

TRATAMIENTOS PASIVOS APLICADOS A DRENAJES ÁCIDOS DE MINA

JUAN SEBASTIÁN CRUZ BECERRA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2015

TRATAMIENTOS PASIVOS APLICADOS A DRENAJES ÁCIDOS DE MINA

JUAN SEBASTIÁN CRUZ BECERRA

Cód. 2138702

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Especialista en Química Ambiental**

Director

RICARDO RESTREPO MANRIQUE

Biólogo. Esp. Química Ambiental

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE QUÍMICA

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL

BUCARAMANGA

2015

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	10
1. MARCO TEÓRICO	12
1.1 GENERALIDADES DE LOS DRENAJES ACIDOS DE MINA.....	12
1.2 MÉTODOS ACTIVOS Y PASIVOS PARA EL TRATAMIENTO DE LOS DRENAJES ACIDOS DE MINA.	22
1.3 HUMEDALES AEROBIOS ARTIFICIALES.....	29
1.4 HUMEDALES ANAEROBIOS ARTIFICIALES	35
1.5 DRENAJE ANOXICO CALIZO.....	37
2. CONCLUSIONES	39
BIBLIOGRAFÍA.....	41

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Sistemas de tratamiento activo y pasivo	23
Figura 2. Métodos activos y pasivos para el tratamiento de DAM.	24
Figura 3. Humedal aerobio artificial.....	30
Figura 4. Humedal anaerobio artificial	37

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Sustancias causantes de DAM.....	14
Tabla 2. Fuentes generadoras de DAM en procesos mineros	17
Tabla 3. Resultados del análisis fisicoquímico de un drenaje ácido en el municipio de California – Santander.	19
Tabla 4. Efectos sobre la salud del hombre y niveles permisibles a la exposición de metales pesados asociados a los DAM.	20
Tabla 5. Efectos del pH sobre la biota acuática.	21
Tabla 6. Ventajas y desventajas de los tratamientos activos y pasivos para los DAM.	26

RESUMEN

TÍTULO:

TRATAMIENTOS PASIVOS APLICADOS A DRENAJES ÁCIDOS DE MINA*

AUTOR:

JUAN SEBASTIAN CRUZ BECERRA**

PALABRAS CLAVES:

Drenajes ácidos de mina, Tratamientos pasivos, Humedales.

Descripción

La minería, como una de las principales fuentes económicas y de obtención de materias primas en el mundo, ha sufrido a través del tiempo grandes modificaciones enfocadas en la optimización de la extracción del mineral. Sin embargo poca atención se ha dado al incremento de los problemas ambientales asociados a esta actividad. Entre los principales efluentes contaminantes de la actividad minera se encuentran los drenajes ácidos de mina (DAM). Estos subproductos de la explotación minera, aún en el caso de minas clausuradas, siguen generando impactos al medio ambiente debido a la falta de gestión y control por motivos técnicos y económicos.

Dentro de las opciones para el tratamiento de los DAM se encuentran los sistemas pasivos, que según numerosos estudios han demostrado su efectividad en la mitigación de su impacto ambiental con costos económicos y operacionales más bajos que los sistemas convencionales. La siguiente monografía se enfoca en identificar y analizar los principales sistemas pasivos para el tratamiento de DAM, con el propósito de que pueda servir como material de consulta para incentivar la investigación de alternativas viables para la solución de estos contaminantes ambientales que azotan nuestra región.

Debido a los diversos problemas de tipo ambiental que causan los DAM, hoy en día se han realizado numerosos estudios con el ánimo de buscar soluciones eficientes para el tratamiento de estos; según datos obtenidos en la base de datos WEB OF SCIENCE desde el año 2008 se ha incrementado el número de referencias y de artículos científicos, llegando a más 4000 citaciones y 300 publicaciones en el año 2014.

* Trabajo de grado

** Facultad de ciencias. Escuela de química. Director Ricardo Restrepo Manrique

ABSTRACT

TITLE:

PASSIVE TREATMENTS APPLIED TO ACID MINE DRAINAGE *

AUTHOR:

JUAN SEBASTIAN CRUZ BECERRA **

KEYWORDS:

Acid mine drainages, passive treatments, Wetlands.

DESCRIPTION

Mining, as a major economic and procurement of raw materials in the world sources, has undergone major changes over time focused on optimizing the extraction of mineral. Yet little attention has been given to increasing the increase of environmental problems associated with this activity. Among the major polluting effluents from mining are the acid mine drainage (AMD). These byproducts of mining, even in the case of closed mines, continue to generate environmental impacts due to lack of management and control for technical and economic reasons.

Among the options for the treatment of DAM are passive systems, which according to numerous studies have shown its effectiveness in mitigating environmental impact with lower than conventional systems economic and operational costs. The below monograph focuses on identifying and analyzing the main passive systems for the treatment of DAM, for the purpose it can serve as reference material to encourage research into viable alternatives for solving these environmental pollutants that plague our region.

Due to various environmental problems caused by type DAM today there have been numerous studies with the aim to find efficient solutions for the treatment of these; according to data obtained on the basis of data WEB OF SCIENCE since 2008 has increased the number of references and scientific papers, reaching over 4000 citations and 300 publications in 2014.

* Trabajo de grado

** Facultad de ciencias. Escuela de química. Director Ricardo Restrepo Manrique

INTRODUCCIÓN

La minería desde tiempos prehistóricos se ha consolidado como una de las principales fuentes económicas de la humanidad. Hoy en día el uso de diferentes tipos de minerales se ha magnificado a la vez que la población humana ha crecido de la mano de los desarrollos tecnológicos que cada día demandan más recursos naturales.

Como respuesta a la alta demanda de minerales, la explotación minera ha aumentado en el transcurso de los años sufriendo grandes transformaciones a medida que los avances y desarrollos tecnológicos avanzan, como sucede con las explotaciones mineras a gran escala manejadas por grandes compañías multinacionales. Por otro lado, se encuentra la pequeña minería o minería artesanal, que por falta de recursos económicos, técnicos y humanos carece de herramientas para la implementación de tecnologías más amigables con el medio ambiente. Lo preocupante es que la minería artesanal es la predominante en los países en vía de desarrollo, como es el caso de Colombia, donde son notables los efectos al medio ambiente causados por los distintos aspectos ambientales típicos del proceso de extracción de minerales.

Los drenajes ácidos de mina DAM son el mayor problema ambiental provocado por la industria minera y son también su principal pasivo. DAM son particularmente nocivos para los suelos y las corrientes de agua. *“Una mina generadora de DAM tiene el potencial para causar un impacto devastador a largo plazo en los ríos, arroyos y vida acuática, volviéndose en efecto, una máquina de contaminación permanente”*.¹

¹ PEÑA, J., PÉREZ, W. (2009). Manejo de drenajes ácidos de mina (DAM). Tesis de especialización, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga

A nivel local el principal problema relacionado con los drenajes ácidos de mina (DAM), radica en la implementación de un tratamiento adecuado, debido a que la mayoría de DAM son pasivos ambientales de la minería artesanal puesto que en muchos casos se presentan en minas en estado de abandono, donde no se cuenta con los recursos técnicos ni económicos para su correcto control. Por esta razón se hace necesaria la búsqueda de alternativas viables, económicas y ambientales, que brinden soluciones eficaces a los pequeños mineros para el tratamiento de los pasivos ambientales derivados de la extracción de minerales, sin desconocer que su implementación se pueda aplicar gran escala para la mitigación de los impactos ambientales de la mediana y gran minería.

Debido a los diversos problemas de tipo ambiental que causan los DAM, hoy en día se han realizado numerosos estudios con el ánimo de buscar soluciones eficientes para el tratamiento de estos; según datos obtenidos en la base de datos WEB OF SCIENCE desde el año 2008 se ha incrementado el número de referencias y de artículos científicos, llegando a más 4000 citaciones y 300 publicaciones en el año 2014.

Este trabajo pretende explorar el ámbito científico y académico los efectos causados por los DAM por causa de la actividad minera y posibilidades de mitigación de sus ambientales haciendo uso de las tecnologías de tratamiento pasivos.

1. MARCO TEÓRICO

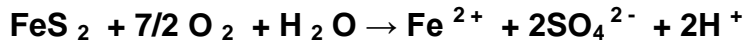
1.1 GENERALIDADES DE LOS DRENAJES ACIDOS DE MINA

El drenaje de roca ácida (DRA) es un proceso natural a través del cual se produce ácido sulfúrico cuando los sulfatos de las rocas son expuestos al aire libre o al agua. El drenaje ácido de mina (DAM), debido a la gran cantidad de material expuesto, es el mismo proceso, pero magnificado. Cuando las grandes cantidades de roca que contienen minerales sulfatados, son excavadas a cielo abierto o en minas subterráneas, estos materiales reaccionan con el aire o con el agua para crear ácido sulfúrico. Cuando el agua alcanza cierto nivel de acidez, un tipo de bacteria llamada "*Thiobacillus ferrooxidans*" actúa como catalizador acelerando los procesos de oxidación y acidificación, lixiviando aún más los residuos de metales de desecho.²

El proceso de oxidación del sulfuro de hierro (FeS_2) o pirita, se ha identificado como el principal responsable de la formación de DAMs; sin embargo, otros tipos de sulfuros también pueden ser causantes de aguas ácidas. Esta oxidación se ve favorecida en áreas de explotación minera debido a la facilidad con que el aire entra en contacto con los sulfuros a través de los accesos construidos para las labores propias de la operación y por los poros existentes en las pilas de estériles, creando un incremento de la superficie de contacto de las partículas. Los autores consideran que los factores que más afectan la generación ácida son el volumen, la concentración, el tamaño de grano y la distribución espacial de la pirita.

