

USO DE LA RIZOFILTRACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES LIQUIDOS DE CIANURACION QUE CONTIENEN CROMO, COBRE Y CADMIO

Alicia Guevara, Ernesto de la Torre, Ana Villegas, Evelyn Criollo*

- ✓ Este artículo forma parte del “Volumen Suplemento” **S1** de la *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales (RLMM)*. Los suplementos de la RLMM son números especiales de la revista dedicados a publicar memorias de congresos.
- ✓ Este suplemento constituye las memorias del congreso “X Iberoamericano de Metalurgia y Materiales (X IBEROMET)” celebrado en Cartagena, Colombia, del 13 al 17 de Octubre de 2008.
- ✓ La selección y arbitraje de los trabajos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del X IBEROMET, quien nombró una comisión *ad-hoc* para este fin (véase editorial de este suplemento).
- ✓ La RLMM no sometió estos artículos al proceso regular de arbitraje que utiliza la revista para los números regulares de la misma.
- ✓ Se recomendó el uso de las “Instrucciones para Autores” establecidas por la RLMM para la elaboración de los artículos. No obstante, la revisión principal del formato de los artículos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del X IBEROMET.

USO DE LA RIZOFILTRACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES LIQUIDOS DE CIANURACION QUE CONTIENEN CROMO, COBRE Y CADMIO

Alicia Guevara*, Ernesto de la Torre, Ana Villegas, Evelyn Criollo

Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Metalurgia Extractiva, Quito-Ecuador

* E-mail: alicia.guevara@epn.edu.ec

Trabajos presentados en el X CONGRESO IBEROAMERICANO DE METALURGIA Y MATERIALES IBEROMET
Cartagena de Indias (Colombia), 13 al 17 de Octubre de 2008
Selección de trabajos a cargo de los organizadores del evento

Publicado On-Line el 29-Jul-2009
Disponible en: www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html

Resumen

La rizofiltración, es una técnica alternativa de fitoremediación, que usa raíces de plantas para descontaminar aguas o efluentes líquidos. Se puede usar para el tratamiento de soluciones contaminadas con metales pesados, ya que es una de las opciones que presenta el mejor costo-beneficio respecto a otros métodos mecánicos o químicos empleados con los mismos fines. En este trabajo se emplea la rizofiltración para la detoxificación de soluciones sintéticas que contienen cromo, cobre y cadmio, de concentraciones de 5 a 20 mg/l y además para el tratamiento de un efluente líquido de cianuración industrial, con contenidos elevados de cobre (177 mg/l), cromo (0,02 mg/l) y cadmio (2,1 mg/l). En ambos casos se evalúa el porcentaje de absorción de contaminantes de las soluciones, empleando plantas de pasto, alfalfa y sambo. Se determina que, usando raíces de pasto y alfalfa se logra obtener el 99 % de absorción de cobre y más del 80% de absorción de cadmio, mientras que para el cromo se tiene hasta el 60% de absorción con raíces de sambo.

Palabras Claves: Rizofiltración, efluentes de cianuración.

Abstract

The rizofiltration is an alternative technique of phyto-remediation, which uses the plant's roots to clean up water or other liquid effluents. It can be used for treatment of solutions that have been contaminated by heavy metals, as it is one of the cheapest and efficient physic or chemistry processes. There is used detoxification for synthetic solutions which have chromium, copper, cadmium, of concentrations of 5 to 20 mg/l and also for the treatment of liquid effluents which have industrial cyanide, high levels of copper (177 mg/l), chromium (0.02 mg/l) and cadmium (2.1 mg/l). In both cases it is evaluated the percentage of absorption of contaminants in the solutions, by using plants of grass, alfalfa and pumpkin. It's determined that, by using roots of grass and alfalfa, we obtained 99% of absorption of copper and more than 80% of absorption of cadmium. We obtained absorption of 60% of chromium by using pumpkin roots.

Keywords: Rizofiltration, cyanide effluents

1. INTRODUCCION

La rizofiltración, es una técnica de fitoremediación que usa raíces de plantas para descontaminar agua superficial, subterránea o efluentes líquidos contaminados con metales pesados, toxinas orgánicas, entre otros elementos. (García *et al.* [1])

Las plantas que se utilizan con este fin se cultivan en invernaderos, con las raíces sumergidas en agua, en lugar de tierra. Cuando el sistema radicular de la planta está bien desarrollado, sus raíces se colocan en contacto con el agua o efluente a tratar. A

medida que las raíces se van saturando en agua y contaminantes se van cortando y eliminando.

