

## BIOABSORCIÓN DE Pb (II) Y Cr (III) USANDO LA PLANTA ACUÁTICA *Pistia stratioides*

MARELIS MEZA PÉREZ, JULIO CÉSAR MARÍN\*, ELISABETH BEHLING QUINTERO, GILBERTO COLINA ANDRADE, NANCY RINCÓN LIZARDO, CRISTIAN ARTURO POLO

Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (DISA), Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, La Universidad del Zulia, Apartado postal 526, Maracaibo 4001-A, Estado Zulia, Venezuela.  
Telefax: +58(0)261-4128743. \*E-mail: jmarin@fing.luz.edu.ve

Recibido: noviembre 2012

Recibido en forma final revisado: junio 2013

### RESUMEN

Los efluentes industriales, particularmente en la explotación minera y petrolera, contienen una diversidad de sustancias que pueden ocasionar un impacto al ambiente, entre estos contaminantes se encuentran los metales. En el presente estudio se evaluó la capacidad de la planta acuática *P. stratioides* para bioabsorber Pb (II) y Cr (III), a escala de laboratorio. Para ello, se diseñaron microcosmos a flujo semi-continuo, conformados por cubetas de vidrio (20 L de volumen total) y efluente sintético contaminado con Pb (II) (1 y 5 mg/L), Cr (III) (4 y 6 mg/L) y una mezcla de Pb (II) (5 mg/L) y Cr (III) (4 mg/L). Se tomaron muestras del efluente tratado cada 24 h para analizar pH, oxígeno disuelto, alcalinidad total, temperatura y la concentración de los metales. Los resultados muestran una disminución de las concentraciones de los metales en relación con el tiempo, la remoción total fue de 76,8 y 81,3% para Pb (II); 81,1 y 69,9% para Cr (III) en los ensayos individuales, respectivamente, y de 73,4% Pb (II) y 77,9% Cr (III) para la mezcla. La mayor absorción de los metales se obtuvo en los primeros días de ensayo, acumulándose principalmente en las raíces de la planta. Se concluyó que *P. stratioides* es una alternativa viable en sistemas biológicos tipo humedales, para el tratamiento de efluentes contaminados con metales.

*Palabras clave:* Bioabsorción, Efluentes industriales, Fitorremediación, Metales pesados, *Pistia stratioides*.

### BIOABSORPTION OF Pb (II) AND Cr (III) USING THE AQUATIC PLANT *Pistia stratioides*

#### ABSTRACT

The industrial effluents, particularly in mining and oil industries, contain a variety of substances that can cause an impact to the environment. Metals are among these contaminants. In this work the ability of the aquatic plant *P. stratioides* for bioabsorber Pb (II) and Cr (III), at laboratory scale, was evaluated. To this end, microcosms at semi-continuous flow formed at glass basins (20 L of total volume) and synthetic effluent contaminated with Pb (II) (1 and 5 mg/L) Cr (III) (4 and 6 mg/L) and a mixture of Pb (II) (5 mg/L) and Cr (III) (4 mg/L), were prepared. Effluent samples were taken every 24 h to assess pH, dissolved oxygen, total alkalinity, temperature and concentration of metals. The results show a decrease in the concentrations of the metals as a function of time. The total removal was 76.8 and 81.3% for Pb (II); 81.1 and 69.9% for Cr (III) for the individual tests respectively, and 73.4% Pb (II) and 77.9% Cr (III) for the mixture. The greatest absorption of metals was obtained in the early days of test, mainly accumulated in the plant roots. *P. stratioides* is a viable alternative for treatment of metal-contaminated effluents, using wetland systems.

*Keywords:* Bioabsorption, Industrial effluents, Phytoremediation, Heavy metals, *Pistia stratioides*.

#### INTRODUCCIÓN

El desarrollo de actividades industriales ha contribuido cada vez más a la generación de residuos con elementos potencialmente tóxicos. Uno de los problemas más señalados mundialmente, es la progresiva degradación de los recursos naturales causada por la gran diversidad de

contaminantes tóxicos, resultantes de diversas actividades naturales y antropogénicas (Moreira *et al.* 2008).

El Lago de Maracaibo constituye un caso típico que atañe a esta problemática ambiental. Este recurso es fuertemente contaminado por la descarga de cantidades apreciables de desechos tóxicos provenientes de aguas residuales urbanas

e industriales. Numerosas empresas situadas en las riveras del Lago descargan sus efluentes sin tratamiento, a pesar de las exigencias contempladas en las normas venezolanas para su disposición en cuerpos de agua naturales (Decreto 883, 1995), pudiéndose provocar la bioacumulación de metales pesados y otras sustancias tóxicas a diferentes niveles de las cadenas tróficas, debido a las constantes descargas.

Para hacer frente a esta problemática, se han desarrollado diferentes tecnologías de tratamiento biológico para dichos efluentes líquidos, las cuales buscan minimizar el impacto causado por la inadecuada disposición de los residuos. En tal sentido, la fitorremediación se ha constituido en una opción factible respecto a otros tratamientos, por ser un proceso limpio, económico y de fácil operación; en el que se emplean plantas acuáticas que poseen gran capacidad de absorber, eliminar o neutralizar compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en aguas contaminadas (Acosta *et al.* 2007). Sin embargo, la información sobre la eficiencia de la planta acuática *P. stratioides* (lechuga de agua) en la bioabsorción de metales pesados es limitada, particularmente en nuestro país.

En el presente estudio se evaluó la eficiencia de la planta acuática flotante *P. stratioides* en la bioabsorción de los metales pesados Pb (II) y Cr (III), como una posible alternativa de fitorremediación para efluentes industriales contaminados con metales.

## TÉCNICAS EXPERIMENTALES

### OBTENCIÓN Y ACLIMATACIÓN DE LAS PLANTAS ACUÁTICAS

Los individuos de *P. stratioides* se colectaron de lagunas artificiales de haciendas ubicadas en el estado Zulia (Venezuela), específicamente al oeste del municipio San Francisco, cerca del kilómetro 13 vía a Perijá. La identificación y selección de las plantas se estableció principalmente por su aspecto, similitud de tamaño, peso y longitud de raíces, de acuerdo con las recomendaciones de Mufarrege *et al.* (2010).