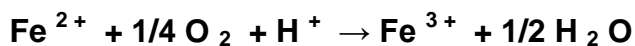
² I PEÑA, J., PÉREZ, W. (2009). Manejo de drenajes ácidos de mina (DAM). Tesis de especialización, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga

Las reacciones que intervienen en la oxidación del sulfuro de hierro pueden ser representadas por las primeras cuatro ecuaciones.³



El Fe^{2+} disuelto, SO_4^{2-} y H^+ generan un aumento en los sólidos disueltos totales (SDT) y la acidez del agua, a menos que su capacidad de neutralizar ácidos induzcan una disminución en el pH.

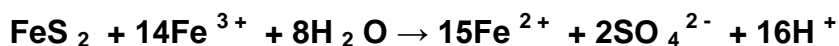
Si el medio donde se producen las reacciones químicas es oxidante (dependiente de la concentración de O_2 , el pH y la actividad bacteriana), la mayoría del hierro ferroso se oxida a hierro férrico, de acuerdo con la siguiente reacción:



A valores de pH entre 2,3 y 3,5, el hierro férrico precipita como $\text{Fe}(\text{OH})_3$, disminuyendo la concentración de Fe^{3+} , generando iones H^+ que causan disminución en el pH.

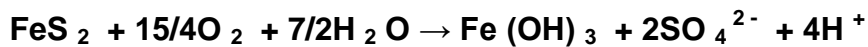


Los iones Fe^{3+} resultantes de las anteriores ecuaciones, sirven como reactivo para oxidar la pirita tal como se ilustra en la siguiente ecuación:

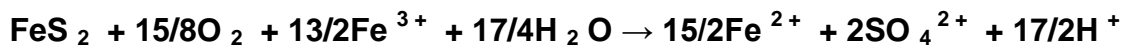


Como resultado de las tres primeras ecuaciones expuestas se puede generar una ecuación general para la generación de ácido que produce hierro que finalmente precipita como $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

³ SKOUSEN et al., 1998; NORDSTRON y ALPERS, 1999; MILLS, 1999; USEPA, 1996 y 2000



Igualmente se ilustra la ecuación general para el hierro férrico estable que se utiliza para oxidar la pirita adicional:



Se debe tener en cuenta que otros minerales de sulfuro como pirrotita (FeS) y calcocita (Cu₂S) también pueden formar aguas acidas, pero por medio de otras reacciones químicas y cálculos estequiométricos diferentes, no obstante la investigación sobre estas variaciones es aun limitada.⁴

Se presenta tabla 1 con otras sustancias causantes de DAM.

Tabla 1. Sustancias causantes de DAM.

Sulfuro de metal	Fórmula química
Pirita	FeS ₂
Marcasita	FeS ₂
Pirrotita	Fe _{1-x} S
Calcosina	Cu ₂ S
Covelita	CuS
Calcopirita	CuFeS ₂
Millerita	NiS
Galena	PbS
Esfalerita	ZnS
Arsenopirita	FeAsS

Fuente: SIMATE, G., SEHLISELO N. (2014). Acid mine drainage: Challenges and opportunities. Journal of Environmental Chemical Engineering. (2): 1785–1803.

⁴ AKCIL, Ata; KOLDAS, Soner. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. Journal of Cleaner Production. (14); 1139-1145

La formación de DAMs es un fenómeno complejo debido a la magnitud y su interacción de procesos físicos, químicos y biológicos que afectan directamente la producción, liberación, movilidad y atenuación de los contaminantes. Algunos autores han realizado una lista con procesos específicos involucrados en la formación de DAM como se muestra a continuación:

- 1) La oxidación de la pirita,
- 2) La oxidación de otros sulfuros,
- 3) La oxidación e hidrólisis del hierro disuelto y otros metales,
- 4) La capacidad neutralizadora de otros materiales contenidos en la roca (ganga).
- 5) La capacidad neutralizadora de las aguas bicarbonatadas.
- 6) La disponibilidad de oxígeno.
- 7) La disponibilidad de agua líquida o en forma vapor.
- 8) La localización y forma de zonas permeables en relación con las vías de flujo.
- 9) Las variaciones climáticas (diarias, estacionales o episodios de tormentas).
- 9) La formación de sustancias con capacidad de reducirse a polvo por pérdida de agua de cristalización (eflorescencias).
- 10) El calentamiento por conducción y radiación del calor generado en diversas reacciones exotérmicas (oxidación de la pirita, disolución de sales solubles y la dilución de un ácido concentrado).
- 11) La temperatura del agua y del ambiente.
- 12) La acción de catálisis de las bacterias.
- 13) La adsorción microbiana de metales.
- 14) La precipitación y disolución de minerales.
- 15) Adsorción y desorción de metales.
- 16) Fotoreducción del hierro.
- 17) La formación de complejos orgánicos.
- 18) Los procesos microambientales sobre superficies o entorno a organismos.

Para determinar la tasa de generación de ácido se deben tener en cuenta los factores químicos, físicos y biológicos, que son propios del lugar donde se estén generando el proceso. Cuando se refiere a factores físicos se hace énfasis en la permeabilidad del sitio de disposición de roca. Si existe alta permeabilidad favorece la entrada de oxígeno que contribuye a generar mayores velocidades de reacción.⁵

Los factores biológicos igualmente son determinantes en la tasa de generación de ácido, en ella juega un papel crucial la bacteria *Ferroxidans acidithiobacillus* en oxidación de la pirita (FeS_2); sin embargo, el microorganismo puede acelerar la oxidación de sulfuros de antimonio, galio, molibdeno, arsénico, cobre, cadmio, cobalto, níquel, plomo y zinc. Las condiciones ambientales favorables para que prosperen las bacterias son de pH menos a 3,2 donde se ha evaluado mayor actividad. Si las condiciones no son favorables, la influencia de bacterias en la generación de ácido será mínimo. En situaciones donde la aceleración bacteriana es significativa, hay factores adicionales que determinan el grado de actividad bacteriana y la tasa asociada de generación de ácido.⁶

Tanto la minería subterránea como la de cielo abierto, generadoras de DAM, ha sido considerada como un peligro ambiental grave, más si se tiene en cuenta que hoy en día se carece de suficientes conocimientos del riesgo potencial de las operaciones mineras, puesto que la mayoría de minas en el mundo todavía se encuentran en operación. Teniendo en cuenta los grandes volúmenes de roca que son expuestos inicialmente a un ambiente oxidante, adicionado al tiempo de operación de la mina y considerando los pasivos ambientales después del cierre de la misma, hace sugerir la generación de grandes cantidades de DAM.

Se presentan en la tabla 2 las principales fuentes generadoras de DAM

⁵ AKCIL, Ata; KOLDAS, Soner. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. Journal of Cleaner Production. (14); 1139-1145

⁶ Ibid

Tabla 2. Fuentes generadoras de DAM en procesos mineros

FUENTES PRIMARIAS	FUENTES SECUNDARIAS
Botaderos de la mina	Libras de lodos Tratamiento
Embalse de relaves	Cortes de roca
Trabajos de la mina a cielo abierto y Pumped / descarga agua subterránea	Concentrado de carga de salida
sobrecarga de aguas en zonas	Colas de roca
Roca utilizada en la construcción de	derrames a lo largo de las Estanques de emergencia

Fuente: CÁNOVAS, C., PÉREZ, R., AGUASANTA, M., NIETO, J. (2012). La Geología, Una Herramienta Para Solucionar Problemas Ambientales Actuales: Remediación De Contaminantes Mineros En La Faja Piritica Ibérica (Fpi). Comunicaciones del XVII Simposio sobre Enseñanza de la Geología. Huelva – España.

Los DAM, su alcance y la magnitud del fenómeno ha sido estudiado por varios autores y entidades. En 1985 la USEPA (*United States Environmental Protection Agency*) estimó que en Estados Unidos existían cerca de 5×10^{10} toneladas de residuos mineros con elevadas concentraciones de metales pesados con riesgo de producir DAM, y que cada año se venían generando más de 109 toneladas de estériles de mina y residuos de plantas de beneficio que de no ser tratados se producirían más aguas acidas. Otros documentos técnicos de la USEPA citados por el autor como el “*Acid Mine Drainage Prediction*”, incluye información del U.S. Forest Service (1993) en donde se estimaba que en el Oeste de Estados Unidos existían entre 20.000 a 50.000 minas que estaban generando drenajes ácidos que afectaban y contaminaban de 8.000 a 16.000 km de riberas de ríos con metales como cadmio, cobre, plata, cinc y arsénico.⁷

La problemática de las aguas ácidas en el caso norteamericano se asemeja a la de otros países con actividad minera (Reino Unido⁸, Canadá⁹, Australia

⁷ LÓPEZ, PAMO, O.; ADUVIRE, D.; BARETTINO. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. Boletín Geológico y Minero. 113 (1): 3-21.

