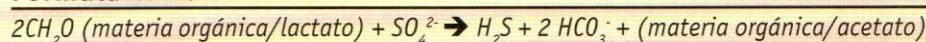
Fórmula N° 5



Fórmula N° 6



Fórmula N° 7



contaminantes en un Wetland. El más simple es la dilución, cuyo efecto es el aumento del pH, induciendo la remoción de los metales por precipitación. El aumento del pH también ocurre en función del proceso de generación de alcalinidad por las siguientes reacciones (Motta Marques *et al.*, 1997):

Disolución del carbonato: Fórmula N° 6.

Degradación de la materia orgánica (donador de electrones): Fórmula N° 7.

Otro mecanismo es la filtración del material en suspensión que ocurre en el sustrato y en la raíz de las plantas. Los demás mecanismos incluyen oxidación e hidrólisis, reducción del sulfato, remoción de metales por plantas, microorganismos y sustratos orgánicos.

Oxidación e Hidrólisis

Este es el principal mecanismo en la zona aeróbica. En esta etapa, el hierro II es oxidado a férrico de acuerdo con la reacción de la Fórmula N° 8 (Kontopoulos, 1998; Gazea *et al.*, 1996).

La hidrólisis subsiguiente precipita el hidróxido férrico en la forma de un lodo de color naranja que cubre la superficie del sustrato. La reacción global es descrita por la Fórmula N° 9.

El manganeso sufre las reacciones de oxidación e hidrólisis conduciendo a la precipitación de oxi-hidróxidos o carbonatos y el aluminio produce el hidróxido: Fórmula N° 10.

Los hidróxidos de hierro y aluminio precipitados son gelatinosos con elevada área superficial, cargada negativamente, resultando en alta capacidad de adsorber otros iones metálicos y aniones sobre su superficie. Las reacciones de oxidación e hidrólisis resultan en la retención de otros metales por adsorción. El hidróxido férrico amorfo puede ser convertido con el tiempo en *hematita* cristalina (en condiciones secas) o en *goethita* (en condiciones húmedas).

Reducción de Sulfato y Precipitación de Sulfuros y Carbonatos

La reducción de sulfato en Wetlands construidos es de fundamental importancia porque el ácido sulfhídrico formado reacciona rápidamente con los

metales disueltos, precipitando como sulfuros y la alcalinidad generada reduce la acidez del DAM (Hedin *et al.*, 1989). El sulfuro producido se combina rápidamente con los metales pesados bivalentes presentes en el medio, formando sulfuros metálicos, tales como los descritos en la Fórmula N° 11.

Los sulfuros metálicos forman precipitados densos y, sobre condiciones anaeróbicas, no pueden ser removidos a través del metabolismo bacteriano. La precipitación de los sulfuros metálicos depende del pH, de la solubilidad del sulfuro específico y de las concentraciones de los reactivos.

La reducción bacteriana de sulfatos es potencialmente muy importante para las proyecciones a largo plazo en un Wetland construido. Al contrario del gran volumen del manto de lodo producido por la oxidación del hierro y por la hidrólisis, los precipitados de sulfuro de hierro son densos, negros y se acomodan junto con el sustrato orgánico. Los procesos involucrados son el inverso de la oxidación de la pirita; la acidez es consumida por el proceso de reducción del sulfato.

Finalmente, al contrario de la oxidación bacteriana y del proceso de hidrólisis, los cuales no son efectivos en la remoción de metales como el Zn y Mn a $\text{pH} < 8$, el H_2S reacciona inmediatamente con los metales pesados a $\text{pH} > 3$, formando compuestos sulfurados insolubles.

La precipitación de carbonatos metálicos puede también ocurrir en las zonas anóxicas de Wetlands con el bicarbonato o dióxido de carbono producidos en las reacciones de reducción de sulfato por las BSR: Fórmula N° 12.

Remoción de Metales por Plantas, Microorganismos y Sustratos Orgánicos

La acumulación de metales en la biomasa de las plantas representa una parte muy pequeña de la remoción total de metales. La capacidad de las plantas emergentes de difundir oxígeno a partir de las raíces para el medio acuático y sustrato es la función más importante en Wetlands construidos. El resultado es la

formación de zonas oxidantes localizadas, lo que conduce a la precipitación del hierro por oxidación, resultando en los fenómenos de adsorción, coagulación y co-precipitación de los metales en solución.

