

OPTIMIZACIÓN DE LA FITORREMEDIACIÓN DE MERCURIO EN HUMEDALES DE FLUJO CONTÍNUO EMPLEANDO *Eichhornia crassipes* “JACINTO DE AGUA”José Paredes¹, Manuel Ñique²

Recepción: 16 de agosto de 2016

Aceptado: 30 de setiembre de 2016

Resumen

En esta investigación, se estudió la remoción de mercurio divalente con la especie *Eichhornia crassipes* en tres medios de pH. Preliminarmente se evaluó la concentración de nutrientes apropiada para la vida de la planta, luego se hizo la evaluación de la adaptación de la planta en los tres medios de pH someténdola a concentraciones crecientes de mercurio. Los resultados preliminares indicaron que la *Eichhornia crassipes* posee una capacidad de amortiguamiento de pH y mayor crecimiento de la raíz en rango básico. Posteriormente, se aplicaron tratamientos para determinar el porcentaje de remoción de mercurio a concentraciones de mercurio de 0.05 a 0.5 ppm, en los tres medios de pH. Para la determinación de mercurio se utilizó el método de la ditizona, realizando las lecturas en un espectrofotómetro UV-visible, a una longitud de onda de 520 nm. La mayor remoción del mercurio fue en medio básico, siendo un promedio de 94.68%. También se evaluó la capacidad de remoción de mercurio de la planta en intervalos regulares de tiempo, cada hora, por un período de 11 horas, observándose que gran parte de la remoción de mercurio fue en las tres primeras horas. Al final se experimentó en un humedal artificial superficial de flujo continuo a escala laboratorio, lográndose una remoción de mercurio de 99.5%.

Palabras clave: *Eichhornia crassipes*, mercurio, pH, humedal, ditizona.**Abstract**

In this research, the species *Eichhornia crassipes* was studied in three pH medium: acid, neutral and basic, in order to determine which of these, get higher mercury removal. Preliminary studies were performed to determine the appropriate concentration of nutrients for plant life during the mercury removal, at the same time was evaluated the adaptation of the plant in the three pH through subjecting it to increasing concentrations of mercury. The results of preliminary tests indicated that *Eichhornia crassipes* have a pH buffering capacity, with better results when the aqueous medium is with basic pH, recorded under these conditions increased root growth. Subsequently, the treatments were performed to determine the percentage of mercury removal by the action of the *E. crassipes*, in mercury concentrations ranging from 0.05 to 0.5 ppm in the aqueous medium pH, accompanied by a witness plant Dithizone method was used for the determination of mercury, making the readings on a UV-visible spectrophotometer at a wavelength of 520 nm. The results indicated the higher mercury removal was in basic medium, with 94.68 % average removal. The mercury removal capacity of the plant at time regular intervals, was evaluated each hour, for 11 hours, the most quantity of the mercury removal performed for the plant was the first three hours. At the end mercury removal was experienced in a surface flow constructed wetland continuous, at laboratory, achieving a mercury removal 99.5%.

Key words: *Eichhornia crassipes*, mercurio, pH, humedal, ditizona.

¹ Maestro en Ciencias en Agroecología, mención Gestión Ambiental, de la Universidad Nacional Agraria de la Selva Docente de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. Email: josepzar30@gmail.com

² Docente del departamento Académico de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional Agraria de la Selva.

Introducción

El mercurio es un metal no esencial tóxico para los organismos a diferentes escalas tróficas, muy persistentes en el ambiente y transferibles a los medios acuáticos o atmosféricos debido a las distintas conformaciones de especies metálicas altamente reactivas (1), La capacidad tóxica de algunas especies mercúricas es función de su solubilidad o no al agua: Hg^0 (tóxico como vapor), Hg_2^{2+} (no muy soluble en agua y relativamente tóxico), Hg^{2+} (no tóxico pero fácilmente metilable), CH_3Hg (muy tóxico y lipofílico), CH_3HgCH_3 (no tóxico y fácilmente transformable a CH_3Hg) (2). Las especies asociadas a solubilidad en agua pueden afectar su equilibrio químico dependiendo del pH y potencial oxidorreductor. En los últimos años la minería informal o artesanal se ha incrementado en el Perú para la extracción principalmente de oro, el peligro para el ambiente de dicha extracción radica en la utilización del mercurio para el lavado del mineral generando riesgos para la salud del hombre, así como para el medio ambiente.