⁸ YOUNGER, P. (1997). The longevity of minewater pollution: a basis for decision-making. The Science of the Total Environment. (194): 457-466

(Environment Australia, 1997), etc. Analizando la situación de Sudáfrica que debe gran parte de su riqueza a sus recursos mineros, los cuales representan aproximadamente el 9% del PIB el costo que ha tenido que pagar por los impactos ambientales ha sido elevado, y la amenaza que corre sus fuentes hídricas superficiales y subterráneas es bastante alarmante si el tema de los DAM no se aborda en un futuro. Por esta razón, es imperativo la necesidad de buscar y aplicar tecnologías eficientes en los tratamientos de las aguas acidas, que generen soluciones tecnológicas y económicamente viables con el objetivo de reducir los riesgos al recurso agua y los componentes bióticos de los ecosistemas, buscando un equilibrio entre el desarrollo económico y el sostenimiento ambiental.¹⁰

La problemática regional no es muy diferente a la que hay a nivel mundial, Javier Vega y William Pérez (2009), realizaron un estudio de los DAM's en la región minera de California y Vetas (Santander – Colombia), en el cual resaltan que los drenajes ácidos de mina se han presentado y detectado principalmente en las explotaciones de oro y carbón, y sus características son similares a las encontradas a nivel mundial. Igualmente en su trabajo realizaron un análisis de muestra de un DAM ubicado en distrito minero del municipio de California con los siguientes resultados (tabla 3):

⁹ MORIN y HUTT, 2001

¹⁰ TENDAI, N., CRAIG, S. (2014). Remediation of acid mine drainage using metallurgical slags. Minerals Engineering. (64): 15–22

Tabla 3. Resultados del análisis fisicoquímico de un drenaje ácido en el municipio de California – Santander.

ANÁLISIS	RESULTADO	UNIDADES
SOLIDOS TOTALES	440	mg/L
SOLIDOS SUSPENDIDOS	156	mg/L
SÓLIDOS DISUELTOS	284	mg/L
DBO₅	25	mg/L
DQO	36	mg/L
GRASAS Y ACEITES	0,85	mg/L
MERCURIO	NO DETECTABLE (N/D)	mg/L
CIANUROS	N/D	mg/L
PLOMO	0,21	mg/L
COBRE	1,3	mg/L
HIERRO	2,3	mg/L
PLATA	0,14	mg/L
CAUDAL	12	L/s
pH	3,56	Unidades
CONDUCTIVIDAD	299	μS/cm
TEMPERATURA AGUA	13,8	°C

Fuente: Peña, J., Pérez, W. (2009). Manejo de drenajes ácidos de mina (DAM). Tesis de especialización, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

La oxidación de minerales sulfurosos (tales como la pirita) genera ácido sulfúrico que promueve la liberación de metales pesados, creando vertimientos con altas concentraciones de metales y ácidos disueltos, que al entrar en contacto con fuentes hídricas superficiales y/o subterráneas causan un impacto negativo a la calidad del agua, destruyendo ecosistemas, dañando estructuras e imposibilitando posterior uso del recurso.¹¹ Este fenómeno es apreciable en la tabla 3 donde se evidencia que el DAM presenta niveles de pH bajos (3,5) y presencia de metales como hierro y plomo.

Diversos estudios han investigado los efectos que causan los componentes de los DAM en el medio ambiente y en la salud humana, pero se sabe poco sobre los riesgos a la exposición directa de personas al drenaje.¹² Las investigaciones

¹¹ SIMATE, G., SEHLISELO N. (2014). Acid mine drainage: Challenges and opportunities. Journal of Environmental Chemical Engineering. (2): 1785–1803

¹² Ibid

realizadas sobre el efecto que causan a la salud cada uno de los posibles metales pesados se pueden apreciar en la tabla 4.

Tabla 4. Efectos sobre la salud del hombre y niveles permisibles a la exposición de metales pesados asociados a los DAM.

Metal pesado	Efecto	Nivel admisible (mg / L)
Arsénico	Bronquitis, dermatitis, intoxicaciones	0.02
Cadmio	La disfunción renal, enfermedad pulmonar, cáncer de pulmón, defectos óseos, aumento de la presión sanguínea, daño a los riñones, bronquitis, cáncer de la médula, desorden gastrointestinal	0.06
Plomo	El retraso mental en los niños, retraso del desarrollo, la encefalopatía infantil fatal, parálisis congénita, sensor sordera neural, hígado, riñón y daño gastrointestinal, daño agudo o crónico en el sistema nervioso, epiléptico	0.10
Manganeso	La inhalación o el contacto provoca daños en el sistema nervioso central	0.26
Mercurio	El daño al sistema nervioso, el envenenamiento protoplasma, aborto espontáneo, los cambios fisiológicos leves, temblores, gingivitis, acrodinia caracterizado por las manos y los pies de color rosa	0.01
Zinc	El daño a la membrana nerviosa	15.0
Cromo	El daño al sistema nervioso, fatiga, irritabilidad	0.05
Cobre	La anemia, el hígado y los riñones, estómago e irritación intestinal	0.10

Fuente: SIMATE, G., SEHLISELO N. (2014). Acid mine drainage: Challenges and opportunities. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. (2): 1785–1803.

Según se puede observar en la tabla 4, la presencia de metales pesados en el agua (aun en bajas concentraciones) que al ser consumidas por la población humana son perjudiciales para la salud, generando intoxicaciones y patologías en el organismo.

El potencial de hidrógeno (pH) es de suma importancia en la vida acuática, en la medida en que afecta directamente la química del agua; de este va depender muchas de las funciones biológicas de organismos acuáticos sin importar su nivel de complejidad, tales como intercambio de iones, respiración, reproducción, entre otras funciones. Para que se dé un normal funcionamiento del ecosistema

acuático, él debe presentar un rango óptimo de pH que dependerá de las características y condiciones de cada sitio. Por lo general, en fuentes hídricas superficiales de agua dulce, el rango de pH varía de 6 a 8. Un cambio de pH puede provocar efectos sub letales a organismos acuáticos, incluso mortalidad.¹³ En la tabla 5, se presenta un resumen de los efectos negativos a la vida acuática dependiendo del valor de pH.

Tabla 5. Efectos del pH sobre la biota acuática.

pH	Efecto en la vida acuática
3,5-3,0	Tóxico para la mayoría de los peces; algunas plantas e invertebrados pueden sobrevivir como son los <i>Belostomatidae</i> , <i>Micronecta scholtzi</i> y <i>Sphagnum maguellanicum</i> .
4,0-3,5	Letal para salmónidos
4,5-4,0	Nocivo para los salmónidos, la <i>Tinca tinca</i> , el <i>Sparus aurata</i> , los blatodeos, especies de peces menores ornamentales y <i>Cyprinus carpio</i> ; todo el número de peces desaparecen porque los embriones no maduran en este nivel
5,0-4,5	Nocivo para los huevos de salmónidos, alevine; en sistemas lenticos a este nivel de pH se considerado muerto siendo incapaz de soportar una gran variedad de vida
6,0-5,0	Nivel de pH crítico, el número y variedad de especies comienzan a cambiar; <i>salmónidos</i> y <i>blatodeos</i> comienzan a ser menos diversos; menos diversidad en las algas, zooplancton, insectos acuáticos y larvas de insectos; <i>Oncorhynchus mykiss</i> no se reproducen, el número de moluscos en los cuerpos hídricos desciende de manera drástica. Hay una gran disminución en la pesca de salmónidos. Los hongos y las bacterias que son importantes en la descomposición de la materia orgánica no son tolerantes, por lo que la materia orgánica se degrada más lentamente ocasionando que los nutrientes no sean liberados nuevamente al ecosistema. La mayoría de las algas verdes y diatomeas (fitoplancton silíceo) que normalmente están presentes desaparecen. moluscos gasterópodos y fitoplancton desaparecen
9,0-6,5	Inofensivo para la mayoría de peces
9,5-9,0	Nocivo para los salmónidos.
11,0-10,5	Letal para salmónidos, la <i>Cyprinus carpio</i> y la <i>Tinca tinca</i> .
11,5-11,0	Letal a todos los peces

Fuente: SIMATE, G., SEHLISELO N. (2014). Acid mine drainage: Challenges and opportunities. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. (2): 1785–1803.

¹³ THOREAU, H. (2002). Effects of Acid Rain on Aquatic Species. *Chem. Eng.* (2): 47–62.

1.2 MÉTODOS ACTIVOS Y PASIVOS PARA EL TRATAMIENTO DE LOS DRENAJES ACIDOS DE MINA.

Para poder prevenir, controlar y mitigar los impactos ambientales causados por los DAM, se ha recurrido a una variedad de métodos y tecnologías, que abarcan desde la prevención en sitio de la formación de los drenajes, hasta técnicas de tratamiento cuando los drenajes ya están formados. Los métodos de prevención en sitio, en algunos casos, como cuando la mina está en fase de operación han demostrado ser efectivos; pero cuando el drenaje se forma por un acuífero natural o cuando la mina esta clausurada, los DAM se convierten en pasivos ambientales que perduran en el tiempo, quedando como única alternativa para mitigar el impacto, realizar el tratamiento directamente sobre el vertimiento.¹⁴

Cuando el DAM ya es existente, los métodos de remediación se han centrado en dos tipos de tecnologías: los sistemas de remediación activos y los pasivos (figura 3). Los sistemas activos o tratamiento activo consisten en la aplicación de tecnologías que buscan el mejoramiento de la calidad del agua con el uso de energía y suministro de reactivos químicos. Por su parte, los tratamientos pasivos tienen el mismo objetivo que los activos pero aplicando métodos naturales que no requieren uso de energía ni reactivos.¹⁵

¹⁴ J., Tyler, S., Maria, D., Aisling, J. James, (2014). Life cycle assessment analysis of active and passive acid minedrainage treatment technologies. Resources, Conservation and Recycling (86): 160–167.