La rizofiltración es una de las opciones que presenta mejor relación de costo-beneficio respecto a otros métodos empleados para el tratamiento de efluentes líquidos. Además es estética y naturalmente amigable con el ambiente, por lo que se presenta como una forma de descontaminación socialmente aceptable para las comunidades circundantes y para los organismos de control respectivos.

Algunos ejemplos referenciales del uso de la rizofiltración para el tratamiento de agua contaminada con petróleo se tienen en Virginia (USA), donde se utilizaron plantas de pasto y trébol. En la India se aplicó para el tratamiento de agua contaminada con cadmio, plomo y níquel empleando raíces de mostaza, geranio y girasol. Esta técnica se ha aplicado incluso para el tratamiento de agua con residuos radiactivos, en Chernobyl (Ucrania), donde se usaron plantas de girasol. Se considera sin embargo, que la rizofiltración está aún en fase de investigación (Mejía [2]).

Por otro lado, según De la Torre [3], en la última década, la pequeña minería (< 100 ton/mes) en el Ecuador, se dedica especialmente a la recuperación del oro (9-12 ton Au/año) y plata (5 ton/año) de minerales primarios, de manera tradicional y en muchos casos rudimentaria; por este motivo los procesos de lixiviación empleados para extracción de oro, usan concentraciones elevadas de cianuro libre (> 1g/l) que solubilizan también otros metales. Estos efluentes líquidos se descargan al ambiente, en la mayoría de los casos, sin tratamiento previo.

En este trabajo se evalúa la factibilidad de utilizar la rizofiltración para el tratamiento de los efluentes líquidos generados en la cianuración. Con este fin se emplean dos tipos de soluciones:

- 1) Soluciones sintéticas preparadas a partir de sulfatos de cromo, cobre y cadmio, de concentraciones desde 5 hasta 20 mg/l.
- 2) Un efluente líquido de cianuración industrial con contenidos de cobre (177 mg/l), cromo (0,02 mg/l) y cadmio (2,1 mg/l).

En ambos casos se evalúa el porcentaje de absorción de contaminantes de las soluciones, usando plantas de pasto, alfalfa y sambo, así como la resistencia de estas a diferentes concentraciones de cianuro de sodio. Se implementan cultivos de dichas especies usando métodos hidropónicos, iniciando este proceso a partir de semillas, con el fin de establecer las mejores condiciones de tratamiento.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Elección del tipo de planta

Inicialmente se busca determinar cuáles especies son aptas para la absorción de metales en solución, con este objetivo se recolectan plantas de pasto, alfalfa, col, brócoli y coliflor de alrededor de 30 cm

de longitud y con raíces bien desarrolladas. Las raíces de estas plantas se colocan en contacto con soluciones sintéticas de cobre (5 mg/l), durante 24 horas y se registran los cambios que éstas sufren.

La cantidad de cobre absorbido por las raíces al final del proceso, se determina por la diferencia entre la concentración inicial y final de cobre en la solución, empleando un espectrofotómetro de absorción atómica (A Analyst 300).

Se seleccionan las especies que presentan el mayor porcentaje de absorción de cobre y mejor resistencia al contacto con este contaminante, realizándose cultivos hidropónicos de las mismas.

2.2. Cultivos hidropónicos

Se cultivan las especies escogidas, iniciando este proceso a partir de semillas.

Para la *implementación de los semilleros* se emplea espuma de poliuretano, cortado en cubos de 2,5 cm de lado, con una ranura central en la cual se colocan las semillas de las plantas.

Los cubos se sumergen en agua destilada por 24 horas y posteriormente se elimina el exceso de humedad para que empiece el proceso de germinación. Cuando las primeras plántulas empiezan a aparecer, las esponjas se trasladan a bandejas que contiene solución nutritiva, donde se colocarán sobre malla metálica, ordenándolas como un tablero de ajedrez (con un espacio intermedio).