Otra función de las plantas es proporcionar sustrato para el Wetland con la biomasa requerida para la reducción de sulfatos y otros procesos (Gazea *et al.*, 1996). El intercambio iónico de metales disueltos con los ácidos húmicos y fúlvicos en el sustrato es un mecanismo a través del cual los metales son temporalmente retenidos en el Wetland. La complejación con material orgánico puede también contribuir a la remoción de metales (Kontopoulos, 1998).

Las algas a su vez utilizan CO_2 , sulfatos, nitratos, fosfatos, agua y energía solar para sintetizar material celular, liberando O_2 como subproducto. El oxígeno producido es utilizado por las bacterias y otros organismos para sus procesos metabólicos, que incluyen respiración y degradación de la materia orgánica (Gazea *et al.*, 1996).

Los principales procesos biológicos en un sistema de tierras húmedas son la fotosíntesis y la oxidación del hierro. Ambos son procesos autótrofos donde el CO_2 es la fuente de carbono para los organismos. La fotosíntesis, efectuada principalmente por las algas y plantas, consume el ácido carbónico y bicarbonato, produciendo material celular, oxígeno disuelto e iones hidroxilo, conforme la reacción de la Fórmula N° 13 (Kontopoulos, 1998; Gazea *et al.*, 1996).

Los mecanismos para la remoción de polutantes incluye la asimilación directa en el tejido de la planta y disponibilidad de un ambiente adecuado para el crecimiento de microorganismos (Brix, 1993). La adhesión de microorganismos ocurre por una unión específica, reversible o no, entre receptores químicos en la interfase raíz/celda (Dazzo, 1984). La membrana celular, constituida básicamente de fosfolípidos, presenta características hidrofóbicas y carga superficial negativa (Israelachvili, 1985). Estas propiedades actúan en el fenómeno de adsorción de iones con carga positiva, como los

metales.

DISEÑO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA WETLAND

La construcción de Wetlands está ligada al diseño de reactores de adherencia y crecimiento bacteriano. El funcionamiento de un Wetland está dado por la ecuación cinética de primer orden para flujos lentos controlados.

$$\frac{C_c}{C_o} = e^{-k_o T}$$

Donde:

C_c = Concentración del efluente líquido de mina

C_o = Concentración inicial del efluente ácido de mina

k_o = Constante de velocidad específica de reacción de primer orden

T = Tiempo de residencia en el Wetland.

Según la reacción anterior, cuando el tiempo de residencia hidráulica aumenta, las concentraciones de los efluentes con contaminantes biodegradables disminuyen, por consiguiente el tiempo de residencia hidráulico es un parámetro estratégico de diseño y control operacional.

El tiempo de residencia hidráulico está definido como:

$$T = \frac{LWnd}{Q}$$

Donde:

L = Largo del sistema (m)

W = Ancho del sistema (m)

n = Porosidad del lecho, cama o celda (%)

d = Profundidad sumergida (m)

Q = Flujo promedio a través del Wetland ($m^3/día$).

Además, la porosidad n del lecho está dada por:

$$n = \frac{V_v}{V}$$

donde:

V_v = Volumen vacío de huecos

V = Volumen total del sistema.

FACTORES QUE SE DEBEN CONSIDERAR EN EL DISEÑO DEL SISTEMA

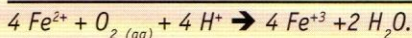
- Grado de pre-tratamiento del agua ácida.
- Requerimiento de área para el tratamiento de aguas ácidas.
- La forma del terreno disponible y/o seleccionada.
- Pendiente.
- Relación largo / ancho.
- Pendiente adecuada de las celdas.
- Necesidad de efectuar excavación, nivelación y explanación en el terreno, a fin de obtener a fin de obtener una adecuada pendiente y profundidad en las celdas del Wetland.
- Tipos de substratos.
- Compuertas internas de las celdas.
- Flexibilidad en la operación y

mantención.

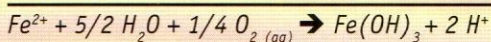
CRITERIOS CONSTRUCTIVOS

1. Las dimensiones deben permitir el tratamiento de los caudales de efluentes ácidos de mina en cualquier época del año y para las precipitaciones que se produzcan. El área mínima debe ser de $22.5 m^2/GPM$.
2. Debe minimizarse la velocidad de circulación del agua y maximizar el tiempo de retención en el sistema mediante uso de compuertas graduables que al mismo tiempo evitan el efecto de cortocircuitos entre los substratos.
3. Mantener láminas de agua de alrededor de 5 cm.
4. Proporcionar un suelo óptimo a las plantas hidrófilas (acuáticas) formado por materia orgánica descompuesta (turba) con cierto contenido de suelo mineral.