La especie *Eichhornia crassipes* "jacinto de agua", macrófito flotante tropical y subtropical (3) es de uso particular en la reducción de carga de nutrientes y metales pesados como el Cd, el Pb y el Hg (4,5) y constituye una herramienta complementaria de muy bajo costo y apropiada bajo el enfoque de recuperación de sistemas de humedales artificiales por su alta tolerancia fisiológica en el tratamiento de aguas residuales. Tomar una línea base de variables físico-químicas en sistemas de humedales de flujo continuo con *Eichhornia crassipes* al analizar pH, tolerancia a diferentes niveles de concentración de Hg_2^{2+} así como la cantidad remoción de mercurio a través del tiempo, es necesario para un manejo eficiente de esta especie en la gestión de aguas residuales empleando sistemas de humedales artificiales.

Materiales y métodos

Aplicación de Nutrientes

Se prepararon 10 L de las soluciones a diferentes concentraciones de KNO_3 : 0, 50, 100, 150 y 200 ppm y se colocó 01 planta de Jacinto de agua por cuba a cada concentración Posteriormente se procedió a evaluar por un periodo de 10 días, el tamaño de raíz, pH del agua, temperatura, número de hojas.

Preparación del agua contaminada con mercurio y los medios de pH.

Se acondicionaron las cubas con $HgCl_2$ a concentraciones de, 1, 3 y 5 ppm de mercurio y un testigo por cada medio de pH, que son concentraciones relativamente elevadas, a fin de evaluar el efecto sobre el Jacinto de agua, para asegurar la viabilidad de los tratamientos. Para

regular el pH ácido, se utilizó una solución de HCl 1M y para regular el pH básico se utilizó una solución de NaOH 1M.

Evaluación del efecto del pH sobre la viabilidad de la planta, la solubilidad y la remoción del mercurio.

Se determinó el pH óptimo para la remoción de mercurio en 10 días, aplicándose 5 tratamientos con 03 repeticiones teniendo en total 18 cubas, con 10 L. de agua, en las cuales se colocó 01 planta de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) para los distintos medios de pH, teniendo un testigo o C_0 (0 ppm de Hg), C_1 (0,05 ppm de Hg), C_2 (0,1 ppm de Hg), C_3 (0,2ppm de Hg), C_4 (0,3ppm de Hg), C_5 (0,5ppm de Hg) .Dada la capacidad buffer de la planta, se ajustaron los cambios de pH durante el tiempo de evaluación adicionando una solución ácida o básica. Las dimensiones de las cubas de vidrio fueron 11,6 x 30 x 40 cm.

Determinación de las concentraciones de mercurio

La cuantificación de la remoción de mercurio en cada tratamiento se llevó aplicando el método colorimétrico de la ditizona en un espectrofotómetro UV- Visible, a una longitud de onda de 520 nm. Todo el mercurio, presente en las muestras de agua, después de una digestión con ácido sulfúrico y permanganato de potasio en un baño María por 30 minutos es convertido a mercurio (II). Luego de ajustar el pH y eliminar el exceso de permanganato se procedió a llevar el mercurio a una fase orgánica. La ditizona en un disolvente orgánico, al reaccionar con iones de mercurio (II) proporcionó una coloración a la solución, esta particularidad es aprovechada para la determinación de mercurio (II) que presentó un complejo de coloración verde-azulada en cloroformo (6). El complejo formado por el mercurio (II) y la ditizona (ditizonato de mercurio) proporcionó un color poco estable en el tiempo, razón por la cual se llevó a cabo con rapidez y a un pH aproximadamente de 4.

Determinación de la remoción del mercurio a intervalos regulares de tiempo.

Se trabajó con 3 cubas, cada una tuvo 2 plantas de Jacinto de agua, con una concentración inicial de 0,2 ppm, se tomaron muestras cada hora, durante 11 horas, estas muestras fueron leídas a 520 nm, en el espectrofotómetro UV-Visible, para determinar la concentración remanente de mercurio por cada hora. Finalmente se calculó el contenido total de mercurio en mg. por cuba, cada hora.

Diseño del humedal artificial a nivel laboratorio.