¹⁵ Ibid

Figura 1. Sistemas de tratamiento activo y pasivo



Fuente: CÁNOVAS, C., PÉREZ, R., AGUASANTA, M., NIETO, J. (2012). La Geología, Una Herramienta Para Solucionar Problemas Ambientales Actuales: Remediación De Contaminantes Mineros En La Faja Piritica Ibérica (Fpi). Comunicaciones del XVII Simposio sobre Enseñanza de la Geología. Huelva – España.

Los métodos de tratamiento activos de los DAM representan para su funcionamiento un mayor costo por la utilización de energía, reactivos y por los mantenimientos preventivos y correctivos que se le deben aplicar. Esto dificulta su operación por largos periodos de tiempo.¹⁶ En la figura 3 se puede observar a la izquierda un ejemplo de tratamiento activo; el uso de un reactor donde se realiza el proceso de neutralización.

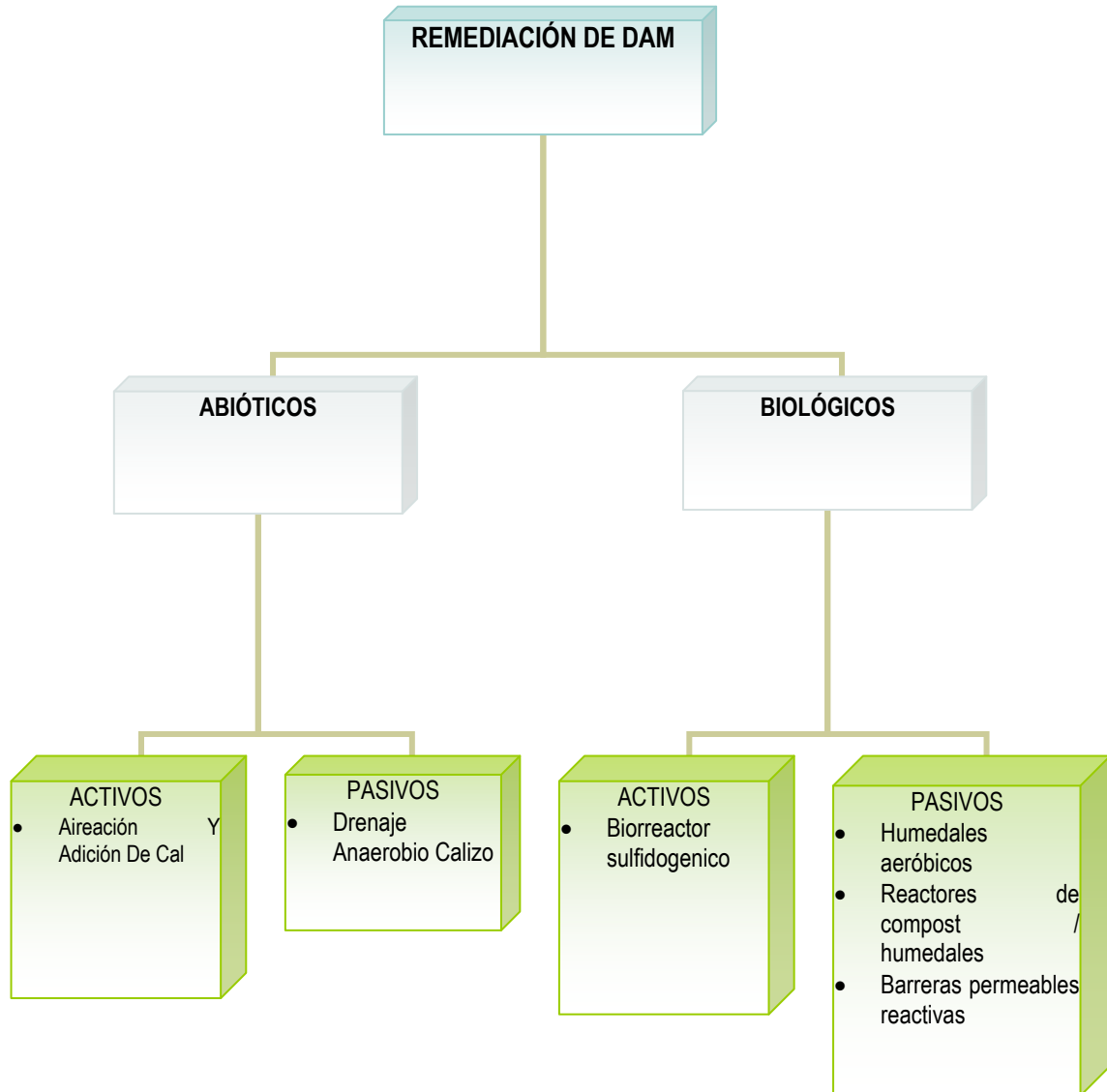
A pesar de la inversión y los elevados costos de mantenimiento, muchas de las minas que actualmente se encuentran en la etapa de explotación a nivel mundial están aplicando tratamientos activos para la remediación de sus DAM debido a la eliminación efectiva de metales, al mayor control en el proceso, ya que no necesita grandes espacios para su aplicación. Sin embargo, en áreas mineras clausuradas, se suelen aplicar tratamientos pasivos, que usan fuentes de energía naturales como la gravedad, la fotosíntesis o la energía metabólica microbiana, por su menor costo.¹⁷

¹⁶ YOUNGER, P. (1997). The longevity of minewater pollution: a basis for decision-making. *The Science of the Total Environment*. (194): 457-466

¹⁷ CÁNOVAS, C., PÉREZ, R., AGUASANTA, M., NIETO, J. (2012). La Geología, Una Herramienta Para Solucionar Problemas Ambientales Actuales: Remediación De Contaminantes Mineros En La Faja Piritica Ibérica (Fpi). Comunicaciones del XVII Simposio sobre Enseñanza de la Geología. Huelva – España

Para mayor ilustración, se presenta en la figura 4 un diagrama de flujo con los principales métodos activos y pasivos de remediación de los DAM.

Figura 2. Métodos activos y pasivos para el tratamiento de DAM.



Fuente: SIMATE, G., SEHLISELO N. (2014). Acid mine drainage: Challenges and opportunities. Journal of Environmental Chemical Engineering. (2): 1785–1803.

En la última década se ha investigado la efectividad de diversos métodos pasivos de remediación, arrojando en la mayoría de los casos, buenos resultados en la remoción de metales pesados y neutralización del pH. Adicionalmente algunos autores han referenciado el bajo costo de operación y mantenimiento, sostenibles durante largos periodos de tiempo (20 a 40 años) después de clausurada la mina.¹⁸

El principio de tratamiento de los sistemas pasivos son similares con los procesos físicos, químicos y biológicos que se dan en los humedales naturales, en donde gracias a sus componentes, se dan condiciones favorables para la eliminación de metales, neutralización de pH y mejoramiento de las características del agua.¹⁹

Entre los métodos pasivos que más se utilizan se destacan los humedales aerobios, los humedales anaerobios o balsas orgánicas, 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 se aplican en aguas subterráneas (PRB, *Permeable Reactive Barriers*). En la práctica estos métodos se emplean solos o combinados, dependiendo del tipo de drenaje ácido y de los requerimientos de tratamiento.²⁰

La tabla 6 muestra los principales tipos de tratamientos para los DAM con sus ventajas y desventajas, que sirven de guía para seleccionarlos.

¹⁸ WATZLAF, G. (1997). Passive treatment acid mine drainage in down- flow limestone systems. U.S. Department of Energy Technology Center, Pittsburgh, 233-244

¹⁹ YOUNGER, L., BANWART, S., HEDIN, R. (2002). Mine water. Hidrology, Pollution, Remediation. Environmental Pollution. (5): 442

²⁰ LÓPEZ, PAMO, O.; ADUVIRE, D.; BARETTINO. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. Boletín Geológico y Minero. 113 (1): 3-21

Tabla 6. Ventajas y desventajas de los tratamientos activos y pasivos para los DAM.

Tratamiento	Tipo	Ventajas	Inconvenientes
ODAS (oxidación, dosificación con álcali y sedimentación)	Activo	<ul style="list-style-type: none"> - Eliminación efectiva de metales - Tecnología conocida y control del proceso - Requiere escasa superficie 	<ul style="list-style-type: none"> - Inversión elevada - Costes de mantenimiento elevados
Humedal	Pasivo	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo coste y mantenimiento - Se puede integrar en el medio - Tratamiento a largo y medio plazo - Los residuos quedan inmovilizados en los sedimentos del humedal. 	<ul style="list-style-type: none"> - Escaso control sobre la calidad del efluente - Incapacidad de respuesta a los cambios - Requiere grandes superficies
Drenaje Anoxico Calizo (ALD)	Pasivo	<ul style="list-style-type: none"> - Produce alcalinidad con menor coste que los humedales - Escaso mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> - La aplicación en aguas ricas en Fe(III) y Al reduce la vida del sistema. - Aguas muy oxigenadas pueden oxidar el Fe(II).
SAPS	Pasivo	<ul style="list-style-type: none"> - Se puede aplicar en aguas oxigenadas y con elevadas concentraciones de Fe(III) y Al. - Escasa inversión y mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> - No se suelen alcanzar elevados valores de pH
Barrera reactiva permeable (PRB)	Pasivo	<ul style="list-style-type: none"> - Escasa inversión y mantenimiento - Aplicable a aguas subterráneas contaminadas - Es capaz de tratar el agua contaminada sin conocer la fuente 	<ul style="list-style-type: none"> - Es muy costosa a profundidades superiores a 10 m. - La existencia de rocas fracturadas dentro de la formación hidrogeológica causa fugas.