Las plantas se lavaron inicialmente con agua potable para eliminar cualquier residuo contaminante que pudiera interferir con el estudio (Torres *et al.* 2007). Para su aclimatación, se colocaron en un recipiente plástico con 40 L de agua potable enriquecida con fertilizante comercial (Nitrofoska® Foliar 0,5 mL/L), dispuesto a la intemperie para favorecer la incidencia de luz solar. El tiempo de aclimatación fue aproximadamente 30 d.

## EFLUENTE SINTÉTICO

El efluente sintético para cada uno de los ensayos se preparó con agua desionizada en la que se disolvió el metal en estudio, a la concentración requerida, y el fertilizante comercial, con lo que se garantizó la nutrición de la planta durante la experimentación. Se realizaron cinco ensayos: i) Pb (II) 1 mg/L, ii) Pb (II) 5 mg/L, iii) Cr (III) 4 mg/L, iv) Cr (III) 6 mg/L y v) Mezcla Pb (II) 5 mg/L y Cr (III) 4 mg/L; este último para conocer el efecto sinérgico o antagónico de dicha condición. Las concentraciones fueron seleccionadas considerando los valores máximos permisibles para descarga de efluentes a cuerpos de aguas naturales, contemplados en la normativa venezolana (Pb 0,5 mg/L y Cr 2 mg/L: Decreto 883, 1995), y los niveles reportados en la literatura para diferentes tipos de aguas (Higuera *et al.* 2005, Lima *et al.* 2005). Las soluciones se prepararon a partir de las sales  $Pb(NO_3)_2$  y  $Cr(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$  de grado analítico (MERCK). En cada ensayo se usaron sistemas control (sin plantas).

## CONFORMACIÓN Y OPERACIÓN DE LOS MICROCOSMOS

Para los microcosmos se utilizaron cubetas de vidrio (800 cm<sup>2</sup> área superficial, 20 L de volumen total, 40 cm de largo, 20 cm de ancho y 25 cm de alto) provistas de 10 plantas de *P. stratioides* y un volumen de efluente sintético de 10 L (Figura 1). Cada ensayo se realizó por triplicado, obteniéndose 15 microcosmos experimentales y 15 como control. Una vez conformados los sistemas, cada 24 h se procedió a coleccionar 25 mL de efluente tratado durante 15 d, para realizar los análisis de laboratorio correspondientes. La cantidad de efluente retirado era reemplazado con efluente sintético fresco diariamente. La pérdida de agua por evaporación era restituida con agua desionizada antes de realizar la toma de muestras (Paris & Hadad, 2005). Los microcosmos fueron dispuestos sobre una superficie plana a la intemperie durante el periodo de ensayo, protegidos de la lluvia. La temperatura ambiente promedio fue de  $31,2 \pm 1,5^\circ C$ .

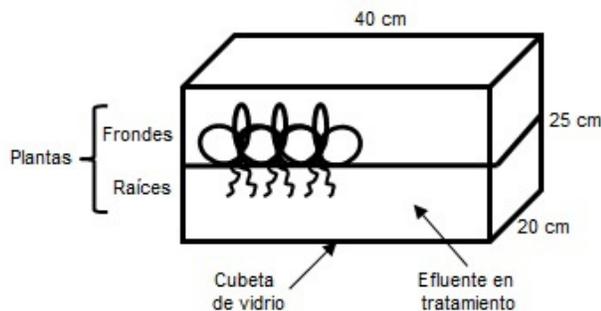


Figura 1. Esquema de la conformación de los microcosmos provistos de *P. stratioides*

## DESTINO DE LOS METALES EN LA PLANTA

Posterior a cada ensayo, muestras de raíces y frondes de las plantas fueron conservadas para determinar la concentración de los metales estudiados, y así establecer en cuál estructura se acumulaban preferencialmente dichos contaminantes. Muestras iniciales de raíces y frondes también fueron colectadas para determinar la concentración de los metales.

## ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS

El análisis de los metales en las muestras de efluente y de plantas (raíces y frondes) se realizó usando la técnica de espectrometría de absorción atómica con llama u horno de grafito (equipo PERKIN ELMER modelo 31000) (APHA, 1998). Previamente, las muestras de raíces y frondes fueron liofilizadas (48 h) y pulverizadas en un mortero para luego ser digeridas en bombas tipo Parr con HNO<sub>3</sub> grado analítico (MERCK) (Naranjo & Troncoso, 2008), a una temperatura de 105°C durante 4 h. Adicionalmente, se monitorearon las variaciones de los siguientes parámetros fisicoquímicos durante los ensayos: pH, oxígeno disuelto (OD), alcalinidad total y temperatura, empleando los procedimientos establecidos en el método estándar (APHA, 1998). Se realizó un análisis de varianza (ANOVA al 95%) de dos vías para cada ensayo experimental, con la finalidad de establecer la influencia de la concentración del metal y del tiempo de exposición sobre el proceso de bioabsorción. Un estudio de correlación entre las diferentes variables analizadas permitió determinar su efecto durante la remoción simultánea de Pb (II) y Cr (III). Se aplicó el paquete estadístico SPSS 10.0 para Windows.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### BIOABSORCIÓN DE Pb (II)

#### EFLUENTE SINTÉTICO DE Pb (II) A 1 mg/L

Inicialmente, se determinaron los parámetros fisicoquímicos para evaluar las condiciones dentro de los microcosmos, ya que los mismos son determinantes en la eficiencia de los sistemas de tratamiento biológico (Coleman *et al.* 2001). Para el tratamiento de Pb (II) a 1 mg/L, los valores medios de estos parámetros fueron: pH 6,22±1,30 unidades, alcalinidad total 59,70±10,52 mgCaCO<sub>3</sub>/L, OD 10,08±2,53 mgO<sub>2</sub>/L, temperatura 30,04±1,58°C. En el control se obtuvo un valor medio de pH de 7,62 ± 0,94 unidades, de alcalinidad total 65,93±9,93 mgCaCO<sub>3</sub>/L, de OD 10,73±1,70 mgO<sub>2</sub>/L y de temperatura 30,02±1,60°C (Figura 2). La sobresaturación de oxígeno pudiera estar relacionada con su alta producción en el entorno de las plantas.