Para diseño del humedal artificial se realizaron los cálculos para dimensionamiento, teniendo en cuenta el modelo de flujo (7) este diseño se considera más completo y acorde a los objetivos de este trabajo.

Resultados

Cuadro 1. Evaluación de la concentración óptima de nutrientes (KNO3).

Concentración de KNO3 (mg/L)	pH del agua	Temperatura del agua (°C)	Tamaño de planta (cm)	Tamaño de raíz (cm)	Hojas grandes
0	7,39	26,5	8,9	5	5
50	7,39	26,5	10,5	6,5	5
100	7,39	26,5	12,2	7	5
150	7,39	26,5	9,1	7,6	6
200	7,39	26,5	11	5,5	5

Cuadro 2. Variación del valor de pH inicial con respecto al final en los tratamientos.

Concentración mg/L Hg	Incremento(+)/disminución(-) del valor de pH		
	Neutro	Ácido	Básico
0	-0,19	+0,63	-1,8
1	-0,23	+1,33	-1,6
3	-0,21	+1,10	-1,5
5	-0,22	+0,87	-1,0

Cuadro 3. Determinación de la concentración final de mercurio en las cubas a diferentes pH.

Concentración Inicial de Hg (ppm)	Concentración Final de Hg (ppm) en 3 medios de pH					
	Acido	%Remoción	Neutro	%Remoción	Básico	%Remoción
0,05	0,017	65,07	0,012	77,11	0,006	89,16
0,1	0,024	76,28	0,006	94,52	0,006	94,53
0,2	0,006	97,28	0,006	97,28	0,006	97,28
0,3	0,012	96,28	0,067	78,67	0,006	98,24
0,5	0,006	98,93	0,055	89,45	0,030	94,19
Promedio		86,77		87,40		94,68

Cuadro 4. Evaluación de la remoción de mercurio a intervalos de tiempos iguales y acumulativos.

Tiempo (horas)	Abs 520 nm	Concentración (ppm de Hg)	Remoción de Hg (mg)	Remoción de Hg (mg/h)
0	0,032	0,20	0	
1	0,025	0,157	0,43	0,43
2	0,029	0,183	0	0,14
3	0,019	0,121	0,62	0,18
4	0,018	0,116	0,05	0,11
5	0,020	0,126	0	0,07
6	0,019	0,123	0,03	0,05
7	0,014	0,094	0,29	0,05
8	0,011	0,074	0,2	0,05
9	0,005	0,037	0,37	0,04
10	0,000	0,00	0,37	0,04
11	0,001	0,014	0	0,04

Aplicación de un tratamiento en un humedal artificial superficial de flujo continuo con manejo del pH óptimo para la fitorremediación de mercurio

Ensayo en el humedal

- $C_{entrada}$: 12,5 ppm de Hg (se considera esta concentración por el estudio preliminar, ya que la máxima concentración aplicada fue 0.5 ppm de Hg, en cubas de 10 L por planta, en 24 plantas, la concentración calculada fue, 12 ppm. Finalmente se aplicó 12,5 ppm, como un margen de seguridad de alguna medición en el volumen de agua en el humedal).
- Rango de pH manejado con una solución de NaOH 1M.: 7,9-10,2.
- C_{salida} : 0,055ppm de Hg
- % remoción: 99,56.

Discusión

Evaluación del efecto del incremento de la concentración de mercurio sobre la viabilidad de la planta

En la aplicación de nutrientes, se obtuvo como dosis óptima 150ppm de nitrato de potasio, teniendo en consideración que son las raíces las que ejercen el efecto fitodepurador, a esta concentración las plantas alcanzaron un mayor tamaño de sus raíces, 7,6cm. Sus raíces pueden alojar microorganismos que asociados a ellas favorece su acción depuradora. Se cree que su mecanismo de acción es a través de la formación de complejos entre el metal pesado con los aminoácidos presentes dentro de la célula, previa adsorción de los metales a través de las raíces (8).

