



REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE EFLUENTES MINEROS DE CARBÓN A PARTIR DE FITORREMEDIACIÓN EN ESQUEMAS PILOTO DE HUMEDALES

Nohora Patricia Soto Soto

SENA Centro Minero, patricia.soto@misena.edu.co

Laura Fernanda Parra Salcedo

SENA Centro Minero, lfparra91@misena.edu.co

Adriana Salamanca Viancha

SENA Centro Minero, asalamancav@misena.edu.co

Resumen

Las técnicas de fitorremediación se caracterizan por ser prácticas de tratamiento de aguas residuales de forma pasiva y con características estéticas agradables, estos sistemas de tratamiento buscan aprovechar la capacidad de las plantas en la remoción de contaminantes en los cuerpos de agua objeto de tratamiento. El Centro Minero Sogamoso, Morca, ubicado en zona de transición de ecosistema de páramo, cuenta con una mina didáctica enfocada a la enseñanza de tecnologías relacionadas con esta actividad extractiva, generando a partir de la explotación de carbón vertimientos mineros que permiten la experimentación y desarrollo de nuevas tecnologías que apuntan a la solución de las problemáticas ambientales que envuelven al sector; es por ello que mediante experimentación a nivel piloto, se proyectan y construyen esquemas escalados de humedales, conformados por filtros biológicos, en los cuales las plantas macrófitas se siembran en la superficie del lecho filtrante y las aguas residuales mineras atraviesan de forma vertical el sistema propuesto, el nivel del agua se mantiene por encima de la superficie del medio granular, y en un periodo de retención determinado se realiza seguimiento a parámetros previamente establecidos. La metodología para la realización del ensayo se dividió en dos fases: en la primera de ellas se calcularon y diseñaron los esquemas a nivel piloto basados en los caudales reales aportados por la mina y escalados a laboratorio y en la segunda fase se realiza una caracterización de los parámetros objeto de seguimiento.

La actividad extractiva en la zona de Boyacá y las múltiples limitaciones que existen en Colombia frente a la implementación de tecnologías convencionales para tratamiento de aguas residuales industriales, unido a la carencia de técnicos preparados para operarlos y altos

costos en energéticos además la existencia de pocos laboratorios acreditados en parámetros relacionados hacen que tecnologías pasivas como las objeto de estudio, sean una opción adecuada gracias a su comportamiento frente a la remoción de parámetros físicos y químicos presentes en este tipo de aguas.

Palabras clave

Fitorremediación- Aguas residuales- Humedales- Macrófitas- Minería.

1 Introducción

La minería de carbón en Boyacá se desarrolla para el mantenimiento de la economía del hogar actividad vinculada a los entornos familiares. A raíz de ello no se ha logrado que se realice bajo un enfoque organizacional, adicional a ello ha

sido una actividad de gran importancia para la economía de una región, sin embargo, unido a ella vienen asociados fuertes impactos ambientales que afectan la calidad de vida de las poblaciones de las áreas de influencia donde están ubicadas, dentro de los aspectos que presentan efectos significativos se encuentran las aguas asociadas a los procesos

de extracción y beneficio, unido a ello la minería artesanal, la falta de conciencia ambiental, falta de inversión y desconocimiento de tecnologías de tratamiento ocasionan que día a día se contaminen las aguas receptoras.

Los tratamientos convencionales para aguas mineras de carbón, se caracterizan por tener costos elevados presentando inconvenientes de





mantenimiento en el tiempo, problemas que se maximizan en las etapas de cierre y abandono, donde se requiere que los tratamientos continúen lo que en muchos de los casos no es posible. En los últimos años se han venido trabajando métodos de tratamiento pasivo que han presentado buenos resultados frente a los tratamientos convencionales, con la ventaja de requerir poco mantenimiento y bajo costo; dentro de estos tratamientos se encuentran los humedales, los cuales son sistemas constituidos por medios de soporte, vegetación y agua. Estos se caracterizan por ser sistemas de depuración simples en su operación y mantenimiento con bajos índices en la generación de materiales residuales y buenos comportamientos en remoción. Se presentan como alternativas económicas para el tratamiento de estas aguas, la vegetación en humedales construidos es parte esencial para el logro de sistemas de tratamiento de alto rendimiento.