A partir del ANOVA, se encontraron diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) para el pH, alcalinidad total, OD y temperatura entre ambos tratamientos. Comparando los valores medios de pH, el tratamiento con plantas mostró un nivel relativamente inferior al obtenido en el control, este resultado puede estar relacionado con la producción de ácidos orgánicos provenientes del ciclo de crecimiento, muerte y mineralización de la materia orgánica (Coleman *et al.* 2001). De igual manera, la concentración de alcalinidad total obtenida en el tratamiento con plantas fue inferior a la del control; parámetro estrechamente relacionado con el pH, debido al comportamiento de los iones alcalinos.

Los parámetros monitoreados mostraron pocas variaciones durante las experimentaciones, y las mismas estuvieron en función de la actividad biológica desarrollada en los microcosmos (plantas de *P. stratioides* y microalgas desarrolladas dentro de los sistemas control) (Figura 2).

#### EFLUENTE SINTÉTICO DE Pb (II) A 5 mg/L

En el tratamiento de Pb (II) a 5 mg/L los valores medios de los parámetros fisicoquímicos fueron: pH 6,01±0,82 unidades, alcalinidad total 39,11±14,88 mgCaCO<sub>3</sub>/L, OD 7,38±1,25 mgO<sub>2</sub>/L y temperatura 29,08±0,58°C. Por su parte, para el control se obtuvo un valor medio de pH de 7,22±0,91 unidades, alcalinidad total 37,33±4,91 mgCaCO<sub>3</sub>/L, OD 10,07±2,24 y temperatura de 29,06±0,65°C (Figura 2). El ANOVA mostró diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) para el pH, OD y temperatura, entre ambos sistemas. Los valores de pH en este tratamiento fueron inferiores al obtenido en el control; que como se comentó anteriormente, pudo resultar de la producción de ácidos orgánicos. Este mismo comportamiento se observó en la concentración de OD; resultante posiblemente del aumento de la demanda de oxígeno disuelto por parte de los microorganismos presentes en el microcosmo, para la biodegradación aeróbica de la materia orgánica (Chen *et al.* 2008, Maine *et al.* 2001). Las curvas de los parámetros fisicoquímicos experimentaron ligeras variaciones a lo largo del estudio, como resultado de la presencia de la planta acuática (microcosmos tratamiento) y de la proliferación de microalgas (microcosmos control) (Figura 2).

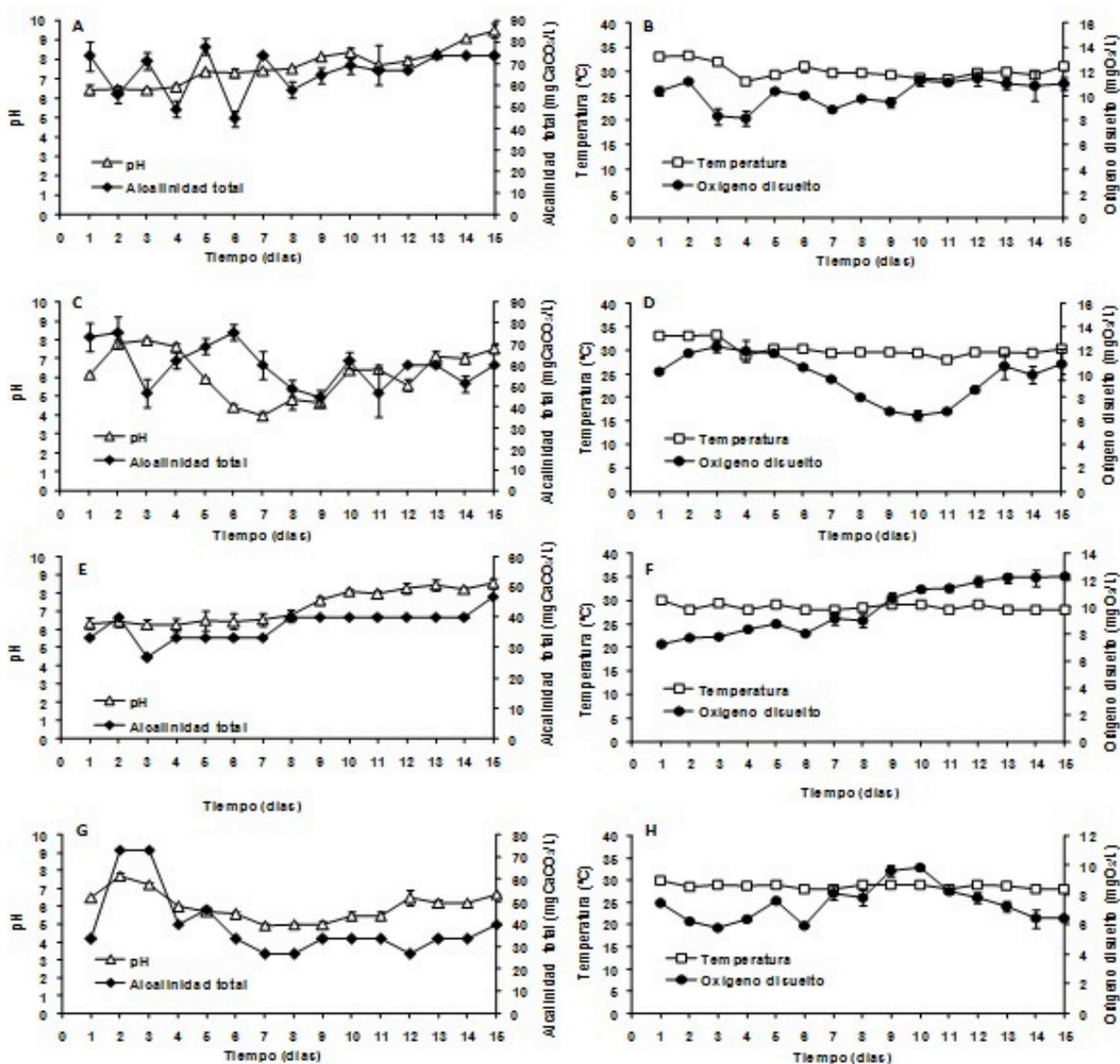
#### REMOCIÓN DE Pb (II) EN EFLUENTE SINTÉTICO DE 1 Y 5 mg/L