En su estudio del efecto combinado del HgCl_2 y KNO_3 , sobre la extracción de mercurio con Jacinto de agua, menciona que la absorción de metales pesados puede aumentar, descender o permanecer estable en un rango de niveles de nutrientes dependiendo de muchos mecanismos, como la competencia de los nutrientes catiónicos con los metales pesados por los sitios de absorción, la limitación de la biodisponibilidad por complejación con los nutrientes aniónicos y el estímulo del crecimiento vegetal promovido por los altos niveles de nutrientes; y concluyen que *E. crassipes* tiene una extraordinaria capacidad para soportar y extraer el Hg y que esta capacidad no se ve afectada por el exceso de nutrientes(9). Así pues, esta especie es una candidata prometedora para la remediación de aguas eutróficas que contengan un alto nivel de K y NO_3^- .

El pH del medio neutro disminuye ligeramente, en valores casi uniformes conforme aumenta la concentración de mercurio; para el medio ácido el pH tiende a aumentar, pero conforme aumenta la concentración de mercurio, disminuye la capacidad del sistema para aumentar el pH. En el medio básico, el pH disminuye, pero conforme aumenta la concentración de mercurio, disminuye en menor proporción.

Los resultados obtenidos en la presente investigación, respecto a la variación de pH se asimilan a los obtenidos en el estudio de remoción de mercurio con quitosano que durante la realización de estos experimentos, se observó que el pH de la solución iba incrementándose a medida que ocurría el proceso de adsorción hasta alcanzar un pH promedio de aproximadamente 7,2 (10).

Evaluación del efecto del pH sobre la viabilidad de la planta, la solubilidad y la remoción del mercurio

En la determinación del porcentaje de remoción de mercurio, se observó que en el medio básico se produjo el más alto porcentaje de remoción promedio de mercurio con un valor de 94,67%, siendo a concentraciones bajas de mercurio donde el jacinto de agua presenta la máxima capacidad de fitodepuración de mercurio.

Los resultados obtenidos en esta investigación nos indican que el medio básico es muy favorable para la remoción de mercurio con *E. crassipes*, en el estudio de remoción de cromo(VI) con *E. crassipes* el comportamiento de la biomasa experimentada a distinto pH demuestra que la macrófita *Eichhornia crassipes* por su composición de carbono presentará una mayor disociación cuanto mayor sea el pH y será más favorable la adsorción de elementos cargados positivamente a partir de un pH igual a 9, (11).

La biosorción de fenol por las algas marinas *Lessonia nigrescens* Bory y *Macrocystis integrifolia* Bory, como una función del pH de la solución inicial, fue investigada, y reportan un porcentaje de adsorción más alta a pH 10 con valores entre 10% y 35%, respectivamente (12). De los resultados, se propone una fuerte dependencia de adsorción sobre el pH en el nivel de la química acuosa del fenol impulsado puramente por un mecanismo polar que implica la formación de enlaces de hidrógeno con los grupos hidroxilo que están espacialmente dispuestos en las cadenas de polisacáridos que forman la estructura de algas marinas.

La remoción de mercurio en medio ácido fue la menor entre los tres medios de pH evaluados. La baja capacidad de adsorción a bajos valores de pH ($\text{pH} < 4$) puede deberse a la competencia de los protones, iones H^+ , y los iones metálicos por los sitios amino disponibles en el quitosano. A estos pH, más iones H^+ están disponibles para protonar grupos aminos y formar $-\text{NH}_3^+$, reduciendo los sitios activos para la adsorción de los iones metálicos (10).

Por otro lado, la protonación de grupos aminos en solución ácida induce a una repulsión electrostática que reduce el número de sitios activos disponibles para la adsorción de iones mercurio (13). A pH más altos la adsorción aumenta debido al decrecimiento de iones H^+ en la solución (14).

Los beneficios de los procesos(reducción de metales, reducción en la fijación de metales pesados y algunos metaloides) con respecto a la variación de los valores de pH en la actividad del proceso biotecnológico, para la presente investigación, se obtiene mayores beneficios(15) con respecto a la remoción de mercurio, controlando el pH a un medio básico en un rango de 8-9, mientras que un medio ácido también se observó remoción de mercurio en menor cantidad y con signos de aceptable adaptación de la *E. crassipes* al medio ácido .

