

HUMEDALES DE TRATAMIENTO DE DRENAJE DE MINAⁱ

Todd Schrauf y Mark Smith

Humedales de tratamiento se han demostrado como un método tecnológicamente factible y costo efectivo para tratar el drenaje ácido de roca y otras aguas cargadas con metales. Los estudios anteriores han incluido humedales tanto naturales como contruidos, aunque según la EPA US sólo humedales contruidos se han mostrado adecuadamente. Sin embargo, los humedales naturales tienen una ventaja significativa siendo un ambiente anaeróbico estable ya establecido. El tratamiento en humedales se ha empleado para tratamiento de aguas municipales por más de veinte años, y para efluentes de rellenos sanitarios aproximadamente por una década, mientras que su aplicación al drenaje de mina es más reciente.

Limitaciones de tratamiento en humedales

El rendimiento a largo plazo es desconocido desde que con el tiempo el humedal puede convertirse en un problema que contribuya a la reducción de la tasa de remoción de contaminantes a través de tiempo;

Cambios en equilibrio de un humedal natural debido a la presencia de nuevos metales y fuente de sulfato y posibilidad de efectos físicos relacionados;

Fluctuaciones en el flujo y temperatura afectan el funcionamiento de humedales y pueden causar tasas inconsistentes de remoción de contaminantes. Flujos altos pueden sobrecargar el mecanismo de remoción, mientras que periodos secos pueden dañar las plantas y afectar significativamente el funcionamiento del humedal; y,

Condiciones más frías afectan la velocidad de producción, con que el humedal es capaz de retirar contaminantes, siendo este un problema serio especialmente para proyectos localizados en los Andes.



Humedales proporcionan un ambiente rico en materiales orgánicos, que típicamente es anaeróbico, excepto dentro de una capa de poca profundidad. Los mecanismos principales identificados para la remoción de metales se resumen a continuación.

Estudios sugieren que los dos primeros mecanismos son predominantes en un ambiente anaeróbico.

Adsorción por Substrato Orgánico Rico

La adsorción ocurre vía una reacción de intercambio de iones de equilibrio (reversible) con ácido húmico y fúlvico presentes en abundancia en humedales, sobre todo con turba. Adsorción aumenta significativamente el tiempo de permanencia, de tal modo permitiendo que otros procesos conviertan los iones de metal disueltos en formas insolubles (sedimentos). Con tales otros procesos, la capacidad de un humedal para aumentar el pH y retener metales sería pronto saturada.



Reducción de Sulfato

La reducción de sulfato es favorecida por el bajo Eh y bajo pH donde sulfuros son las formas de azufre termodinámicamente estables. Éstas son exactamente las condiciones que predominan en el ambiente de humedales. La bacteria que reduce sulfato usa la energía creada por reducción de sulfato en tales ambientes y es generalmente resistente y capaz de acomodar variaciones anchas del pH y temperatura, sin embargo, la misma no tolerará periodos largos de condiciones aerobias. Aunque la actividad bacteriana está significativamente reducida en casos cuando el pH es menor de 5, la bacteria puede controlar su micro ambiente regulando el pH a través de reducción de sulfato.

Precipitación de Hidróxidos Férrico y de Manganeseo

Debido a los mecanismos de oxidación de pirita, el drenaje ácido de roca típicamente contiene Fe^{+2} y Mn^{+2} que son más solubles que Fe^{+3} y Mn^{+4} . El proceso de retiro eficiente por precipitación del hidróxido requiere oxidación que puede ocurrir a través de una catálisis microbiana en la zona aerobia de humedales. Con un pH de 5 o mayor habrá una gran cantidad de bacteria que puede oxidar hierro usando el material orgánico como

una fuente nutritiva; sin embargo, la bacteria que oxida el manganeso no parece estar presente en mayores cantidades en los humedales.

Mecanismos y características de remoción	
Adsorción de metales (intercambio de iones)	<p>Adsorción de iones de metal implica la desadsorción de otros metales (generalmente Ca, Mg, Na, K) e iones de hidrógeno;</p> <p>La cantidad limitada de metal que puede ser adsorbida (cantidades varían significativamente entre materiales). Adsorción de manganeso, cinc y cadmio es difícil;</p> <p>La más efectiva con el pH mayor que 4 a 6 dependiendo de iones de metal; por lo tanto, otros procesos deben estar presentes para aumentar el pH del drenaje ácido (turba no proporciona una capacidad antiácida significativa);</p> <p>La reacción es reversible y, por lo tanto, si haya cambios de condiciones, la desadsorción de metales puede ocurrir.</p>
Reducción de sulfato (acción microbiana, precipitación de sulfuros de metales)	<p>Reducción de sulfato aumenta el pH de aguas altamente ácidas y forma las precipitaciones de sulfuro altamente insolubles con cadmio, cobre, hierro, plomo y cinc. El sulfuro de manganeso es más soluble y por lo tanto no es fácil de retirar;</p> <p>Limitada por disponibilidad de sulfato y, en largo plazo, podría ser limitada por disponibilidad de materia orgánica;</p> <p>Si condiciones vuelvan a las aerobias (debido a fluctuaciones de nivel de agua u otros factores) las reacciones se reversarán y los humedales se convertirán en una fuente de sulfatos y metales.</p>
Precipitación aerobia (hidróxido férrico y de manganeso)	<p>Desde que la oxidación y precipitación generan iones de hidrógeno, algunos otros procesos deben operar para aumentar el pH. En humedales con turba donde las aguas de suelo permanecen ácidos, existe una pequeña posibilidad de remoción de manganeso;</p> <p>Oxidación y reducción de sulfato no pueden ocurrir simultáneamente, lo cual puede requerir un sistema de dos fases (anaeróbica seguida por aerobia);</p> <p>Manganeso es más difícil de remover comparado con hierro y requiere un área aproximadamente 3 veces mayor de humedales para la misma carga.</p>
Adsorción de metales (hidróxidos férricos)	<p>Hidróxidos de hierro y aluminio retiran los iones de metales. Buen acabado o fase final.</p>
Absorción de metales por plantas vivientes	<p>En adición a la absorción directa, los sistemas de una raíz crean micro ambientes que promueven los procesos de reducción y oxidación y generan biomasa para el soporte de otros procesos del humedal</p>