Fuente: CÁNOVAS, C., PÉREZ, R., AGUASANTA, M., NIETO, J. (2012). La Geología, Una Herramienta Para Solucionar Problemas Ambientales Actuales: Remediación De Contaminantes Mineros En La Faja Piritica Ibérica (Fpi). Comunicaciones del XVII Simposio sobre Enseñanza de la Geología. Huelva – España.

Los costos unitarios de los sistemas pasivos para los DAM dependen de una amplia gama de factores; para tener un valor aproximado del costo de los

sistemas, se citará ejemplos de algunos de ellos incluyendo sus costos unitarios en el mundo.²¹

La “Tennessee Valley Authority” en la construcción de sistemas de humedales aerobios para el tratamiento de DAM en explotación de carbón ha reportado costos que oscilan entre 3,58 US\$ y 32,08 US\$ por metro cuadrado de suelo (USEPA, 2000). Para humedales anaerobios se reporta costos de 570 US\$/m³ en el estado de Colorado, Estados Unidos. En este país investigadores y organismos oficiales desde hace más de 25 años vienen desarrollando con buenos resultados el empleo de sistemas de tratamiento pasivo para drenajes ácidos de mina; uno de los casos de éxito se refiere al estudio de 13 humedales artificiales para DAM en minas de carbón, arrojando como resultado la eliminación de más del 85% en la remoción de metales pesados. (USEPA, 2000)

El “Coal Remining BMP Guidance” referencia que gasto 90.014 US\$ en la construcción de un sistema ALD diseñado para 30 años (USEPA, 2000). En el estado de Pennsylvania (EEUU) se construyeron cuatro SAPS entre los años 1991 y 1996 reportando costos entre 17.000 y 72.000 US\$, para un período de vida de 20 a 30 años.²²

La guía “Best Management Practices” elaborada por el Departamento del Agua de la USEPA, ha realizado un inventario de las áreas afectadas por drenajes ácidos de minas de carbón que requieren su remediación; debido a su bajo costo de construcción y operación y los buenos resultados en cuanto a eficiencia de neutralización de pH y remoción de metales pesados, recomienda el uso de tecnologías de tratamientos pasivos (humedales, SAPS, ALD y otros) en los planes de restauración y clausura de las minas en operación (USEPA, 2000).

²¹ CÁNOVAS, C., PÉREZ, R., AGUASANTA, M., NIETO, J. (2012). La Geología, Una Herramienta Para Solucionar Problemas Ambientales Actuales: Remediación De Contaminantes Mineros En La Faja Piritica Ibérica (Fpi). Comunicaciones del XVII Simposio sobre Enseñanza de la Geología. Huelva – España

²² ZIEMKIEWICZ, P., SKOUSEN, J., SIMMONS, J. (2000). Cost benefit of passive treatment systems. The National Mine Land Reclamation Center. West Virginia University

En Europa también se ha experimentado con éxito diferentes tipos de sistemas pasivos para la remediación de los DAM. En el Reino Unido existen más de 14 humedales operando con sistemas de producción de alcalinidad, procesos aerobios y anaerobios, o una combinación de éstos. Para el tratamiento de aguas ácidas provenientes de minas de carbón, se aplicaron sistemas pasivos logrando eliminar más del 50% de hierro contenida en ellas.²³

En junio de 1998, en el sur de Noruega, se construyó a escala piloto un sistema de humedales aerobios y anaerobios para los DAM en una mina de níquel, logrando reducción hasta del 98% del níquel. Igualmente se consiguieron buenos resultados en la eliminación de otros metales como el Al (96%), Cu (98%), Cd (98%), Zn (99%) y Cr (64%).²⁴

Al realizar la selección del tipo de sistema pasivo de tratamiento y su diseño, es de suma importancia la caracterización de las aguas del drenaje ácido que se requiere remediar. Una adecuada caracterización debe incluir la medida representativa del caudal, y de los siguientes parámetros fisicoquímicos: pH in situ, pH en laboratorio, alcalinidad total, acidez o alcalinidad neta (expresadas todas como CaCO_3); además de las concentraciones de Fe^{2+} , Fe total, Al, Mn, $\text{SO}_4^{=}$ y conductividad.²⁵ Estos autores consideran igualmente necesario analizar con contenido de Ca, Mg, Na, Cl, K, Br y Zn, lo que permite en la mayoría de los casos efectuar un correcto balance iónico.

La acidez y la alcalinidad de un drenaje de mina, son uno de los parámetros primordiales a la hora de realizar la selección del tipo de tratamiento pasivo de remediación.²⁶ “La alcalinidad del agua se define como su capacidad para

²³ ETTNER, D. (1999). Pilot scale constructed wetland for the removal of nickel from tailings drainage, Southern Norway. IMWA Congress. Mine, Water & Environment. (1): 207-211

²⁴ Ibid

²⁵ HYMAN, D., WATZLAF, G. (1995). Mine drainage characterization for the successful design and evaluation of passive treatment systems. 17th Annual National Association of Abandoned Mine Lands Conference, Indiana. 203-218

²⁶ LÓPEZ, PAMO, O.; ADUVIRE, D.; BARETTINO. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. Boletín Geológico y Minero. 113 (1): 3-21

neutralizar ácidos, como su capacidad para aceptar protones o la medida de su contenido total de sustancias alcalinas (OH^-). En aguas naturales, la alcalinidad se debe generalmente a la presencia de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos. Por su parte la acidez en el agua se define como “la capacidad para neutralizar base, como su capacidad para reaccionar con iones hidróxido, como su capacidad de ceder protones o como la medida de su contenido total de sustancias ácidas”.²⁷

Como se referenció anteriormente, uno de los sistemas pasivos para la remediación de drenajes ácidos de mina son los humedales aerobios y anaerobios, utilizados para contrarrestar algunos problemas de calidad y mejoramiento del ambiente y del agua, que surgen en las explotaciones mineras.²⁸ Así mismo, otras investigaciones han arrojado similares efectos para el tratamiento de aguas residuales en el uso de humedales, utilizados igualmente para tratar los DAM de las operaciones de minería de metal y carbón.²⁹

1.3 HUMEDALES AEROBIOS ARTIFICIALES

Ahora, tratándose concretamente de los humedales aerobios artificiales (ver figura 5) se busca simular este sistema con los procesos de los humedales naturales (pantanos, marismas, turberas, etc.), y así crear un ambiente apto para el desarrollo de ciertas plantas (*Tipha*, *Equisetum*, carrizo, juncos, etc.), comunidades de organismos (algas, protozoos y bacterias) y musgos (*Sphagnum sp.*), que interactúan en la depuración del agua. Es de resaltar que estos sistemas se emplean para el tratamiento de aguas que presenten una alcalinidad neta, capaz de neutralizar la acidez generada por la hidrólisis de los metales.³⁰

²⁷ ROMERO, R. 2002

²⁸ GREENWAY, M. (1997). Nutrient content of wetland plants in constructed wetlands receiving municipal effluent in tropical Australia. *Water Science and Technology*. (5): 135–142

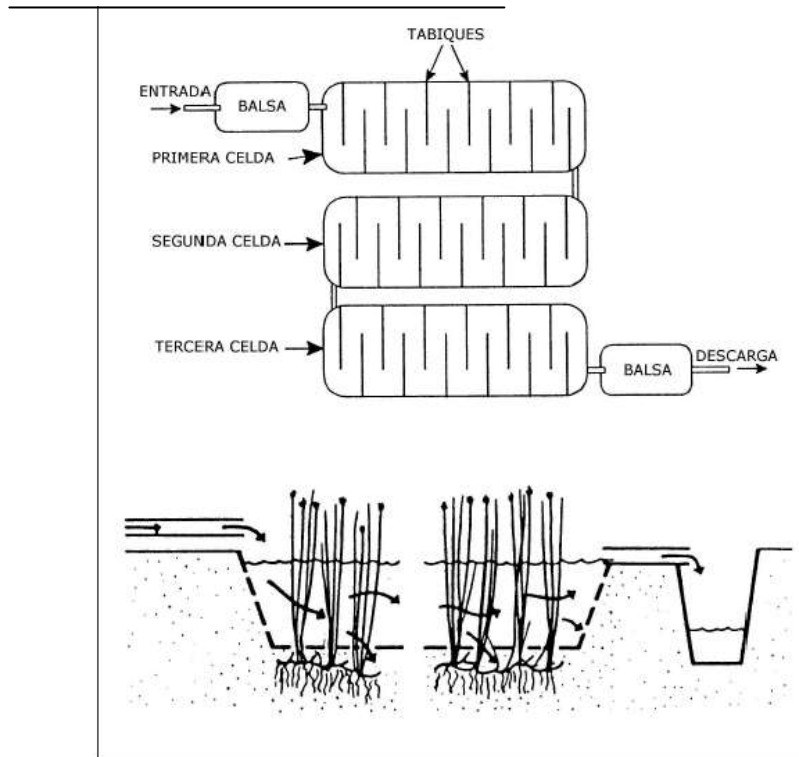
²⁹ SHEORAN, A., SHEORAN, V. (2006). Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: A critical review. *Minerals Engineering*. (19): 105–116

³⁰ Ibid

Los humedales aerobios artificiales presentan una gran área superficial, con un flujo de agua lento; esto permite alcanzar tiempo de retención hidráulico propicio para que se den a cabalidad los procesos de depuración del DAM.³¹

Una de las particularidades de los humedales aeróbicos es el favorecimiento del contacto entre el agua contaminada y el aire atmosférico mediante el empleo de plantas acuáticas; estas liberan oxígeno por sus raíces y rizomas. Para asegurar el correcto funcionamiento del proceso, se debe garantizar que la altura de la lámina de agua no supere los 30cm.³²

Figura 3. Humedal aerobio artificial



Fuente: LÓPEZ, PAMO., O, ADUVIRE., D, BARETTINO. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. Boletín Geológico y Minero. 113 (1): 3-21.