La presencia de plantas y la adecuada selección de las mismas, ha mostrado mejoras en la remoción de nutrientes en humedales construidos. (Tanner, 2001., Akrotos y Tsihrintzis, 2007., Brisson y Chazarenc, 2009., Stefanakins y Tsihrintzis, 2012b). Numerosos estudios sobre eficiencia de humedales construidos llevados a cabo con y sin vegetación, han concluido, que el desempeño de los sistemas es más eficiente cuando se encuentran plantados (Kadlec et al., 2009, 2005). Adicional a ello la tecnología de los humedales artificiales (HA), requieren de poco personal operativo y el proceso de tratamiento de las aguas residuales involucra elementos que son provistos por la naturaleza (CONAGUA, 2013). En las últimas décadas ha incrementado el interés en el uso de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales debido a su baja generación de gases de efecto-invernadero y bajos costos de operación y mantenimiento, así como un mayor ahorro energético (Yang et al., 2005). Los tratamientos de aguas residuales que involucran macrofitas flotantes han demostrado ser eficientes en la remediación de aguas con contenidos de

nutrientes, materia orgánica y sustancias tóxicas como arsénico, zinc, cadmio, cobre, plomo, cromo, y mercurio. Su importancia radica en su aptitud para ser empleados en núcleos rurales debido a su bajo consumo de energía convencional y la practicidad en el montaje y operación de los sistemas de tratamiento. (Bolaños, Casas y Aguirre, 2008); la importancia de las macrofitas radica en su facilidad para ser empleadas en núcleos rurales debido a su bajo consumo de energía convencional y a la practicidad en el montaje y operación de los sistemas de tratamiento. Aun así, todavía no se han esclarecido rigurosamente los procesos que tienen lugar en la depuración de aguas residuales con macrofitas flotantes (Martelo y Lara, 2012).

Los ecosistemas acuáticos se utilizan directa o indirectamente, como receptores de líquidos y sólidos potencialmente tóxicos de origen doméstico, agrícola e industrial, que incluyen altas concentraciones de nutrientes, materia orgánica y metales pesados que deben ser controlados (Kim, Igunnu y Chen, 2014). Gran variedad de plantas se han empleado para la remoción de nitrógeno, fósforo, sólidos, materia orgánica y metales, obteniéndose de estos últimos buenas eficiencias a escala real y de laboratorio; las tasas de remoción de metales en los humedales dependen del tipo de elemento ($Hg > Mn > Fe = Cd > Pb = Cr > Zn$ $Cu \Rightarrow Al > Ni > As$), sus formas iónicas, las especies de plantas, debido a la diversidad de tolerancias a elevadas concentraciones de algunos metales (Kim et al. 2014. Ali, Khan y Sajad, 2013. Kearney y Zhu, 2012).

2 Desarrollo experimental

2.1 Metodología

La metodología para la realización del ensayo se dividió en dos fases: en la primera de ellas se calcularon y diseñaron los esquemas a nivel piloto basados en los caudales reales aportados por la mina y escalados a laboratorio y en la segunda fase se realiza una caracterización de los parámetros objeto de seguimiento.



En la primera fase se realizaron aforos en campo de los caudales aportados por la Mina didáctica, en el caso particular del estudio se tomaron valores en época de lluvias, teniendo en cuenta que los flujos de agua en este periodo son mayores, una vez determinado el caudal a trabajar se procede al diseño del sistema tomando como base parámetros hidráulicos preestablecidos y características propias de las aguas presentes en la Mina Didáctica.

En la segunda fase planteada se proceden a realizar los análisis de los parámetros de calidad, que en este caso en particular se proponen como variables objeto y de significancia para las aguas presentes como son el pH y el OD. Los análisis se realizaron en el laboratorio de biotecnología del SENA Centro Minero con los equipos de campo existentes, validando previamente la vigencia de calibración de los mismos.

2.2 Diseño de la experimentación

Se realizó el diseño de los prototipos tomando como base un caudal de dos litros por segundo y escalado según los siguientes parámetros:

Tabla 1. Parámetros de diseño.