En la Figura 3 se describe el comportamiento de las concentraciones de Pb (II) durante el tratamiento con *P. stratioides*. Para la concentración inicial de 1 mgPb(II)/L se obtuvo un porcentaje de remoción de 76,8% (Figura 3A), mientras que para 5 mgPb(II)/L fue de 81,3% (Figura 3B).

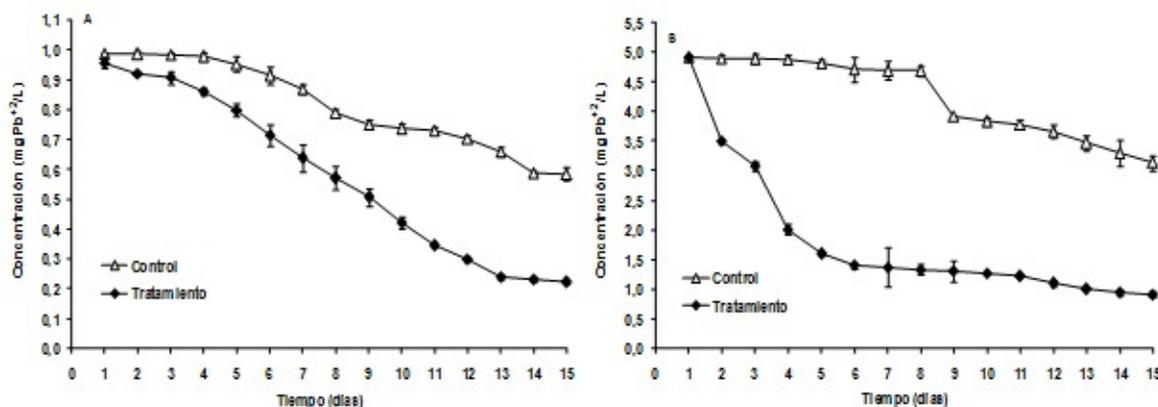
La planta mostró una alta capacidad de remoción de Pb (II) durante los primeros días, con una reducción más marcada para la concentración de 5 mgPb(II)/L. Para 1 mgPb(II)/L, la mayor remoción se observó el día 13 de experimentación (74,8%), para una concentración de 0,24±0,01 mgPb(II)/L. En cuanto al efluente con 5 mgPb(II)/L, la mayor remoción observada fue en el día 15 (81,3%), para una concentración final de 0,92±0,02 mgPb(II)/L. Considerando que el límite permisible contemplado en la norma venezolana para la descarga a cuerpos de aguas naturales es de 0,5 mgPb/L (Decreto 883, 1995), sólo pudo ser alcanzado en el tratamiento cuya concentración inicial fue de 1 mgPb(II)/L, debido posiblemente a la capacidad de la planta para asimilar concentraciones mayores del contaminante.

La remoción de Pb (II) observada en los microcosmos control pudo estar relacionada con la absorción por parte de las microalgas desarrolladas en las paredes de las cubetas de vidrio (Peña *et al.* 2004) y/o a la precipitación del metal en forma de hidróxidos (Paris & Hadad, 2005).

Estos resultados se corresponden con los reportados por Espinoza *et al.* (2009), quienes determinaron que la planta acuática *P. stratioides* puede lograr altas remociones de Pb durante las primeras 24 h de tratamiento.



**Figura 2.** Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos en los microcosmos provistos de *P. stratioides*. (A), (C), (E) y (G) pH y alcalinidad total, (B), (D), (F) y (H) temperatura y oxígeno disuelto. (A) y (B) control, (C) y (D) tratamiento 1 mgPb(II)/L, (E) y (F) control, (G) y (H) tratamiento 5 mgPb(II)/L. Las líneas verticales indican la media aritmética ± desviación estándar para n=3



**Figura 3.** Variación de las concentraciones de Pb (II) 1 mg/L (A) y Pb (II) 5 mg/L (B) en función del tiempo, a partir de microcosmos provistos de *P. stratioides* (tratamiento) y en ausencia de plantas (control). Las líneas verticales indican la media aritmética  $\pm$  desviación estándar para  $n=3$

Estos resultados se corresponden con los reportados por Espinoza *et al.* (2009), quienes determinaron que la planta acuática *P. stratioides* puede lograr altas remociones de Pb durante las primeras 24 h de tratamiento.

### BIOABSORCIÓN DE Cr (III)

#### EFLUENTE SINTÉTICO DE Cr (III) A 4 mg/L

Para el tratamiento de Cr (III) a 4 mg/L, los valores medios de los parámetros fisicoquímicos fueron: pH  $6,77 \pm 0,70$  unidades, alcalinidad total  $50,33 \pm 14,62$  mgCaCO<sub>3</sub>/L, OD  $10,12 \pm 2,71$  mgO<sub>2</sub>/L y temperatura  $28,05 \pm 0,96$ °C. En el control se obtuvieron valores medios de: pH  $6,77 \pm 1,04$  unidades, alcalinidad total  $29,76 \pm 6,06$  mgCaCO<sub>3</sub>/L, OD  $9,74 \pm 1,59$  mgO<sub>2</sub>/L y temperatura  $28,04 \pm 1,02$ °C (Figura 4). Se encontraron diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) para el pH, alcalinidad total, OD y temperatura, entre ambos grupos de microcosmos (ANOVA). Los valores medios de pH, alcalinidad total y OD del control fueron ligeramente menores al compararse con los del tratamiento, como resultado de la actividad biológica dentro de los mismos, como ya se ha comentado.