³¹ JOHNSON, K., YOUNGER, P. (2006). The co-treatment of sewage and mine waters in aerobic wetlands. Engineering Geology. (85): 53-61

³² SKOUSEN. et al., 1998

El medio oxigénico en el que se encuentra el sustrato del humedal, sirve de hogar y sustento para la formación de ciertas colonias de bacterias que actúan como catalizadoras en la reacción de oxidación de los contaminantes presentes en el humedal, transformando en el caso del hierro el Fe^{2+} a Fe^{3+} , el cual finalmente precipita en forma de hidróxido.³³

Procesos como la filtración de los sólidos en suspensión, la adsorción de metales e intercambio iónico en los componentes de suelos de los humedales, la bioacumulación de metales en el material vegetal, la precipitación de óxidos e hidróxidos metálicos, se dan en el sistema de los humedales aeróbicos.³⁴

Una de las características sobresalientes de los humedales aerobios es la posibilidad remover metales pesados provenientes de los DAM. Estos procesos se dan en el suelo y el sustrato, en el agua y en la vegetación del humedal.³⁵

Como se mencionó anteriormente hay procesos físicos y químicos que se llevan a cabo en los humedales aerobios y anaerobios para la remoción de contaminantes en los DAM.

De los procesos físicos se identificó la sedimentación. Este mecanismo se vale de la gravedad para lograr precipitar sustancias sólidas que están presentes en el agua, consiguiendo la eliminación de algunos metales pesados que hacen presencia en el drenaje. Algunos metales pueden ser movidos del sustrato a la vegetación por acción del agua.³⁶

La eficiencia de este proceso físico va depender de la longitud del humedal y la velocidad con que se produce la sedimentación.

³³ Ibid

³⁴ EGER, P. (1994). Wetland treatment for trace metal removal from mine drainage: the importance of aerobic and anaerobic processes. *Water, Science and Technology*. (4): 249-256

³⁵ ITRC, (2003). Technical and regulatory guidance document for constructed treatment wetlands. The Interstate Technology and Regulatory Council Wetlands Team

³⁶ Ibid

Uno de los procesos químicos que referencia el autor fue el de la adsorción, consistente en la adhesión de algunas sustancias sólidas al suelo por intercambio catiónico. Algunos investigadores han sostenido que los metales pesados son adsorbidos a la arcilla y a la materia orgánica por atracciones electroestáticas.³⁷ Cuando los metales pesados son adsorbidos a uno de los sustratos anteriormente mencionados, permanecerán como elementos o sustancias metálicas; a diferencia de la materia orgánica que con el transcurrir del tiempo se descompone.³⁸

Se ha demostrado que más del 50% de la concentración de los metales pesados se pueden adsorber en un humedal; sin embargo, la capacidad real de adsorción por intercambio catiónico o adsorción no específica, depende de las condiciones fisicoquímicas del medio, las propiedades y concentración de los metales y la presencia de ligandos solubles en el agua.³⁹

Otro de los mecanismos químicos que se produce en los humedales para la remoción de contaminantes, en especial metales, es la oxidación e hidrólisis de ellos. Se puede convertir ciertos metales como el Hierro, aluminio y manganeso en compuestos insolubles a través de la hidrólisis y/o la oxidación transformándolos en diversos tipos de óxidos e hidróxidos que pueden ser precipitables en el agua. En este proceso las bacterias tienen un papel importante, ya que actúan como catalizadoras en las reacciones químicas aumentando la velocidad de reacción.⁴⁰ La Eliminación de ciertos metales como el hierro depende del pH y el potencial de oxidación-reducción, la formación de Fe³⁺ se logra bajo condiciones de pH a 3,5 y un período de retención adecuado.⁴¹ La oxidación de aluminio en hidróxido de aluminio va a depender netamente del pH

³⁷ PATRICK, Jr., VERLOO, M. (1998). Distribution of soluble heavy metals between ionic and complexed forms in saturated sediment as affected by pH and redox conditions. *Water Science and Technology*. (6–7): 165–172

³⁸ WIEBNER, A., KAPPELMEYER, U., KUSCHK, P., KASTNER, M. (2005). Influence of the redox condition dynamics on the removal efficiency of a laboratory-scale constructed wetland. *Water Research*. (29): 248–256

³⁹ SHEORAN, A., SHEORAN, V. (2006). Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: A critical review. *Minerals Engineering*. (19): 105–116

⁴⁰ WOULD, C., NGWENYA, B. (2004). Geochemical processes governing the performance of a constructed wetland treating acid mine drainage. *Applied Geochemistry*. (11): 1773–1783

⁴¹ R., Stark, M., Williams E., Stevens; P., Eddy. (2006). Iron retention and vegetative cover at the Simco constructed wetland. *Minerals Engineering*. (19):105–116

del medio, siendo posible este proceso a un pH cercano a 5. Diferente al que se presenta en el proceso de remoción del manganeso puesto que para su oxidación se precisa un pH cercano a 8.⁴²

Otro de los mecanismos importantes en la remoción de metales en humedales, lo constituyen la precipitación y co-precipitación, presentes en la adsorción, por cuanto la Precipitación y la co-precipitación en la eliminación de metales pesados es un importante mecanismo de adsorción en los sedimentos de humedales. De este mecanismo, entre otros, es el que limita la presencia de metales disponibles para organismos vivos en los ecosistemas acuáticos. El mecanismo de precipitación depende principalmente del producto de solubilidad K_{ps} del metal implicado, y en otras medias del pH del humedal y la concentración de iones y aniones metálicos. Cuando los valores de la concentración de cationes y aniones son tales que su producto excede K_{sp} , la precipitación se produce a un pH adecuado.⁴³

Al igual que la precipitación, la co-precipitación es también un fenómeno de adsorción en los sedimentos de los humedales. Este mecanismo consiste en una co-precipitación de los metales pesados en compañía de minerales secundarios tales como óxidos de hierro y manganeso. Para el caso de algunos metales como son el Cobre, el Zinc, el Niquel y el Cadmio, es necesario un ambiente alcalino para favorecer este proceso.⁴⁴

En cuanto a la remoción de metales pesados contenidos en los DAM, es necesario precisar que los procesos biológicos y sus mecanismos implicados son quizás los más importantes en la remediación de aguas contaminadas de mina usando tecnología de humedales artificiales; siendo la captación de metales por medio de

⁴² Ibid

⁴³ SHEORAN, A., SHEORAN, V. (2006). Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: A critical review. *Minerals Engineering*. (19): 105–116

⁴⁴ NOLLER, B., WOODS, H., ROSS, 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): 257–266

las plantas, como el mecanismo de eliminación de metales pesados más reconocido en los mencionados procesos.⁴⁵

En este mecanismo actúa un número variado de especies de plantas; entre ellas las conocidas como emergentes, de superficie flotante, macrofitas, entre otras.⁴⁶ Se ha observado que la principal vía de captación de contaminantes en las plantas se encuentra en las raíces, sin embargo dependiendo del tipo de especie vegetal, en algunos casos las hojas igualmente cumplen un papel crucial en los procesos de eliminación.⁴⁷

El crecimiento de la planta así como la concentración de los metales pesados en el cuerpo de las plantas, incide en la tasa de eliminación de los metales contenidos en el DAM, siendo más efectiva el uso de macrófitas.⁴⁸

Algunos estudios han indicado que los microorganismos contribuyen a la remoción de metales pesados. Por medio de su metabolismo realizan la absorción y almacenamiento de algunos componentes químicos. Siendo posteriormente reducidos a metales en formas no móviles. Se ha citado como ejemplo la reducción del cromo y el uranio a través de procesos catalizados biológicamente.⁴⁹

“Manejo del sulfato y la reducción de hierro son procesos que ocurren de forma natural en los sedimentos de humedales que facilitan la eliminación de metales del agua de la mina mediante el aumento de pH ácido, que a su vez resulta en la precipitación de los metales, ya sea como hidróxidos o sulfuros):

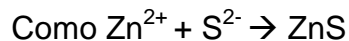
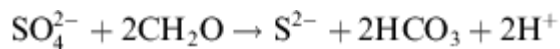
⁴⁵ WIEBNER, A., KAPPELMEYER, U., KUSCHK, P., KASTNER, M. (2005). Influence of the redox condition dynamics on the removal efficiency of a laboratory-scale constructed wetland. *Water Research*. (29): 248–256