La solución nutritiva se elabora de acuerdo a los datos sugeridos por la bibliografía (Calderos [4], Castañeda [5], Howard [6]) para cultivos hidropónicos. Ensayos preliminares permiten determinar las concentraciones de los nutrientes que aseguren el correcto desarrollo de las plantas.

La solución empleada contiene calcio (400 mg/l), magnesio (40 mg/l), potasio (600 mg/l), nitrógeno como NO₃⁻ (500 mg/l), fósforo (250 mg/l), azufre (150 mg/l) y cantidades menores de cloro (0,05 mg/l), hierro (3 mg/l), manganeso (0,1 mg/l), zinc (0,03 mg/l), boro (0,5 mg/l), molibdeno (0,4 mg/l).

Una vez que las plantas ubicadas en las bandejas tienen de 8 a 10 cm de altura se las lleva a recipientes (vasos) de 1 litro de capacidad. Estos recipientes también contienen solución nutritiva para asegurar que las plantas crezcan hasta un tamaño de entre 30 a 60 cm. de altura y que desarrollarán raíces resistentes.

Durante el proceso se realiza el control periódico de la germinación, crecimiento, desarrollo aéreo,

longitud de raíces y porcentaje de mortalidad, así como la aparición de algas y plagas (Villegas [7]).

2.3. Tratamiento de soluciones sintéticas

Se preparan soluciones sintéticas de 5 mg/l, 10 mg/l, y 20 mg/l de cobre, cadmio, cromo, empleando como solvente solución nutritiva y agua destilada.

La raíces de las plantas ya desarrolladas (30- 60 cm de altura) se colocan en contacto con las soluciones preparadas. Se emplean 10 plantas de cada especie para la absorción de cada uno de los metales, el proceso se realiza por 30 días.

Durante este periodo se controla la absorción de cobre, cadmio y cromo, en las soluciones tratadas con las diferentes especies de plantas, usando espectrofotometría de absorción atómica. Controles se realizan los días: 1, 2, 3, 4, 7, 15, 22 y 30.

Adicionalmente se registra el tamaño de cada planta, de las raíces, de las hojas y tallos, tanto al inicio como al final del proceso, además del pH (6 – 7).

Se observa la afectación que sufren las plantas por la absorción de los metales, señalando los cambios de color, marchitamiento y porcentaje de mortalidad.

Una vez terminado el tratamiento, se registra el peso húmedo y seco de las plantas. En cada grupo se determina cuanto metal se encuentra absorbido por la raíz y por las hojas, para esto se realiza la disgregación ácida de las muestras secas y se determina la concentración del metal en cada fracción por espectrofotometría de absorción atómica.

2.4. Tratamiento de solución efluente de proceso de cianuración industrial

Se emplean los resultados obtenidos de los diferentes tratamientos aplicados a las soluciones sintéticas. Con el procesamiento estadístico de los datos se fijan las mejores condiciones para la detoxificación de estas soluciones.

Se utiliza una solución de cianuración industrial, con contenidos de cobre de 177 mg/l, cromo de 0,02 mg/l y cadmio de 2,1 mg/l. La solución se coloca en contacto con las especies cultivadas por medios hidropónicos y en este caso las plantas afectadas o marchitas son reemplazadas por nuevas en buen estado.

Se busca determinar el número de plantas necesario para reducir la concentración de metales hasta los límites permitidos por la normativa ambiental vigente en Ecuador, esto es 1,0 mg/l de cobre, 0,02 de cadmio y 0,5 mg/l de cromo.

Se determina la especie más resistente y más eficiente para la absorción de metales, además de la concentración de cianuro a la que pueden adaptarse las plantas, para esto se usan soluciones de 0,01 a 2 g/l de concentración de cianuro de sodio.

Con estos resultados se realiza el diseño preliminar de humedales (Lara [8]) para tratar 5 m³ diarios de un efluente de cianuración industrial.

2.5. Tratamiento estadístico de datos

Es importante señalar que para esta investigación se han empleado alrededor de 600 plantas de pasto, alfalfa y sambo. El procesamiento de los datos obtenidos para el porcentaje de absorción de metales, mortalidad, tamaño de plantas y raíces, se realiza empleando el método de análisis de varianzas (ANOVA), (González [9]).