#### EFLUENTE SINTÉTICO DE Cr (III) A 6 mg/L

En este tratamiento los valores medios de los parámetros fisicoquímicos fueron: pH  $5,79 \pm 0,76$  unidades, alcalinidad total  $38,03 \pm 10,97$  mgCaCO<sub>3</sub>/L, OD  $9,19 \pm 0,94$  mgO<sub>2</sub>/L y temperatura  $29,04 \pm 0,77$ °C, mientras que en el control fueron de: pH de  $6,62 \pm 0,94$  unidades, alcalinidad total  $37,11 \pm 6,02$  mgCaCO<sub>3</sub>/L, OD  $9,57 \pm 1,47$  mgO<sub>2</sub>/L y temperatura  $28,03 \pm 0,76$ °C (Figura 4). El análisis estadístico (ANOVA), mostró diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) para el pH, alcalinidad total y OD. Para la concentración inicial de 6 mgCr(III)/L, al igual que para 4 mgCr(III)/L, se observó un ligero incremento de los parámetros fisicoquímicos

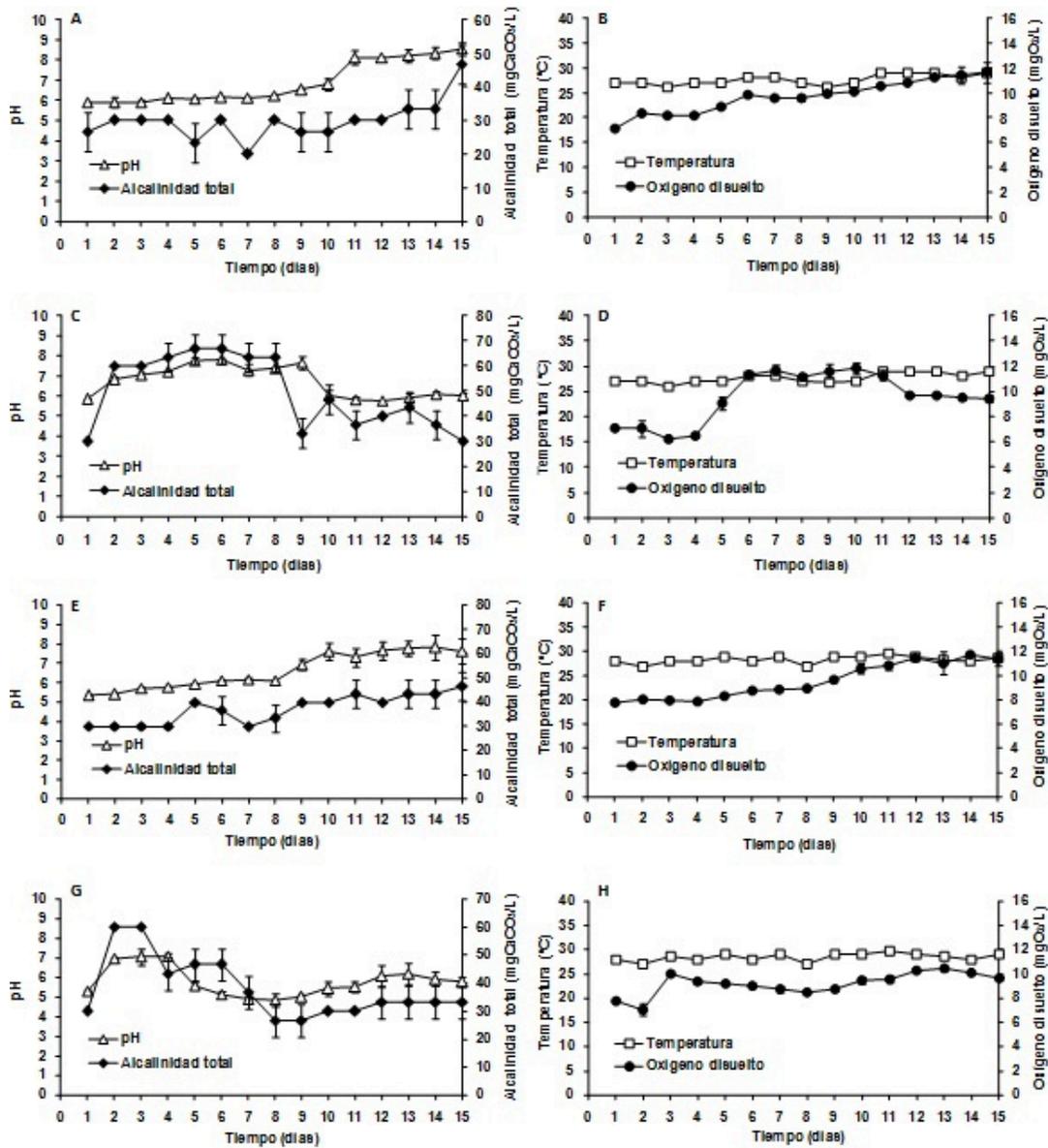
monitoreados en función del tiempo, particularmente del pH, alcalinidad total y OD (Figura 4). Por su parte, *P. stratioides* mostró tolerancia a los cambios en estos parámetros, no evidenciado síntomas de afectación durante los ensayos (aparición de la planta).