⁴⁶ GREENWAY, M. (1997). Nutrient content of wetland plants in constructed wetlands receiving municipal effluent in tropical Australia. *Water Science and Technology*. (5): 135–142

⁴⁷ SRIYARAJ, K., SHUTES, R. (2001). An assessment of the impact of motorway runoff on a pond, wetland and stream. *Environment International*. (5–6): 433–439

⁴⁸ Ibid

⁴⁹ FUDE, L., HARRIS, B., URRUTIA, M., BEVERIDGE, J. (1994). Reduction of Cr(VI) by a Consortium of Sulfate-Reducing Bacteria (SRB III). *Applied and Environmental Microbiology*. (60): 1525–1531



donde CH_2O representa la materia orgánica. El ión sulfuro disuelto precipita metales como sulfuros, revirtiendo las reacciones que se produjeron para producir AMD".⁵⁰

1.4 HUMEDALES ANAEROBIOS ARTIFICIALES

A diferencia de los humedales aeróbicos, en los humedales anaeróbicos se requiere garantizar las condiciones anóxicas en el medio, para lograrlo es necesario que la lámina de agua sea superior a 30 cm, de tal manera que cubra un sustrato permeable de 30 a 60 cm conformado por materia orgánica y una capa inferior de caliza, de tal manera que posibilite eliminar las concentración de oxígeno disuelto en el agua, reducir el hierro y generar alcalinidad para reaccionar con los ácidos del drenaje, contribuyendo con la aparición de vegetación característica de los humedales (Ver figura 6).⁵¹

“Estos sistemas operan en permanente inundación, fluyendo parte del agua horizontalmente a través del sustrato orgánico. En éste, se desarrollan bacterias anaerobias sulfo-reductoras (Desulfovibrio y Desulfomaculum) capaces de utilizar su reacción con la materia orgánica del sustrato (CH_2O) y el sulfato disuelto en el agua intersticial como fuente de energía para su metabolismo. Esta reducción bacteriana del sulfato genera ácido sulfhídrico, o azufre elemental, y alcalinidad mediante las siguientes reacciones (donde CH_2O es la representación genérica de la materia orgánica).

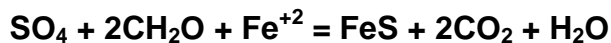


⁵⁰ SHEORAN y SHEORAN. Op. Cit.

⁵¹ LÓPEZ PAMO. Op. Cit.



La reducción de la acidez mineral por acción bacteriana también es posible en ambientes anóxicos, haciendo reacción el hierro y otros metales que finalmente precipitan como sulfuros.



Factores como la temperatura y el pH influyen directamente en las velocidades de reacción en la reducción del sulfato y la actividad bacteriana. Las temperaturas bajas disminuye la cinética afectando de manera negativa la eficiencia del sistema. En cuanto al pH, la actividad bacteriana funciona de manera adecuada en rangos de pH que van de 6 a 9, Un descenso del potencial de hidrogeno puede inhibir el metabolismo de las bacterias afectando las reacciones de reducción del sulfato.⁵²

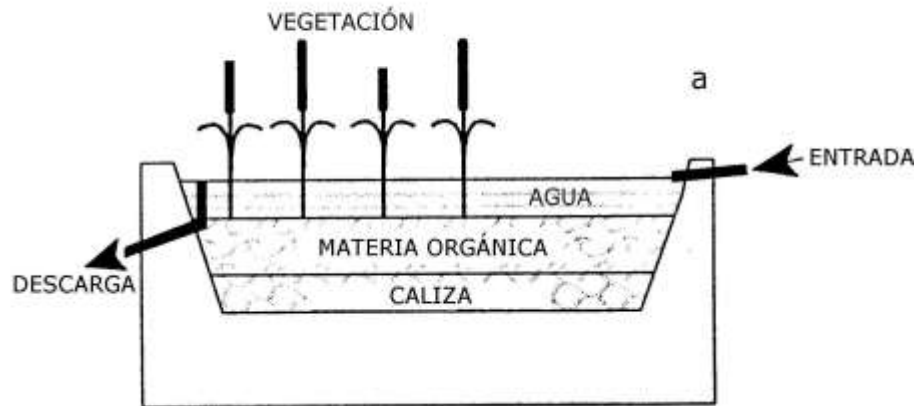
Uno de los mecanismos de tratamiento de los DAM que utiliza los humedales anaerobios es la generación de alcalinidad por medio de la disolución del material calizo al reaccionar con la acides del agua.⁵³



⁵² GAZEVA, B., ADAM, K., KONTOPOULOS, A. (1996). A review of passive systems for the treatment of acid mine drainage. *Minerals Engineering*. (9): 23–42

⁵³ FILIPEK, L.H., HATTON, C., GUSEK, J., TSUKAMOTO, T. (2003). Passive treatment of acid rock drainage (ARD): state of the practice. In: *Proceedings of the Tenth International Conference on Tailings and Mine Waste*. 293–303

Figura 4. Humedal anaerobio artificial



Fuente: LÓPEZ, PAMO., O, ADUVIRE., D, BARETTINO. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. Boletín Geológico y Minero. 113 (1): 3-21.

1.5 DRENAJE ANOXICO CALIZO

Otro sistema aplicado en el tratamiento pasivo de DAM es el drenaje anóxico calizo (DAC), consistente en la elaboración de una zanja rellena de material calizo o material similar recubierta por material impermeable en la superficie. Para garantizar las condiciones anoxigénicas es necesario el DAC tenga una profundidad de 1 a 2 metros.⁵⁴

La forma de operación del DAC consiste en hacer fluir el DAM por medio de la zanja con el fin de que el afluente entre en contacto directo con el material calizo, logrando la disolución de la caliza, generando alcalinidad requerida para que reaccione con los ácidos del drenaje y así poder elevar el pH.⁵⁵

⁵⁴ MACÍAS, F., CARABALLO M., NIETO, J., RÖTTING, T., AYORA, C. (2012). Natural pretreatment and passive remediation of highly polluted acid mine drainage. Journal of Environmental Management. (104): 93 -100

⁵⁵ Ibid

El pH bajo y la presión parcial de Dióxido de carbono CO₂ logran que la disolución de la caliza sea efectiva. El CO₂ proviene de la disolución del material calizo, mientras que el pH bajo lo aporta el DAM.⁵⁶

Debido a que el DAC es un sistema de tratamiento anaerobio, los óxidos e hidróxidos de los metales no precipitan al sustrato, evitando de esta forma la colmatación y recubrimiento de las piedras calcáreas, garantizando así la eficiencia del tratamiento en generación de alcalinidad. Sin embargo, se recomienda que los DAC sean utilizados en aguas de mina con concentraciones de oxígeno disuelto inferiores a 2 mg/l y concentraciones de Fe⁺³ y Al⁺³ por debajo de los 1mg/l; DAM por encima de estos límites permisibles pueden generar fallas en el sistema ocasionadas por el recubrimiento de las piedras calizas afectando la porosidad.⁵⁷

El objetivo de un drenaje anóxico calizo es aportar un exceso de alcalinidad en aguas que presentan características de pH bajos y acidez neta elevadas; por tal motivo algunos investigadores sugieren la implementación de tratamientos posteriores que sean aerobios para que realicen la oxidación y precipitación de metales.⁵⁸

⁵⁶ LÓPEZ PAMO. Ibid

⁵⁷ HEDIN, R. (1997). Passive mine water treatment en the Eastern United States. CIWEM National Conference, Minewater treatment using wetlands. 1-15

⁵⁸ FRIPP, J., ZIEMKIEWICZ, P., CHARKAVORKI, H. (2000) Acid mine drainage treatment. Ecosystem Management and Restoration Research Program (ERDC TN-EMRRP-SR-14), U. S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, 7 pp

2. CONCLUSIONES

Respecto de los sistemas pasivos de tratamiento para los DAM, se identificaron distintos tipos de procesos fisicoquímicos y biológicos de los cuales se referenciaron, mecanismos de sedimentación, oxidación e hidrólisis, adsorción, precipitación y co-precipitación, captación de metales pesados, reducción del sulfato, entre otros.

se concluye que existen estudios e investigaciones sobre drenajes ácidos de mina (DAM), su génesis, características, componentes, impactos a la salud y al medio ambiente, así como las alternativas de tratamiento para mitigar sus efectos; no obstante, en las bases de datos consultadas, se pudo observar escases de textos que hagan referencia a diseños, implementación y operación aplicados a la actividad minera del país.

Durante la exploración bibliográfica se identificaron diversos tipos de sistemas pasivos para el tratamiento de los DAM; como los humedales artificiales y los drenajes anóxicos calizos, objeto de este trabajo.

Diferentes autores de los consultados mencionan que de las diversas formas de tratamiento de los DAM, los sistemas pasivos constituyen la alternativa más viable económicamente y de fácil implementación otorgando mayores posibilidades en actividades de pequeña minera o minería artesanal.

Si bien los sistemas pasivos de tratamiento de los DAM, son una adecuada alternativa para la mitigación de sus efectos, también presenta dificultades en su aplicabilidad, debido al poco control que se tiene de sus procesos unitarios, dificultando la operación cuando las características del afluente son cambiantes.