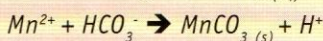
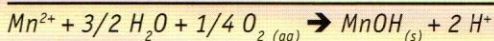
Fórmula N° 8



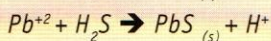
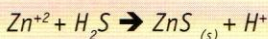
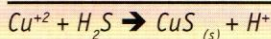
Fórmula N° 9



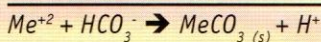
Fórmula N° 10



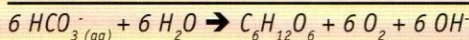
Fórmula N° 11



Fórmula N° 12



Fórmula N° 13



5. Evitar los corto circuitos del agua mediante la construcción de canales (Es recomendable el diseño tipo serpentin).
6. Dimensionar la relación largo a ancho del Wetland, examinar la pendiente y forma del terreno disponible, proporcionar inclinación gradual con pendientes $1/_{15}$ - $1/_{20}$ por etapas en las camas o celdas, determinar la profundidad de las celdas, evaluar características físicas y químicas de los tipos de substratos.
7. Colocar una cama de caliza para ayudar a la neutralización del pH.
8. Construir pequeños saltos o estructuras de aireación a lo largo de los canales de caliza.
9. Un Wetland puede ser diseñado a través de un sistema aeróbico o de flujo superficial de agua a tratar, o ser también diseñado en un sistema anaeróbico, también denominado de flujo subterráneo o sub-superficial.
10. La permeabilidad del sustrato es una variable crítica de diseño para tener buen éxito en la operación. Pruebas experimentales a escalas de laboratorio y banco proporcionan una buena indicación de la permeabilidad del suelo a ser determinada en la construcción de un Wetland.
11. Las plantas acuáticas tienen que ser adaptadas a substratos anaeróbicos saturados en agua, evaluando plantas acuáticas emergentes, sumergidas y/o flotantes.
12. Las condiciones y procesos involucrados varían con la profundidad del diseño.
13. El diseño de un sistema Wetland debe concentrarse en formar precipitados inorgánicos y usar componentes orgánicos para promover su formación.
14. El diseño de un sistema Wetland puede incluir especies de plantas acuáticas que sobrevivan y produzcan largas cantidades de biomasa para apoyar y/o sostener el crecimiento de los microorganismos en sistemas aeróbicos y anaeróbicos.
15. El Wetland debe ser construido de tal forma que maximize las reacciones de

remoción de contaminantes y minimice la competencia de reacciones naturales que se generan en el Wetland.

16. La configuración del sistema Wetland puede ser en múltiples celdas en serie, en paralelo o en ambas combinaciones.
17. Si hay posible problema de contaminación del agua subterránea, es preciso revestir el terreno del Wetland con arcilla, o con un recubrimiento sintético o con cemento.

VENTAJAS DEL TRATAMIENTO WETLAND

- Adaptabilidad a drenajes ácidos de mina (pH tan bajos como 2.5) y a contenido elevado de metales.
- Costos de capital del sistema Wetland son relativamente bajos.
- Costos operacionales y de mantenimiento del sistema Wetland son relativamente bajos.
- Generalmente requiere poco mantenimiento de sí mismo y de igual modo requiere de poca o no supervisión de un operador.
- Suministra a la vida silvestre un ámbito natural y obras de defensa contra las inundaciones.

DESVENTAJAS


- Disponibilidad de suficiente área y/o tierra plana o de pendiente suave.
- Necesidades de área de tierra por unidad de flujo de agua ácida a ser tratado pueden ser amplias (típicamente en torno de 22.5 m²/GPM).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS CONSULTADAS

- Brix, H. (1993). "Wastewater Treatment in Constructed Wetlands: System Design, Removal Processes, and Treatment Performance. En: Moshiri, G.A. (Ed.) Constructed Wetlands for Water Quality Improvement.
- Brodie, G.A., Hammer, D.A., Tomljanovich, A.D. (1989) "Treatment of Acid Drainage with a Constructed Wetland at the Tennessee Valley

Authority 950 Coal Mine" En: Hammer, D.A. (Ed). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment, Chelsea, MI: Lewis Publishers, Inc.,