#### REMOCIÓN DE Cr (III) EN EFLUENTE SINTÉTICO DE 4 Y 6 mg/L

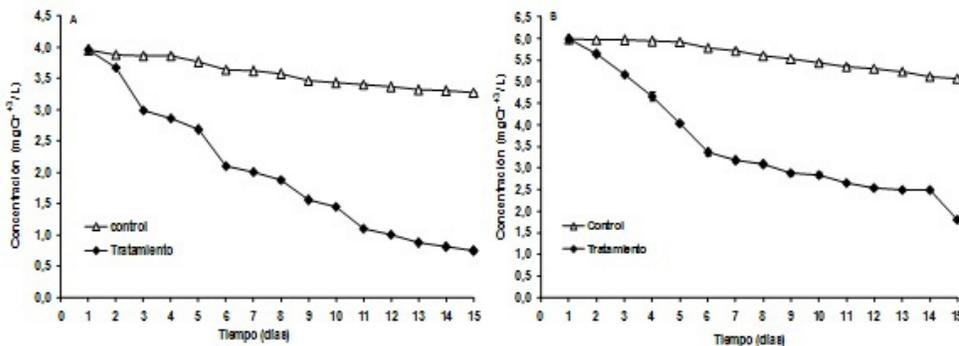
Los resultados del proceso de bioabsorción de Cr (III) se muestran en la Figura 5, evidenciándose una reducción de las concentraciones en función del tiempo. En el microcosmo 4 mgCr(III)/L (Figura 5A), se obtuvo un porcentaje de remoción de 81,1%, para una concentración final de  $0,75 \pm 0,02$  mgCr(III)/L; valor inferior al establecido por la normativa venezolana para descargas (2 mgCr/L). Por otra parte, para 6 mgCr(III)/L (Figura 5B) se observó un 69,9% de remoción total, con absorción acelerada hasta el día 6. La concentración final para este tratamiento fue de  $1,80 \pm 0,04$  mgCr(III)/L a los 15 días, la cual también se encuentra por debajo del límite permisible de la legislación correspondiente (Decreto 883, 1995). La ligera remoción de Cr (III) obtenida en los microcosmos control, puede resultar de la proliferación microalgal o de la precipitación del metal en forma de hidróxidos (Higuera *et al.* 2005).

#### BIOABSORCIÓN DE Pb (II) 5 mg/L Y Cr (III) 4 mg/L

Los valores medios de los parámetros fisicoquímicos en estos microcosmos fueron para el tratamiento, de: pH  $6,58 \pm 0,65$  unidades, alcalinidad total  $72,50 \pm 14,42$  mgCaCO<sub>3</sub>/L, OD  $7,04 \pm 1,64$  mgO<sub>2</sub>/L y temperatura  $28,08 \pm 0,75$ °C, y para el control, de: pH  $5,75 \pm 0,54$  unidades, alcalinidad total  $27,69 \pm 6,04$  mgCaCO<sub>3</sub>/L, OD  $7,98 \pm 0,20$  mgO<sub>2</sub>/L y temperatura  $28,07 \pm 0,71$ °C. El ANOVA mostró diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) para el pH, alcalinidad total y OD.



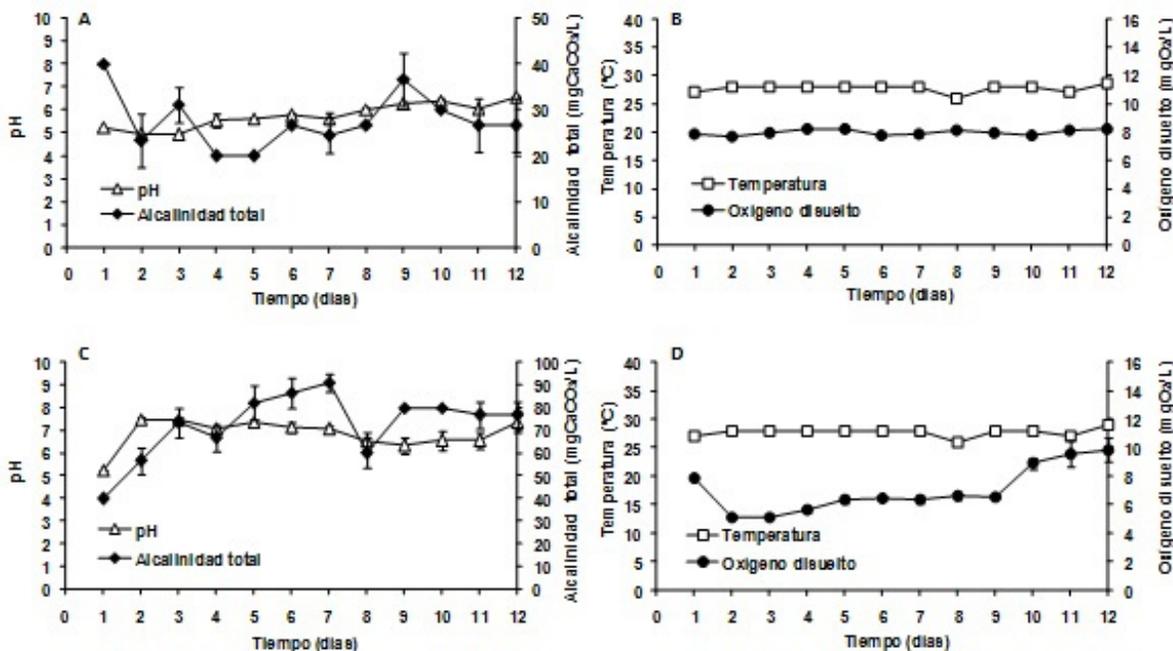
**Figura 4.** Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos en los microcosmos provistos de *P. stratioides*. (A), (C), (E) y (G) pH y alcalinidad total, (B), (D), (F) y (H) temperatura y oxígeno disuelto. (A) y (B) control, (C) y (D) tratamiento 4 mgCr(III)/L, (E) y (F) control, (G) y (H) tratamiento 6 mgCr(III)/L. Las líneas verticales indican la media aritmética  $\pm$  desviación estándar para  $n=3$