Los productores (para el caso las plantas de Jacinto de agua) toman los nutrientes de su ambiente y debido a que una deficiencia de estos nutrientes puede limitar el crecimiento del productor, los productores harán el mayor esfuerzo para obtenerlos con frecuencia, gastan considerable energía para incorporar los nutrientes en sus cuerpos, incluso incorporan más de lo necesario en el momento y lo almacenan. El problema se presenta cuando un producto contaminante como el mercurio, se presenta en el ambiente. Este contaminante se asemeja químicamente a nutrientes inorgánicos esenciales, por lo que son incorporados y almacenados "por error" (16).

Evaluación de la remoción de mercurio a intervalos de tiempos iguales y acumulativos.

Durante la evaluación de la remoción de mercurio en intervalos de tiempos iguales y consecutivos, se pudo observar que el jacinto de agua, efectúa una remoción cuantitativa heterogénea de mercurio, presentando de manera general una disminución de la concentración de mercurio a lo largo del tiempo de evaluación en forma directa, sin embargo en algunas horas de evaluación, la concentración de mercurio aumentaba, respecto a la concentración remanente de comparación, efecto que podría producirse por la desorción de mercurio, desde las raíces del Jacinto de agua. El proceso de biorremediación se puede explicar por la acumulación de metales por los organismos acuáticos y se presenta en un proceso que consiste en dos pasos: un primer paso de absorción rápida o vinculación a la superficie biológica (biosorción), seguido por un segundo paso de transporte lento e irreversible, controlado por la difusión al interior de la célula (bioacumulación) que puede ser por difusión del ión metálico a través de la membrana celular o por transporte activo por una proteína transportadora (17).

El mecanismo involucrado en la biosorción de metales pesados es a través de un intercambio de iones entre metales monovalentes como iones móviles intercambiables presentes en la biomasa de las macrófitas e iones de metales pesados y protones tomados desde el agua, esta biosorción llega a un punto de saturación (8,18), esto se puede comprobar en la presente investigación durante la evaluación de la cinética de remoción de mercurio cuando la concentración de mercurio disminuye y aumenta a lo largo del período de evaluación.

El punto de saturación es un fenómeno superficial de adsorción monocapa, caracterizado por una capacidad máxima por adsorbente, el cual después de un cierto tiempo de contacto con la solución, llega a un nivel de saturación en el que la concentración de la sustancia de interés en el adsorbente es constante (19), esto coincide con lo que se observa en la presente investigación cuando se evalúa la concentración de mercurio, después de 9 y 10 horas donde se observa una remoción constante de mercurio con *E. crassipes* de 0,37mg en ambos tiempos.

Aplicación de un tratamiento en un humedal artificial superficial de flujo continuo con manejo del pH óptimo para la fitorremediación de mercurio.

La aplicación de la remoción de mercurio en un humedal artificial superficial de flujo continuo a escala de laboratorio, presentó un mayor remoción de mercurio (99.56%) que las pruebas tipo batch aplicadas en las cubas de vidrio, lo que podría

explicarse por la movilización de los iones de mercurio en el humedal, producto del desplazamiento del flujo de entrada tipo pistón, cantidad de remoción de metales con un sistema continuo, que es similar al que reportaron. En un estudio de remoción de metales en drenajes ácidos de mina, con algas, donde mencionan que se consiguieron porcentajes de remoción del 99% para Fe, 91% para Mn y 92% para Al presentes en un DAM mediante algas marinas *sargassum sp.* en un proceso en continuo, utilizando un diseño de un tanque horizontal (20).

Conclusiones

1. La *Eichhornia crassipes* presenta gran capacidad de amortiguamiento del pH. en los medios ácido y básico.
2. La variación de pH hacia el medio neutro con la *E. crassipes*, es más fácil desde un valor de pH básico.
3. A mayor concentración de mercurio, menor es la capacidad de amortiguamiento de pH en los tres medios de pH.
4. En medio básico, el peso de las raíces aumenta en forma directamente proporcional a las concentraciones crecientes de mercurio.
5. En medio básico se logró el mayor porcentaje promedio de remoción de mercurio.
6. La cinética de remoción de mercurio con *Eichhornia crassipes*, no es proporcional a lo largo del periodo de evaluación.
7. La remoción de mercurio con *Eichhornia crassipes* en sistema continuo es mayor que un sistema tipo batch.