Adsorción de Metales por Hidróxidos Férricos

Hidróxidos de hierro y aluminio forman cuerpos sólidos gelatinosos, los cuales por sus propiedades depuradoras han sido usados desde hace tiempo para tratamiento de aguas residuales. Se considera que la superficie de hidróxidos funciona como un ácido débil,

que atrae los iones de hidróxido creando una superficie negativamente cargada, la cual a su turno atrae los iones de metal positivamente cargados. El pH de la solución debe ser mayor que 6.5 a 8.5 (para hidróxido de hierro). En secciones finales del humedal donde la precipitación de hidróxido podría ser significativa, esto ayudará a coagulación del material suspendido y remoción de contaminantes de metal.

Absorción de Metales por Plantas Vivientes

Absorción de metal por plantas vivientes generalmente se considera una parte pequeña pero importante de la acumulación total de metal. En adición, los sistemas de una raíz parecen crear micro ambientes que promuevan los procesos de reducción y oxidación. La otra función importante de plantas es proporcionar una fuente de biomasa para otros procesos microbianos y de adsorción de metales.

Evaluación de Factibilidad

Reducción de sulfato es el proceso predominante para la remoción de metales y mejoramiento del pH; por lo tanto, un ambiente anaeróbico es indispensable. Los humedales naturales generalmente soportan una cantidad bien limitada de flujo subterráneo, desde que la permeabilidad va disminuyendo con profundidad, y por los gradientes hidráulicos horizontales es más difícil de lograr flujos a través de una zona anaeróbica.

Se puede facilitar el flujo subterráneo donde la masa orgánica es relativamente profunda (es decir, en algunos sitios Andinos, turba y material orgánico llegan a una profundidad mayor de 25 metros). Por lo tanto, se puede requerir una mayor área para desarrollar humedales naturales en comparación con humedales construidos. En todo caso es importante a notar que esta tecnología no destruye metales, más bien los acumula en un sitio. Los procesos que crean dicha acumulación son sujetos a la discontinuidad potencial en futuro y a la liberación consecuente de metales acumulados.

Siendo esta una tecnología comprobada en las industrias de aguas residuales y rellenos sanitarios, es relativamente nueva para minería. Los humedales son unos sistemas pasivos de tratamiento los cuales pueden ser aplicados a un amplio rango de sitios y condiciones de drenaje. Para sitios con un DAR o problemas de carga de metal moderados, los humedales de una o dos fases pueden resultar una solución completa. Para sitios severos un programa de humedal puede componer una parte integral de un sistema más complejo, total, que incluye los componentes tanto pasivos como activos.

Programa de evaluación típica	
Ensayos de laboratorio	Analizar en cuanto a la adsorción de metales, presencia de bacteria reductora de sulfuros, tasas de reducción de sulfato y precipitación de sulfuros de metales, contenido de carbón orgánico, conductividad hidráulica (vertical y horizontal), contenido de humedad, densidad a granel, gravedad específica y sus variaciones con profundidad.
Estudios hidrológicos e hidroquímicos	Evaluación de tasas de flujo y química de aguas de fuente (carga de masa), variaciones estacionales, colección/transporte de agua, y requerimientos de obras de derivación de escorrentías.

Ensayos a escala campo	Establecer la permeabilidad a largo plazo, tasas de carga y capacidad de flujo viables para periodos de tiempo suficientes (de 6 a 12 meses) con el fin de lograr una buena comprensión de geoquímica de célula e hidrología.
Diseño preliminar	Los resultados de ensayos anteriores serían evaluados con el fin de determinar la factibilidad de construcción a gran escala tomando en consideración disponibilidad de terreno, máximas tasas de carga, costos, etc.
Ensayos a escala piloto	Ensayar la funcionalidad de los componentes del sistema y proporcionar modificaciones para el diseño final de la misma. Monitoreo durante un año como mínimo, para observar todas las estaciones.

Todd Schrauf es principal del grupo de hidrología de Vector Perú y reside en Lima. schrauf@vectoreng.com.

Mark Smith es presidente de Vector Engineering y también reside en Lima. smith@vectoreng.com.

ⁱ El primero publicacion fue en la Revista Minería, Nov. 2005.