**Figura 5.** Variación de las concentraciones de Cr (III) 4 mg/L (A) y Cr (III) 6 mg/L (B) en función del tiempo, a partir de microcosmos provistos de *P. stratioides* (tratamiento) y en ausencia de plantas (control). Las líneas verticales indican la media aritmética  $\pm$  desviación estándar para  $n=3$

En la Figura 6 se muestran las tendencias de las curvas correspondientes a los parámetros fisicoquímicos evaluados. En general se observaron algunas fluctuaciones en el tiempo, particularmente del pH y la alcalinidad total. Durante estos ensayos se observaron ciertos síntomas de toxicidad en las plantas (leve reducción del crecimiento, fraccionamiento en las raíces y despigmentación en frondes),

posiblemente como resultado de las concentraciones de los metales, como ha sido reportado en otros estudios (Maine *et al.* 2001). Por ello, el tiempo de análisis para este tratamiento sólo se pudo extender hasta los 12 d, con el fin de garantizar la eficiencia de fitorremediación de la planta acuática *P. stratioides*.

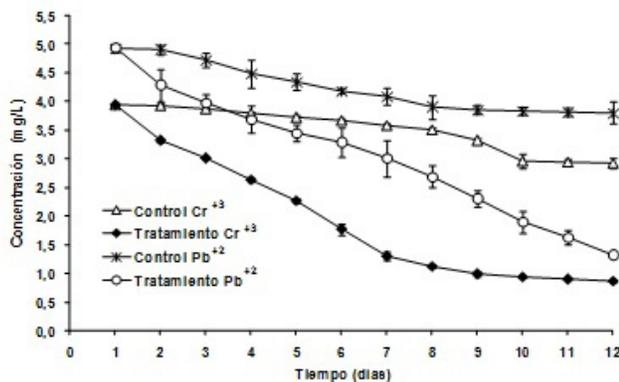


**Figura 6.** Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos en los microcosmos provistos de *P. stratioides*. (A) y (C) pH y alcalinidad total, (B) y (D) temperatura y oxígeno disuelto. (A) y (B) control, (C) y (D) tratamiento mezcla 5 mgPb(II)/L y 4 mgCr(III)/L. Las líneas verticales indican la media aritmética  $\pm$  desviación estándar para  $n=3$

### REMOCIÓN SIMULTÁNEA DE Pb (II) Y Cr (III)

La Figura 7 muestra las variaciones en las concentraciones de Pb (II) y Cr (III) durante los ensayos de laboratorio. Para la concentración inicial de 5 mgPb(II)/L, se obtuvo un porcentaje de remoción de 73,4%, con una reducción continua de las concentraciones en el tiempo, para un valor final de 1,32 mgPb(II)/L. En cuanto al Cr (III), la

concentración inicial de 4 mgCr(III)/L, se redujo a 0,87 mgCr(III)/L al cabo de los 12 días, para un porcentaje de remoción de 77,9%. La mayor remoción de Cr (III) se realizó durante los primeros 7 días. Para este ensayo, sólo la concentración final de Cr (III) logró cumplir con las exigencias de la norma venezolana, en cuanto a descarga a cuerpos de agua naturales (Decreto 883, 1995).



**Figura 7.** Variación de las concentraciones de Pb (II) (5 mg/L) y Cr (III) (4 mg/L) en función del tiempo, a partir de microcosmos provistos de *P. stratioides* (tratamiento) y en ausencia de plantas (control). Las líneas verticales indican la media aritmética  $\pm$  desviación estándar para  $n=3$

El porcentaje de remoción de los metales en la mezcla fue menor que el obtenido cuando se utilizaron los metales de manera individual, a excepción del ensayo a 6 mgCr(III)/L, lo cual indica que se originó más bien un efecto antagónico en esta condición, posiblemente debido al efecto tóxico que genera en la planta.

Para los microcosmos alimentados con la mezcla 4 mgCr(III)/L y 5 mgPb(II)/L, se obtuvo una correlación directa significativa para las concentraciones de Cr (III) y Pb (II) ( $r=0,946$ ;  $p<0,05$ ), lo que pudiera indicar que la planta no hace distinción en la absorción de estos metales, por lo que los absorbe de igual manera (ambos disminuyen proporcionalmente). Sin embargo, este fenómeno depende de las características propias de cada metal. Se ha planteado que metales pesados como el Pb y el Zn, pueden trasladarse en las plantas vasculares con mayor facilidad que otros metales como el Cr y el Ni, que parecen ser relativamente inmóviles, además, este comportamiento se relaciona con el tiempo y los niveles de exposición (Lima *et al.* 2005).

## DESTINO DE LOS METALES Pb (II) Y Cr (III) EN LA PLANTA ACUÁTICA *P. stratioides*

Las concentraciones de los metales en la muestra de *P. stratioides* antes de aplicar los tratamientos estuvieron por debajo de los límites de detección (LD) del método de espectrometría de absorción atómica (LD: 37,51 mgPb/Kg y 40,95 mgCr/Kg). Por su parte, al analizar el contenido de los metales en la planta (raíces y frondes) al final de cada tratamiento, se determinó que la mayor bioacumulación de Pb (II) y Cr (III) se observó en las raíces (Tabla 1). Dicha acumulación es proporcional a la concentración inicial del metal, debido a que existe una mayor disponibilidad en el medio (Chantiratikul *et al.* 2008).

Numerosos trabajos sobre fitorremediación con macrófitas acuáticas, han mostrado una mayor acumulación de los metales en las raíces de las plantas, tales como: *P. stratioides*, *Salvinia herzogii*, *Eichornia crassipes*, entre otras (Maine *et al.* 2001, Lima *et al.* 2005).