Referencias bibliográficas

1. Leady BS, Gottgens JF. Mercury accumulation in sediment cores and along food chains in two regions of the Brazilian Pantanal. *Wetlands Ecology and Management*. 2001; 361-349.
2. Hites R. *Elements of Environmental Chemistry*. Wiley- Interscience. John Wiley & Sons Inc. USA: New Jersey;. 2007. p.176-173
3. Penfound WT, Earle TT. *The Biology of the Water Hyacinth*, *Ecological Monographs*. 1948; 18:447-472.
4. Muramoto S, Oki Y. Removal of some Heavy Metals from Polluted Water by Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*), *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 1983; 30:177-170.
5. Cordes KB, Mehra A, Farago ME, Banerjee DK. Uptake of Cd, Cu, Ni and Zn by the water hyacinth, *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms from pulverised fuel ash (PFA) leachates and slurries. *Environmental Geochemistry and Health*, The Netherlands. 2000; 22:316-297.
6. Piña X, Lué-Meru M, Poleo G, Rojas J, Torres G. Optimización de un método analítico para la

- determinación de mercurio en muestras ambientales por espectrometría UV-Visible. Avances en Química, Venezuela. 2012; 7(3):180-171.
7. Reed SC, Crites RW, Middlebrooks EJ. Natural systems for waste management and treatment, 2° Ed. U.S.A., New York: McGraw-Hill; 1995. 444 p.
 8. Metcalf L, Eddy H. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. 3° Ed. España: Mc Graw-Hill/interamericana de España S.A.; 1995. 1485 p.
 9. Caldelas C, Iglesia-Turiño S, Araus J, Febrero A, Bort J. Efecto combinado del $HgCl_2$ y el KNO_3 sobre la extracción de mercurio y la composición elemental del Jacinto de agua. España, Redisa; 2008.
 10. Benavente M, Sjören A, Martinez J. Remoción de mercurio de efluentes mineros por biosorción: un caso de estudio en la ciudad de La Libertad, Chontales, Nicaragua. Nexa Revista Científica, Nicaragua. 2007; 20(2):55-47.
 11. Torres S. Estudio de aprovechamiento del lechuguín *Eichhornia crassipes*, del embalse de la represa Daniel Palacios, como biosorbente de metales pesados en el tratamiento de aguas residuales. [Tesis Ing. Ambiental]. Cuenca, Ecuador. Universidad Politécnica Salesiana. 2009 132 p.
 12. Navarro A, Portales R, Sun-Kou M, Llanos B. Effect of pH on phenol biosorption by marine seaweed. ScienceDirect. New, York, USA. 2007; 156(1-3):11-405.
 13. Jeon, C., Höll W.H. Chemical Modification of Chitosan and Equilibrium Study for Mercury Ion Removal. Water Research, U.S.A. 2003; 37(19):4780-4770.
 14. Wan N, Ghani S, Kamari A. Adsorption Behaviour of Fe(II) and Fe(III) ions in Aqueous solution on Chitosan and Cross-linked Chitosan Beads. Bioresource Technology, USA. 2005; 96(4):450-443.
 15. Kadlec R, Wallace S. Treatment wetlands. 2 ed. U.S.A.: Taylor & Francis Group; 2009. 1000 p.
 16. Marcano JE. Educación ambiental en la República Dominicana. [Internet] 2003; [citado el 3 de ab. De 2014]. Disponible desde: <http://www.jmarcano.com/index.html>
 17. Wang TC, Weissman JC, Ramesh G, Benemann JR. Parameters for removal of toxic heavy metals by water milfoil (*Myriophyllum spicatum*). Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. U.S.A. 1996; 57:786-779.
 18. Miretzky P, Saralegui A, Fernandez C. Simultaneous heavy metal removal mechanism by dead macrophytes. Chemosphere, U.S.A. 2006; 62(2):254-247
 19. Oporto C, Arce O, De Pauw N, Van Der Broeck E. Evaluación del potencial de *Lemma minor* para la remoción de Cr(VI) de aguas residuales. Revista Boliviana de Ecología, Bolivia. 2001; 10: 27-17
 20. Diaz A, Arias J, Gelves G, Maldonado A, Laverde D, Pedraza J, Escalante H. Biosorción de Fe, Al y Mn de drenajes ácidos de mina de carbón empleando algas marinas *sargassum sp.* en procesos continuos. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, Medellín Colombia. N° 30. 2003; pp. 48-34.