3. RESULTADOS Y DISCUSION

Un resumen de los resultados obtenidos en este trabajo de investigación se presenta a continuación:

Para la *elección del tipo de planta* que se usará para la detoxificación de soluciones, se colocan en contacto plantas desarrolladas con una solución de 5 mg/l de cobre, durante 24 horas. Luego de este periodo se obtienen los resultados que se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Elección del tipo de planta

Tipo de planta	Tamaño de raíz (cm)	Concentración final de Cu (mg/l)	Porcentaje absorción de cobre (%)
Alfalfa	20	1,8	65
Col	17	4,6	9
Coliflor	14	2,0	60
Pasto	14	1,2	75
Sambo	10	0,1	97
Brócoli	8	2,0	50

Los mayores porcentajes de absorción se obtienen para la alfalfa, el pasto y el sambo, con tamaños de raíces que van de 10 a 20 cm de longitud. Las tres especies se cultivarán por medios hidropónicos para la aplicación de la rizofiltración al tratamiento de soluciones que contienen cobre cadmio y cromo.

3.1. Absorción de cobre de soluciones sintéticas por raíces de plantas de pasto

Los porcentajes de absorción de cobre en raíces de pasto, durante 30 días, a partir de soluciones de 5, 10 y 20 mg/l de concentración inicial, se presentan en la Tabla 2.

El mayor porcentaje de absorción de cobre (80%), se obtiene al trabajar con soluciones de menor concentración de este metal (5mg/l).

Al incrementar la concentración de cobre en solución disminuye la capacidad de absorción de las raíces y se incrementa el porcentaje de mortalidad, llegando incluso al 70%, sin embargo aún se logran importantes porcentajes de absorción de este elemento.

Tabla 2. % Absorción de cobre por raíces de pasto

Día	% Absorción [Cu=5mg/l] inicial	% Absorción [Cu=10mg/l] inicial	% Absorción [Cu=20mg/l] inicial
1	53	40	41
2	54	43	45
3	65	45	48
4	66	47	47
7	68	53	55
15	75	64	60
22	76	65	66
30	80	67	67
%mortalidad	20	70	60

La longitud final promedio de las raíces de las plantas utilizadas es de 21 cm. Es importante señalar que cada especie de planta obtenida por medios hidropónicos (pasto, alfalfa, sambo) tiene un tamaño estadísticamente similar a las demás de su misma especie y que el porcentaje de germinación de las semillas va del 80 – 95%, con 15 días para el pasto y el sambo y 5 días para la alfalfa

3.1. Absorción de cobre, cadmio y cromo de soluciones sintéticas por raíces de pasto

Los porcentajes de absorción de los tres elementos, por raíces de pasto, a partir de soluciones de 5 mg/l de concentración inicial se presentan en la Tabla 3.

Se puede observar que al día 30 del proceso, se obtiene 80% de absorción de cobre y el 77 % para el cadmio, mientras que para el cromo se alcanza el 18% solamente. El porcentaje de mortalidad está entre el 20 – 30%.

Tabla 3. % Absorción de cobre, cadmio y cromo por raíces de pasto

Día	% Absorción [Cu=5mg/l] inicial	% Absorción [Cd=5mg/l] inicial	% Absorción [Cr=5mg/l] inicial
1	53	67	0
2	54	68	0
3	65	69	9
4	66	77	10
7	68	75	11
15	75	77	13
22	76	77	16
30	80	77	18
%mortalidad	20	20	30

Se debe destacar que el día 15, ya se obtienen porcentajes altos de absorción de cobre y cadmio y que el primer día, estos porcentajes ya superan el 50%. Podemos afirmar por tanto que el pasto tiene buena capacidad de absorción de cobre y cadmio en solución.

3.2. Absorción de cobre, cadmio y cromo de soluciones sintéticas por raíces de sambo

Los porcentajes de absorción de los tres elementos por raíces de sambo, a partir de soluciones de 5 mg/l de concentración inicial se presentan en la Tabla 4.

El día 30 del proceso, se obtiene 78 % de absorción de cobre y cadmio y el 60 % para el cromo.

El porcentaje de mortalidad es alto, llegando incluso al 90% cuando se trabaja con 5 mg/l cromo.