Datos de entrada			
Número de sistemas en paralelo	1		
Caudal	2,0000	lps	
Q por sistema	172,80	m ³ /d	
DBO5 entrada	66,00	mg/litro	
NTK entrada	9,17	mg/litro	
Tiempo hidráulico Residencia	5	días	
Pendiente del fondo del humedal Dh/DL	2	%	
Profundidad del agua h1	0,70	m	*entre 0,6 y 0,7 m
Profundidad del medio h2	0,75	m	*entre 0,75 y 1 m
Conductividad hidráulica K	5.000	m ³ /m ² d	
Porosidad del medio e	0,35		

Volumen del humedal Vol h	432,00	m ³
Área superficial Ash	617,14	m ²
Área transversal Ath	8,64	m ²
Ancho del humedal Ah	12,34	m
Longitud del humedal Lh	50,00	m
Carga orgánica del humedal	92,40	Kg DBO/ha.d
Carga hidráulica superficial	1.400,00	m ³ /ha.d

Cte remoción DBO5 20°C K20	0,8595	d-l
Cte remoción NTK 20°C K	0,107	d-l
Carga de DBO5 efluente	0,898	mg/litro DBO5
Carga de NTK efluente	5,371	mg/litro NTK

Eficiencia remoción DBO5	99%	
Eficiencia remoción DBO5	41%	

La instalación hidráulica consiste en cuatro humedales prototipo para los cuales se utilizaron contenedores contruidos vidrio con dimensiones según la escala definida; cada módulo trabaja de forma independiente, y se les dio una pendiente de 2 % para permitir el flujo horizontal del agua. A la salida de cada módulo se instaló una llave de paso que permite la toma de muestras de agua y así evaluar la eficiencia de depuración por separado en cada sistema.

Cada piloto cuenta con las mismas características de medios de contacto, dimensiones y aguas afluentes (tabla 2), en el ensayo se modifican las especies fitorremediantes como se observa en la tabla 3, y a cada uno se le agregan 200 ml de bacterias fijadoras de nutrientes.

Tabla 2. Parámetros de diseño.

Parámetro	Volumen	Medio 1	Medio 2
Ensayo 0	17 Litros	Grava 3/4	Arena de filtro
Ensayo 1	17 Litros	Grava 3/4	Arena de filtro
Ensayo 2	17 Litros	Grava 3/4	Arena de filtro
Ensayo 3	17 Litros	Grava 3/4	Arena de filtro



Tabla 3. Especies objeto de estudio.

Parámetro	Especie
Ensayo 0	Sin especie
Ensayo 1	Zantedeschia aethiopica
Ensayo 2	Vetiveria zizanioides
Ensayo 3	Zantedeschia aethiopica + Vetiveria zizanioides

Una vez contruidos y realizado el montaje de los esquemas pilotos con los medios de soporte se procede a suministrar a cada uno 17 litros de aguas provenientes del pozo de bombeo de la mina didáctica del Centro Minero en Morca, en la fotografía 1 se puede observar el montaje realizado cada uno con las especificaciones dadas en las tablas 2 y 3.



Foto 1. Montaje realizado
Fuente: SENA

2.3 Resultados y análisis

Una vez instalados los prototipos se procede a la toma e parámetros cada cuatro días. Para lo cual los primeros resultados analizados y reportados son oxígeno disuelto 1 mg/l; pH 3,5; 200 ml de bacterias fijadoras de nutrientes.

Transcurridos los cinco días, determinados como tiempo de residencia se procede a analizar nuevamente los parámetros objeto de estudio, con el fin de determinar su comportamiento frente al ensayo, obteniendo

los siguientes resultados, (ver tablas 4 ,5).

Tabla 4. Resultados obtenidos para pH

Ensayo	pH
Ensayo 0	6,09
Ensayo 1	7,16
Ensayo 2	7,2
Ensayo 3	7,23

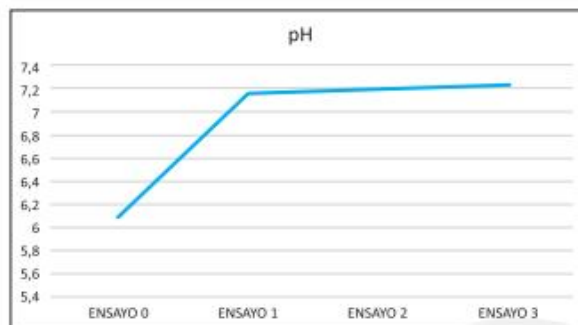


Figura 1 . Comportamiento de pH en cada ensayo.