**Tabla 1.** Bioacumulación de metales en raíces y frondes de la planta acuática *P. stratioides* durante la fitorremediación de soluciones de Pb (II) 1 y 5 mg/L, Cr (III) 4 y 6 mg/L y la mezcla de Pb (II) 5 mg/L y Cr (III) 4 mg/L

Microcosmo	Raíces (mg/Kg) X±DS	Frondes (mg/Kg) X±DS
Pb Muestra inicial	< 37,51*	< 37,51*
1 mgPb(II)/L	92,44±1,77	37,17±1,31
5 mgPb(II)/L	463,24±17,51	138,59±5,53
Cr Muestra inicial	< 40,95*	< 40,95*
4 mgCr(III)/L	377,18±5,44	86,70±1,70
6 mgCr(III)/L	555,27±21,95	106,37±2,06
Mezcla		
5 mgPb(II)/L	436,21±5,44	90,01±6,16
4 mgCr(III)/L	333,22±5,73	61,26±4,29

\*Límite de detección del método de absorción atómica, n=12; X= media aritmética;  
DS= desviación estándar

## CONCLUSIONES

En el presente estudio se comprobó la eficiencia de la planta acuática *P. stratioides* para la remoción de los metales pesados Pb (II) y Cr (III), en efluentes sintéticos a diferentes concentraciones, obteniéndose porcentajes de remoción superiores al 70%, cuando los metales se encontraban de forma individual en el efluente. Los mayores porcentajes de remoción se presentaron para la concentración de 5 mgPb(II)/L (81,3%).

Se observó un efecto antagónico de la mezcla de metales

sobre *P. stratioides*, ya que los porcentajes de remoción fueron mayores cuando los mismos se encontraban de forma individual en el efluente no tratado.

En todos los casos, la concentración final de Cr (III) en el efluente, estuvo por debajo del límite máximo permisible establecido por la normativa venezolana para la descarga a cuerpos de agua naturales (2 mgCr/L). En cuanto a los valores de Pb (II), sólo se logró cumplir con lo establecido por esta legislación (0,5 mgPb/L), cuando se aplicó la concentración inicial de 1 mgPb (II)/L.

La mayor bioacumulación de los metales Pb (II) y Cr (III) se observó en las raíces de la planta acuática, cuya concentración final fue directamente proporcional a la concentración inicial establecida.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado parcialmente por el Ministerio del Poder Popular para Ciencia, Tecnología e Industrias Intermedias y el Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CONDES) de La Universidad del Zulia.

## REFERENCIAS

- ACOSTA, I., MOCTEZUMA, M., CÁRDENAS, J. F., GUTIÉRREZ, C. (2007). Bioadsorción de cadmio (II) en solución acuosa por biomasa fúngica. *Información Tecnológica* 18(1); pp. 9-14.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA), AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA), WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th Edition*, American Public Health Association 1015 Fifteenth street, N.W. Washington, D.C. USA.
- COLEMAN, J., HENCH, K., GARBUTT, K., SEXSTONE, A., BISSONNETTE, G., SKOUSEN, J. (2001). Treatment of domestic wastewater by three plant species in constructed wetland. *Water, Air and Soil Pollution* 128(3-4); pp. 283-295.
- CHANTIRATIKUL, A., ATIWETIN, P., CHANTIRATIKUL, P. (2008). Feasibility of producing selenium-enriched water lettuce (*Pistia stratiotes* L.). *J. Biol. Sci.* 8(3); pp. 644-648.
- CHEN, S., KAO, C., JOU, C., FU, Y., CHANG, Y. (2008). Use of a constructed wetland for post-treatment of swine wastewater. *Environ. Eng. Sci.* 25(3); pp. 407-417.
- DECRETO 883. (1995). Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos. *Gaceta Oficial de la República de Venezuela* 5.021 (Extraordinaria).
- ESPINOZA, F., MÓDENES, A., COSTA, I., PALÁCIO, S., SZYMANSKI, N. (2009). Kinetics of lead bioaccumulation from a hydroponic medium by aquatic macrophytes *Pistia stratiotes*. *Water, Air and Soil Pollution* 203(1-4); pp. 29-37.
- HIGUERA, O. F., ESCALANTE, H., LAVERDE, D. (2005). Reducción del cromo contenido en efluentes líquidos de la industria del cuero, mediante un proceso adsorción-desorción con algas marinas. *Scientia et Technica* Año XI 29; pp. 115-120.
- LIMA, L., OLIVARES, S., COLUMBIE, I., MEDEROS, D. (2005). Niveles de plomo, zinc, cadmio y cobre en el río Almendares ciudad Habana, Cuba. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 21(3); pp. 112-124.
- MAINE, M., DUARTE, M., SUNE, N. (2001). Cadmium uptake by floating macrophytes. *Wat. Res.* 35(11); pp. 2629-2634.
- MOREIRA, A., DUARTE, M., NANDENHA, J., MACEDO, G. (2008). Estudio del mecanismo de remoción de hierro y cobre presentes en aceites lubricantes usados mediante bioadsorción. *Información Tecnológica* 19(1); pp. 57-68.
- MUFARREGE, M., HADAD, H., MAINE, M. (2010). Response of *Pistia stratiotes* to heavy metals (Cr, Ni, and Zn) and phosphorous. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 58; pp. 53-61.
- NARANJO, Y. & TRONCOSO, O. W. (2008). Contenidos de cadmio, cobre, zinc y plomo en órganos de *Rhizophora mangle* de la ciénaga grande de Santa Marta, Caribe colombiano. *Bol. Invest. Mar. Cost.* 37(2); pp. 107-129.
- PARIS, C. & HADAD, H. (2005). Eficiencia de dos macrófitas flotantes libres en la absorción de metales pesados. *Limnetica* 24(3-4); pp. 237-244.
- PEÑA, J. M., MARTÍNEZ, F., ESPARZA, F., CAÑIZARES, R. O. (2004). Heavy metals removal by the microalga *Scenedesmus incrassatulus* in continuous cultures. *Bioresour. Technol.* 94; pp. 219-222.
- TORRES, G., NAVARRO, A., LANGUASCO, J., CAMPOS, K., CUIZANO, N. (2007). Estudio preliminar de la fitorremediación de cobre divalente mediante *Pistia stratioides* (lechuga de agua). *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 3(1); pp. 13-20.