Tabla 4. % Absorción de cobre, cadmio y cromo por raíces de sambo

Día	% Absorción [Cu=5mg/l] inicial	% Absorción [Cd=5mg/l] inicial	% Absorción [Cr=5mg/l] inicial
1	73	67	0
2	68	73	1
3	74	77	14
4	76	78	26
7	78	74	30
15	74	77	50
22	76	78	60
30	78	78	60
%mortalidad	40	90	60

El primer día de proceso ya se alcanzan valores altos de absorción de cobre y cadmio, y a partir del cuarto día estos valores son cercanos a los obtenidos al día 30, por tanto se podría terminar el proceso durante la primera semana de contacto. Para el cromo recién el día 15 se logra obtener 50% de absorción.

Las plantas de sambo se marchitan más rápido que las de pasto y sus raíces presentan coloración amarilla, sin embargo después de 30 días se observa la aparición de hojas nuevas en las plantas afectadas. Esto puede indicar que las plantas se adaptan a estas condiciones de desarrollo.

3.3. Absorción de cobre, cadmio y cromo de soluciones sintéticas por raíces de alfalfa

Los porcentajes de absorción de los tres elementos por raíces de alfalfa, a partir de soluciones de 5 mg/l de concentración inicial se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. % Absorción de cobre, cadmio y cromo por raíces de alfalfa

Día	% Absorción [Cu=5mg/l] inicial	% Absorción [Cd=5mg/l] inicial	% Absorción [Cr=5mg/l] inicial
1	58	45	12
2	63	49	14
3	65	50	16
4	69	59	20
7	67	71	21
15	67	75	22
22	67	80	31
30	67	83	41
%mortalidad	0	50	30

En este caso, el día 30 del proceso se obtiene 67% de absorción de cobre, 83 %de cadmio y el 41 % para el cromo.

A partir del tercer día de proceso el porcentaje de absorción de cobre prácticamente no varía y por tanto sería suficiente una semana de tratamiento para soluciones que lo contengan.

Las plantas empleadas presentan coloración rosada o morada en algunas de sus hojas cuando empiezan a marchitarse. El porcentaje de mortalidad es alto cuando se trabaja con cadmio y cromo, mientras que con cromo las plantas prácticamente no sufren afectación.

3.4. Absorción de cobre cadmio y cromo de solución de cianuración industrial

Para el tratamiento de la solución de cianuración industrial se emplearán plantas de pasto y alfalfa, que son las que presentaron mayor resistencia al contacto de soluciones sintéticas que contienen los tres metales.

Se utilizan 1,5 litros de un efluente industrial con contenidos de cobre de 177 mg/l, cromo de 0,02 mg/l y cadmio de 2,1 mg/l. Esta solución se coloca en contacto con las raíces de las plantas, en grupos de 10.

En la tabla 6 se presentan los resultados obtenidos para el tratamiento con *pasto* y podemos observar que el día 30 del proceso, se obtiene 99,9 % de absorción de cobre, 85 %de cadmio y el 30 % para el cromo. Para obtener estos resultados, que permiten alcanzar los límites permitidos en la normativa ambiental, se necesitaron 21 plantas.

A partir del primer día de proceso el porcentaje de absorción de cobre y cadmio ya son elevados.

Tabla 6. % Absorción de cobre, cadmio y cromo de solución de cianuración industrial, por raíces de pasto

Día	% Absorción [Cu=177mg/l] inicial	% Absorción [Cd=2,5mg/l] inicial	% Absorción [Cr=0,02mg/l] inicial
1	63	51	0
7	64	72	15
15	97	85	25
30	99	85	30

En la tabla 7 se presentan los resultados obtenidos para el tratamiento con *alfalfa*, donde se observa que el día 30 del proceso, se obtiene 99,6 % de absorción de cobre, 80 % de cadmio y el 41 % para el cromo. En este caso, para cumplir con la normativa ambiental se necesitaron 21 plantas.

El día 15 de proceso ya se han alcanzado resultados similares a los del día 30.