Tabla 5. Resultados obtenidos para oxígeno disuelto OD

Ensayo	OD mg/l
Ensayo 0	1,66
Ensayo 1	2,01
Ensayo 2	2,05
Ensayo 3	1,23

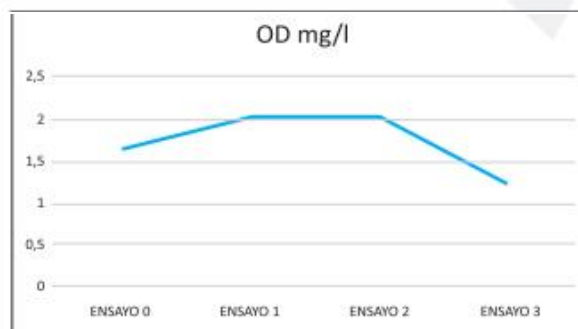


Figura 2. Comportamiento de OD en cada ensayo

3 Conclusiones

A partir de la experiencia generada por los prototipos instalados, se pudo observar que los



cuatro ensayos frente a pH presentaron resultados relevantes, se pudo observar que se lograron obtener pH aceptables para descargas en fuentes hídricas, a partir de lo cual aguas mineras de carbón con efluentes ácidos que pueden afectar los recursos receptores y sus organismos presentes pueden nivelar este parámetro con la implementación de la tecnología de humedales con especies como *Vetiveria zizanioides* y *Zantedeschia aethiopica*.

La combinación de especies *Vetiveria zizanioides* y *Zantedeschia aethiopica* presentó mejores resultados para pH lo que puede determinar que especies no invasoras y con usos potenciales posteriores en el caso del vetiver forma un seto permanente, y crece hasta 1,5 metros. Es una planta perenne y requiere un mantenimiento mínimo, pueden ser buena alternativa de tratamiento con beneficios económicos luego de su vida útil dentro del humedal, con relación al cartucho o *Zantedeschia aethiopica* puede ser usada con fines decorativos.

Con relación a el comportamiento frente al oxígeno disuelto se pudo observar que los resultados mas favorables se presentaron para la especie *Vetiveria zizanioides*, generando valores aceptables lo que puede ayudar en los procesos de autodepuración naturales de la corriente receptora, la cual requiere niveles de oxígeno adecuados para facilitar las formas de vida aerobias.

4 Recomendaciones

Los ensayos de tratamiento en aguas residuales industriales, en especial en efluentes mineros de carbón de clima frío, son el punto de partida para el SENA Centro Minero en la generación de alternativas de tratabilidad de este tipo de vertimientos, caracterizados por ser altamente contaminantes y que hoy en día presentan una preocupación constante por los fuertes impactos que circundan en el sector.

En el ensayo realizado se determinaron dos variables objeto de este estudio, sin embargo, se recomienda evaluar otros parámetros representativos de este tipo de vertimientos, con las mismas especies con el fin de consolidar la información y a partir de los resultados poder definir su comportamiento en diferentes escenarios y concentraciones.

Referencias

- Álvarez, I. (2008). Evaluación del aprendizaje en la universidad. Una mirada retrospectiva y prospectiva desde la divulgación científica. *Revista electrónica de investigación psicoeducativa*, 6(1), 235-272. Recuperado 235 http://www.investigacionpsicopedagogica.com/revista/articulos/14/espaol/Art_14_228.pdf
- Caviedes Rubio, D. I., Delgado, D. R. y Olaya Amaya, A. (2016). Remoción de metales pesados comúnmente generados por la actividad industrial, empleando macrófitas neotropicales. *Producción + Limpia*, 11(2), 126-149. doi: 10.22507/pml.v11n2a11
- Roldán, G. y L. F. ÁLVAREZ. 2002. Aplicación del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) para el tratamiento de aguas residuales y opciones de reuso de la biomasa producida. *Revista Universidad Católica de Oriente*. 56-71
- Sánchez, J. (2010). Pensamiento lateral: Aprender jugando, aprender pensando. http://cvc.cervantes.es/enSENA_nza/biblioteca_ele/publicaciones_centros/PDF/manchester_2009/11_sanchez.pdf
- Silván, R. S. (2016). Evaluación de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial en la remoción de contaminantes de aguas residuales utilizando diferentes especies de vegetación macrófita. *Interciencia*, 41(1), 40-47. Retrieved from [https://search-proquest-com.digital.SENA.edu.co/docview/1768539621accountid=31491](https://search.proquest-com.digital.SENA.edu.co/docview/1768539621accountid=31491).





**Formación Mantenimiento Equipo pesado
para Infraestructura Minería y Transporte
SENA Regional Boyacá - Centro Minero
Fuente: SENA**

- **Formación en Química aplicada a la Industria**
 - **Formación Procesos de la Industria Química**
- SENA Regional Boyacá - Centro Minero
Fuente: SENA**



**Formación en Sistemas de Gestión Ambiental,
Control Ambiental, Agua y Saneamiento
Básico, Salud Ocupacional
SENA Regional Boyacá - Centro Minero
Fuente: SENA**