- Dazzo, F.B. (1984) "Bacterial Adhesion to Plant Root Surface" En: Marshall, K.C (Ed.) Microbial Adhesion and Aggregation, pp 85-93. Dahlem Konferenzen. Springer-Verlag.
- Eger, P. (1994). "Wetland Treatment For Trace Metal Removal From Mine Drainage: The Importance of Anaerobic and Aerobic Process". Water Science and Technology, 29 (4), pp 249-256.
- Gazea, B. Adam, K. and Kontopoulos, A. (1996). "A Review of Passive Systems for the Treatment of Acid Mine Drainage". Minerals Engineering, (9), pp. 23-42.
- Hedin, R.S., Narin R.W. and Kleinmann R.L.P. (1994) "Passive Treatment of Coal Mine Drainage". US Bureau of Mines Information Circular 9389, 35 p.
- Hedin, R.S., R. Hammack and D. Hyman (1989) "Potential Importance of Sulfate Reduction Processes in Wetlands Constructed to Treat Mine Drainage". En: Hammer, D.A. (Ed). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment, Chelsea, MI: Lewis Publishers, Inc.
- Israelachvili, J.N. (1985). Intermolecular and Surface Forces with Applications to Colloidal and Biological Systems. Academic Press.
- Kontopoulos, A. (1998). "Acid Mine Drainage Control". En: Castro, S.H., Vergara F. e Sánchez, M.A., (Eds.). Effluent Treatment in the Mining Industry, University of Concepción, Chile.
- Kuyucak, N. (1999). "Treatment Options for Mine Effluents Emphasis on Acid Mine Drainage, Lime Neutralization and Passive Methods" En: Proceedings International Mining and Environment Congress. Clean Technology: Third Millenium Challenge, Julho, Lima, Peru, pp. 746-756.
- Metcalf & Eddy (1991). Wastewater Engineering, 3rd Ed.
- Motta Marques, D.M.L., Pinheiro, C.B. e Crisman, T.L., (1997) "The Effectiveness of Constructed Wetlands to Manage Coal Acid Mine Drainage

- without External Electron Acceptors" Advanced Wastewater Treatment Process, University of Leeds, UK, 1997.
- Noller, B.N., Woods, P.H. e Ross, B.J. (1994). "Case Studies of Wetland Filtration of Mine Waste Water in Constructed and Naturally Occurring Systems in Northern Australia. Water Science and Technology, 29 (4), pp. 257-265.
 - Perry, B.W. e Graskof, I., (1989). En: Majundar, E.S. et. al. (Eds.) Wetlands Ecology and Conservation: Emphasis in Pennsylvania. The Pennsylvania Academy of Science, Easton.
 - Reed, S.C., Middlebrooks, E.J. e Crites, R.W., (1988). Natural Systems for Waste Management and Treatment. McGraw Hill Book Co. 308 p.
 - Silver, M. (1989). "Control of Acid Mine Drainage Including Coal Pile and Ash Pond Seepage: Biology and Chemistry of Generation, Prevention and Abatement of Acid Mine Drainage". En: Hammer, D.A. (Ed). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment, Chelsea, MI: Lewis Publishers, Inc.
 - Snoeyink, V. e Jenkins, D., (1980). Water Chemistry, John Wiley & Sons, N.Y.
 - Stumm, W. & Morgan, J.J., (1981). Aquatic Chemistry, Wiley Interscience, NY, 2nd ed, 780 p.
 - Tchobanoglous G. e Crites R. (1998). Small and Decentralized Wastewater Management Systems, McGraw Hill, pp. 563-644.
 - Tremolada, J. P. (1999). "Tecnología Wetland para el Tratamiento de Aguas Ácidas de Mina" Congreso Internacional de Minería y Medio Ambiente, Lima, Perú.
 - Watson, J.T., Reed, S.C., Kadleck, H.R., Knight, R.L. e Whitehouse, A.E. (1989). "Performance Expectations and Loading Rates for Constructed Wetlands" En: Hammer, D.A. (Ed). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment, Chelsea, MI: Lewis Publishers, Inc.
 - Wildeman, T.R., Updegraff, D.M., Reynolds, J.S. E Bolis, J.L. (1994). "Passive Bioremediation of Metals From Water Using Constructed Wetlands". En: Means, J. e Hinchee, R. (Ed.) Emerging Technology for Bioremediation of Metals, Lewis Publ. 



*Nuevas visiones para la
investigación y la transferencia
de tecnologías y servicios para
la minería.*



**Centro de Investigación
Minera y Metalúrgica**

Av. Rabat 6500, Vitacura Fonos: 364 3502 - 364 3300 Fax: 364 3504 - 364 3310 <http://www.cimm.cl>