Tabla 7. % Absorción de cobre, cadmio y cromo de solución de cianuración industrial, por raíces de alfalfa

Día	% Absorción [Cu=177mg/l] inicial	% Absorción [Cd=2,5mg/l] inicial	% Absorción [Cr=0,02mg/l] inicial
1	56	45	0
7	74	77	13
15	98	80	40
30	99	80	41

3.5. Absorción de cobre cadmio y cromo en raíces y hojas

Se determina cuanto metal se encuentra absorbido por la raíz y por las hojas de las especies empleadas, los resultados obtenidos se encuentran en la tabla 8

En todos los casos más del 90% del elemento absorbido se encuentra en la raíz de la planta empleada, lo que indica que el proceso de descontaminación de las soluciones se está efectuando realmente por las raíces.

Los metales absorbidos por las hojas y tallos a pesar de ser bajos producen cambios de coloración y marchitamiento localizado en las plantas empleadas.

Tabla 8. % Absorción de cobre, cadmio y cromo en raíces y hojas de plantas empleadas

Planta	% Adsorción de Cobre		% Adsorción de Cadmio		% Adsorción de Cromo	
	Raíz	Hojas	Raíz	Hojas	Raíz	Hojas
Pasto	93	7	95	5	89	11
Sambo	96	4	97	3	96	4
Alfalfa	99	1	99	1	98	2

3.6. Determinación de concentraciones de cianuro de sodio tolerables por las plantas

El contacto de las raíces de las plantas con soluciones que poseen diferentes concentraciones de cianuro de sodio acelera el proceso de deterioro de estas.

Esto se hace aún más evidente a mayores concentraciones de cianuro, sin embargo las plantas resisten al menos 7 días de tratamiento antes de marchitarse.

Tabla 9. % Resistencia de plantas a cianuro

Concentración de cianuro (g/l)	Resistencia de las plantas
2,0	Plantas mueren al día 7
0,5	Plantas mueren al día 9
0,1	Plantas mueren al día 9
0,01	Plantas no mueren al día 15

Para la detoxificación de soluciones que contienen cianuro de sodio, usando rizofiltración, se deberá procurar trabajar con las concentraciones más bajas posible de este lixivante de oro.

3.7. Determinación de dimensiones para un humedal de tratamiento de solución cianurada

Se determinan las dimensiones de un humedal para tratar un flujo diario de 5 m³ de una solución del proceso de cianuración industrial, con el fin de que cumpla con los límites permisibles para la descarga de efluentes.

Para el cálculo se consideran 10 días de tratamiento de la solución y en función de los resultados obtenidos anteriormente, se determina que se deben emplear 6000 plantas en total, en 10 humedales cuyas dimensiones son: 3 metros de ancho, 6 metros de largo y 0.3 metros de profundidad fijado en función de la longitud máxima de raíces de las plantas empleadas para los tratamientos estudiados.

4. CONCLUSIONES

- En el cultivo hidropónico de plantas de *Pasto* se requieren 15 días para completar el proceso de germinación, con el 80% de rendimiento (80% de plantas bien desarrolladas).
- Para el cultivo hidropónico de plantas de *Alfalfa* se necesitan 5 días de germinación con el 95% de rendimiento.
- Para el cultivo hidropónico de plantas de *Sambo* se necesitan 12 días para su germinación y se obtendrá el 80% de rendimiento.
- La rizofiltración aplicada a soluciones sintéticas de 5 mg/l de cobre, cadmio y cromo ha brindado los siguientes resultados en promedio, al día 30 de tratamiento:

Tabla 10. % Absorción de cobre, cadmio y cromo de soluciones sintéticas al día 30

Planta	% Absorción [Cu=5mg/l] inicial	% Absorción [Cd=5mg/l] inicial	% Absorción [Cr=5g/l] inicial
Pasto	80	77	18
Sambo	78	78	60
Alfalfa	67	83	41

- El porcentaje de absorción de metales disminuye si la concentración de estos elementos aumenta en la solución. En el caso del cobre la absorción disminuye de 80 a 67% al trabajar con soluciones de 5 y 20 mg/l de cobre respectivamente.
- El porcentaje de mortalidad de las plantas empleadas se incrementa del 20 al 70% si se trabajan con concentraciones de 20 mg/l de cobre.