Se concluye que los estudios sobre los DAM y sus alternativas de tratamiento pasivos, son en su mayoría resultados de investigaciones que han sido aplicados y analizados en zonas con condiciones climatológicas y ecosistemas diferentes al nuestro, situación que debe tenerse en cuenta al implementarse en regiones tropicales como Colombia.

BIBLIOGRAFÍA

AKCIL, Ata; KOLDAS, Soner. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*. (14); 1139-1145.

Amézquita, E.; HERNÁNDEZ, M. AYORA, Carlos; SOLER, Albert; RAMOS, Estela. (2006). Potencial lixiviación de elementos traza en jales de las minas la asunción y las torres, en el distrito minero de guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. (23): 75-83.

AYORA, Carlos; CARABALLO, Manuel; MACÍAS, Francisco; RÖTTING, Tobías; CARRERA, Jesús; NIETO, Jose. (2013). Acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt: 2. Lessons learned from recent passive remediation experiences. *Environ Sci. Pollut. Res.* (20): 7837–7853.

CÁNOVAS, C., PÉREZ, R., AGUASANTA, M., NIETO, J. (2012). La Geología, Una Herramienta Para Solucionar Problemas Ambientales Actuales: Remediación De Contaminantes Mineros En La Faja Piritica Ibérica (Fpi). *Comunicaciones del XVII Simposio sobre Enseñanza de la Geología*. Huelva – España.

D. Johnson., Kevin, B. (2005). Acid mine drainage remediation options: a review. *Science of the Total Environment*. (338): 3– 14.

EGER, P. (1994). Wetland treatment for trace metal removal from mine drainage: the importance of aerobic and anaerobic processes. *Water. Science and Technology*. (4): 249-256.

ETTNER, D. (1999). Pilot scale constructed wetland for the removal of nickel from tailings drainage, Southern Norway. IMWA Congress. Mine, Water & Environment. (1): 207-211.

FILIPEK, L.H., HATTON, C., GUSEK, J., TSUKAMOTO, T. (2003). Passive treatment of acid rock drainage (ARD): state of the practice. In: Proceedings of the Tenth International Conference on Tailings and Mine Waste. 293–303.

FRIPP, J., ZIEMKIEWICZ, P., CHARKAVORKI, H. (2000) Acid mine drainage treatment. Ecosystem Management and Restoration Research Program (ERDC TN-EMRRP-SR-14), U. S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, 7 pp.

FUDE, L., HARRIS, B., URRUTIA, M., BEVERIDGE, J. (1994). Reduction of Cr(VI) by a Consortium of Sulfate-Reducing Bacteria (SRB III). Applied and Environmental Microbiology. (60): 1525–1531.

GAZEA, B., ADAM, K., KONTOPOULOS, A. (1996). A review of passive systems for the treatment of acid mine drainage. Minerals Engineering. (9): 23–42.

GREENWAY, M. (1997). Nutrient content of wetland plants in constructed wetlands receiving municipal effluent in tropical Australia. Water Science and Technology. (5): 135–142.

HEDIN, R. (1997). Passive mine water treatment en the Eastern United States. CIWEM National Conference, Minewater treatment using wetlands. 1-15.

HYMAN, D., WATZLAF, G. (1995). Mine drainage characterization for the successful design and evaluation of passive treatment systems. 17th Annual National Association of Abandoned Mine Lands Conference, Indiana. 203-218.

ITRC, (2003). Technical and regulatory guidance document for constructed treatment wetlands. The Interstate Technology and Regulatory Council Wetlands Team.

J., Tyler, S., Maria, D., Aisling, J. James, (2014). Life cycle assessment analysis of active and passive acid minedrainage treatment technologies. *Resources, Conservation and Recycling* (86): 160–167.

JOHNSON, K., YOUNGER, P. (2006). The co-treatment of sewage and mine waters in aerobic wetlands. *Engineering Geology*. (85): 53–61.

JOHNSTON, C. (1993). Mechanisms of water wetland water quality interaction. In: Moshiri, G.A. (Ed.), *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Lewis Publishers. 293–300.

LABASTIDA, I.; ARMIENTAB, M.; LARA-CASTROC, R.; Aguayob, A.; CRUZB, O.; CENICEROSB, N. (2013). Treatment of mining acidic leachates with indigenous limestone, Zimapan, Mexico. *Journal of Hazardous Materials*. (262): 1187– 1195.

LIANG-QI, Lei; CI-AN, Song; XIANG-LI, XIE; YAN-HONG, LI; FEI, WANG. (2010). Acid mine drainage and heavy metal contamination in groundwater of metal sulfide mine at arid territory (BS mine, Western Australia). *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. (20): 1488 – 1493.

LÓPEZ, PAMO, O.; ADUVIRE, D.; BARETTINO. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. *Boletín Geológico y Minero*. 113 (1): 3-21.

MACÍAS, F., CARABALLO M., NIETO, J., RÖTTING, T., AYORA, C. (2012). Natural pretreatment and passive remediation of highly polluted acid mine drainage. *Journal of Environmental Management*. (104): 93 -100.

MAICANEANU, Andrada; BEDELEAN, Horea; ARDELEAN, Marius; BURCA, Silvia; STANCA, María. (2013). Hanes_ and Valea Vinului (Romania) closed mines Acid Mine Drainages (AMDs) – Actual condition and passive treatment remediation proposal. *Chemosphere*. (93): 1400–1405.

NECOLITA, C. (2007). Passive treatment of acid mine drainage in bioreactors using sulfate – reducing bacteria: Critical Review and research needs. *J. Environ. Qual*. (36): 1-16.

NOLLER, B., WOODS, H., ROSS, 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): 257–266.

PATRICK, Jr., VERLOO, M. (1998). Distribution of soluble heavy metals between ionic and complexed forms in saturated sediment as affected by pH and redox conditions. *Water Science and Technology*. (6–7): 165–172.

PEÑA, J., PÉREZ, W. (2009). Manejo de drenajes ácidos de mina (DAM). Tesis de especialización, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

R., Stark, M., Williams E., Stevens; P., Eddy. (2006). Iron retention and vegetative cover at the Simco constructed wetland. *Minerals Engineering*. (19):105–116.

SÁNCHEZ, Luis Enrique. Drenaje de minas a cielo abierto. (2008). II Curso internacional de aspectos geológicos de protección ambiental. Universidad de São Paulo.

SHEORAN, A., SHEORAN, V. (2006). Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: A critical review. *Minerals Engineering*. (19): 105–116.

SIMATE, G., SEHLISELO N. (2014). Acid mine drainage: Challenges and opportunities. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. (2): 1785–1803.

SKOUSEN, J., ROSE, A., GEIDEL, G., FOREMAN, J., EVANS, R., HELLIER, W. (1998). *Handbook of technologies for avoidance and remediation of acid mine drainage*. The National Mine Land Reclamation Center. West Virginia University.

SRIYARAJ, K., SHUTES, R. (2001). An assessment of the impact of motorway runoff on a pond, wetland and stream. *Environment International*. (5–6): 433–439.

Strosnider, W.H.J.; WINFREYB, B.K.; PEERA, R.A.M.; NAIRNC, R. (2013). Passive co-treatment of acid mine drainage and sewage: Anaerobic incubation reveals a regeneration technique and further treatment possibilities. *Ecological Engineering*. (61): 268–273.

TENDAI, N., CRAIG, S. (2014). Remediation of acid mine drainage using metallurgical slags. *Minerals Engineering*. (64): 15–22.

THOREAU, H. (2002). Effects of Acid Rain on Aquatic Species. *Chem. Eng.* (2): 47–62.

U.S. EPA 2000. *Coal remining best management practices guidance manual*. Office of Science and Technology Engineering and Analysis Division. Washington DC. EPA 821-R-00-007.

WALTON-DAY, K. (1999). Geochemistry of the processes that attenuate acid mine drainage in wetlands. En: G.S. Plumlee and M.J. Logsdon (eds.), The environmental geochemistry of mineral deposits. Reviews in Economic Geology, SEG, Littleton, CO. USA. (6A), 215-228.

WATZLAF, G. (1997). Passive treatment acid mine drainage in down-flow limestone systems. U.S. Department of Energy Technology Center, Pittsburgh, 233-244.

WIEBNER, A., KAPPELMEYER, U., KUSCHK, P., KASTNER, M. (2005). Influence of the redox condition dynamics on the removal efficiency of a laboratory-scale constructed wetland. Water Research. (29): 248–256.

WOULDS, C., NGWENYA, B. (2004). Geochemical processes governing the performance of a constructed wetland treating acid mine drainage. Applied Geochemistry. (11): 1773–1783.

YE, H., WHITING, N., QIAN, H., LYTLE, M., LIN, Q., TERRY, N. (2001). Wetlands and aquatic processes, trace elements removal from coal ash leachate by a 10 year old constructed wetland. Journal of Environmental Quality (30): 1710–1719.

YOUNGER, L., BANWART, S., HEDIN, R. (2002). Mine water. Hidrology, Pollution, Remediation. Environmental Pollution. (5): 442.

YOUNGER, P. (1997). The longevity of minewater pollution: a basis for decision-making. The Science of the Total Environment. (194): 457-466.

ZIEMKIEWICZ, P., SKOUSEN, J., SIMMONS, J. (2000). Cost benefit of passive treatment systems. The National Mine Land Reclamation Center. West Virginia University.