- En promedio el porcentaje de mortalidad de las plantas sometidas al tratamiento es de 20% para el pasto, 50% para el sambo y 25% para la alfalfa.
- Las raíces de plantas de sambo pueden absorber eficazmente cobre y cadmio en solución, sin embargo no son muy resistentes, produciéndose en ocasiones desprendimiento parcial de pequeñas secciones de raíz.
- Las raíces de sambo permiten absorber un 60% de cromo en solución y pueden ser utilizadas con este fin, considerando que se requiere más cuidado durante su desarrollo que el necesario para las plantas de alfalfa y pasto.
- Las plantas de pasto, alfalfa y sambo obtenidas por medios hidropónicos tienen un tamaño estadísticamente similar a las demás de su misma especie desarrolladas bajo las mismas condiciones.
- La rizofiltración con plantas de pasto y alfalfa, aplicada a una solución efluente de cianuración industrial, con contenidos de cobre de 177 mg/l, cromo de 0,02 mg/l y cadmio de 2,1 mg/l, ha brindado los siguientes resultados en promedio:

Tabla 11. % Absorción de cobre, cadmio y cromo de solución efluente de cianuración industrial al día 30

Planta	% Absorción [Cu=177mg/l] inicial	% Absorción [Cd=2,5mg/l] inicial	% Absorción [Cr=0,02mg/l] inicial
Pasto	99	85	30
Alfalfa	99	80	41

- En todos los casos la mayor concentración de elementos (89 – 99 %) se encuentra en la raíz de la planta empleada.
- La concentración de cobre, cadmio y cromo presente en las hojas de las plantas empleadas es del 1 a 11% y a pesar de ser baja, produce cambios en la coloración normal de las hojas y acelera su marchitamiento parcial.
- Concentraciones mayores de 0,1 g/l de cianuro libre aceleran el marchitamiento y la muerte de las plantas al día 9, sin embargo se logran recuperaciones promedio de 85% de cobre y cadmio.
- Concentraciones de 0,01 g/l de cianuro de sodio no afectan a las plantas empleadas.
- Los mejores resultados de absorción de cobre y cadmio en soluciones cianuradas industriales se obtienen empleando pasto, mientras que la

alfalfa resulta más efectiva para el cromo.

- Se necesitan 21 plantas de pasto y 28 de alfalfa para disminuir la concentración de cobre (177 mg/l), cadmio (2,5 mg/l) y cromo (0,02 mg/l) hasta los límites permisibles por la normativa ambiental vigente en Ecuador.
- Se estima que para tratar 5 metros cúbicos diarios de solución de cianuración industrial se requieren 6000 plantas distribuidas superficialmente en 10 humedales de 3 metros de ancho, 6 metros de largo y 0,3 metros de profundidad.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su sincero agradecimiento a la Escuela Politécnica Nacional por el apoyo económico y las facilidades brindadas para el desarrollo de esta investigación.

Al Departamento de Suelos (Pedologie) de la Universidad Católica de Lovaina, Bélgica por el valioso apoyo profesional brindado.

A los miembros del Departamento de Metalurgia Extractiva por la dedicación y apoyo a este trabajo.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] García J, Morató J, Bayona J. *Depuración con sistemas naturales: Humedales construidos*, Barcelona (España), Universidad Politécnica de Cataluña, 2005.
- [2] Mejía R. *Diseño, restauración y rehabilitación de cauces con materiales naturales*, Tesis especialización. México DF (México): Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1997.
- [3] De la Torre E y Díaz X. *Manual de auditoría ambiental para las actividades de beneficio de minerales auríferos*. Quito (Ecuador): Corporación Oikos, 2000, Cap. 1, 2.
- [4] Calderos F. *Hidroponía: cultivo sin suelo* Barcelona (España): Umro, 2001, Cap 1-5.
- [5] Castañeda F. *Manual de cultivos hidropónicos populares*. Panamá (Panamá): Incap, 2001, Cap. 1-4.
- [6] Howard M. *Cultivos hidropónicos*. Bogotá (Colombia): Mundi Prensa, 1999, Cap. 1-4
- [7] Villegas A. *Aplicación de la rizofiltración al tratamiento de efluentes*, Tesis Ingeniería, Quito (Ecuador): Escuela Politécnica Nacional, 2007.

- [8] Lara J. *Depuración de aguas superficiales con humedales artificiales*. Tesis Barcelona (España): Universidad Politécnica de Cataluña, 2000.
- [9] González G. *Métodos estadísticos y principios de diseño experimental*. Quito (Ecuador): Universidad Central del Ecuador, 2003, Cap. 1-3.