

Fitorremediación de cromo en efluente de curtiembre empleando *Eichhornia crassipes***Phytoremediation of chrome in tannery effluents using *Eichhornia crassipes***Leonida Medina García^{1,*}, Francisco Paulo Ferreira¹, Hajime Guillermo Kurita Oyamada³, Sergio Rodríguez Bonet^{1,2}, Edgar Fidel Galeano^{2,3} & Mariza R. Viera⁴¹Departamento de Química. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de Asunción. Campus Universitario. San Lorenzo- Paraguay. *Email: leonidamedina@gmail.com²Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología (INTN). Asunción Paraguay³Departamento de Biología. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de Asunción. Campus Universitario. San Lorenzo- Paraguay.⁴Universidad Nacional de la Plata. La Plata -Argentina

Resumen: El cromo es uno de los mayores contaminantes inorgánicos de las aguas y del suelo en el Paraguay, acarreamos serios problemas ambientales. Este metal proviene principalmente de efluentes de curtiembres que son vertidos a cursos de aguas. El objetivo de este trabajo es emplear técnicas de remediación alternativas para el tratamiento de aguas con alto contenido de cromo, utilizando medios naturales (plantas), en un proceso denominado fitorremediación. Ejemplares de *Eichhornia crassipes* fueron sometidos a una contaminación controlada con Cr³⁺ durante 20 días y se consideró la máxima concentración tolerada durante todo el periodo del experimento para estudiar la tasa y la capacidad de absorción del Cr³⁺ de la especie. Las constantes cinéticas de este proceso fueron: constante de absorción $K_{ab} = 0,10 \text{ días}^{-1}$, y tiempo medio de absorción: $t_{1/2} = 6,8 \text{ días}$. En el efluente final de curtiembre, con 22,4 mg.L⁻¹ de Cr³⁺, a las 48 horas se produjo una absorción casi completa del cromo suministrado, quedando en el efluente 1,28 mg.L⁻¹ del cromo. Los factores de translocación del cromo para *E. crassipes* fueron 0,008 y 0,02 en agua de pozo y efluente respectivamente y los factores de bioacumulación 11,6 y 3,2 respectivamente. No se encontraron diferencias significativas entre el contenido de clorofila en los vegetales expuestas en solución de cromo en comparación con el control. Tampoco se encontró oxidación del Cr³⁺ a Cr⁶⁺ medidos espectrofotométricamente.

Palabras clave: fitorremediación, cromo, efluente de curtiembre, *Eichhornia crassipes*.

Abstract: Chromium is one of the largest inorganic pollutants in water and soil in Paraguay, causing serious environmental problems. This metal comes mainly from tannery effluents that are dumped into water courses. The aim of this work was to use alternative remediation techniques for the treatment of waters with high chromium content, using natural media (plants), in a process called phytoremediation. Specimens of *Eichhornia crassipes* were subjected to controlled contamination with Cr³⁺ for 20 days and the maximum tolerated concentration during the whole period of the experiment was considered to study the cup and the absorption capacity of Cr³⁺ from the species. The kinetic constants of this process were: constant absorption: $K_{ab} = 0.10 \text{ days}^{-1}$, and absorption half time: $t_{1/2} = 6.8 \text{ dys}$. In the final tannery effluent with 22.4 mg.L⁻¹ of Cr³⁺, at 48 hours there was almost complete absorption of the chromium supplied, leaving 1.28 mg.L⁻¹ of chromium in the effluent. The chromium translocation factors for *E. crassipes* were 0.008 and 0.02 in well water and effluent respectively and bioaccumulation factors were 11.6 and 3.2 respectively. No significant differences were found between the chlorophyll content in the plants exposed in chromium solution compared to the control. Neither was oxidation found from Cr³⁺ to Cr⁶⁺ spectrophotometrically measured.

Keywords: Phytoremediation, chrome tannery effluent, *Eichhornia crassipes*.

INTRODUCCIÓN

El agua es considerada un importante bien y es caso en muchos países de todo el mundo. El nivel elevado de metales como, por ejemplo, cadmio, cromo y mercurio en las corrientes de agua, es una

importante preocupación ambiental y para la salud pública, reduce significativamente la calidad del agua, además de causar los efectos adversos sobre los humanos y animales acuáticos (Pandey, 2016). Existen diversas fuentes de estos metales en el agua,

Recibido: 10/10/2018 Aceptado: 25/04/2019



tanto de origen natural como antropogénicas. Con el continuo crecimiento de la población mundial y con ella el incremento de industrias, a fin de satisfacer las necesidades humanas, se generan residuos y utilizan recursos en detrimento de la calidad medioambiental.

De la necesidad de proteger y preservar el medio ambiente, se han desarrollados numerosas metodologías de tratamiento de las aguas residuales, para que los contaminantes no lleguen a los cursos hídricos.

En la actualidad, se desarrollan diversas biotecnologías de remediación de aguas entre ellas la fitorremediación que hace uso de los sistemas macrófitas de diversas formas, llamados también filtros verdes o biofiltros, con el fin reducir la concentración o peligrosidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos, de suelos, sedimentos, agua, y aire, a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a su sistema de raíz que conducen a la reducción, mineralización, degradación, volatilización y estabilización de los diversos tipos de contaminantes. Es una tecnología relativamente reciente y se percibe como una tecnología rentable, eficiente, novedosa, respetuosa con el medio ambiente e impulsada por energía solar con buena aceptación pública. La fitorremediación es un área de investigación activa actual. Se están explorando nuevos e hiperacumuladores de metal

eficientes para aplicaciones en fitoremediación y fitomejoramiento (Alí *et al*, 2013).

Las operaciones y procesos de las curtiembres, generan residuos líquidos y sólidos que se distinguen por su elevada carga orgánica y presencia de agentes químicos que pueden tener efectos tóxicos, como es el caso del sulfuro y el cromo. Las variaciones en cuanto al volumen de los residuos y la concentración de la carga contaminante se presentan de acuerdo a la materia prima procesada y a la tecnología empleada (Tancioni *et al*, 2000).

En nuestro país, la mayoría de las curtiembres utilizan sulfato de cromo (III) en la etapa del curtido, aunque se realizan tratamientos para disminuir la carga de compuestos tóxicos, la concentración de cromo en el agua residual en la salida final de alguna planta de tratamiento, es aún superior a la admitida por la legislación vigente. Art. 7 Res. 222/02 SEAM.

Los tratamientos de aguas residuales que involucran macrófitas flotantes, han demostrado ser eficientes en la remediación de aguas con alto contenido de nutrientes y sustancias tóxicas. Su importancia, radica en su aptitud para ser empleado en núcleos rurales, debido a su bajo consumo de energía convencional y la practicidad en el montaje y operación de los sistemas de tratamiento (Martelo & Lara Borrero, 2012).



Figura 1. Lugar de colecta de *E. Crassipes*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Toma de muestras de la especie vegetal

Los ejemplares de *E. crassipes* fueron colectados de su ambiente natural, el Río Paraguay, en la zona de la Ciudad de San Antonio (25°26'04,1" S 57°33'22,4" W), Departamento Central Figura 1. Las muestras colectadas se colocaron en envases con agua del río. Luego las plantas fueron transportadas hasta el invernadero doméstico construido para este fin, donde se retiraron las partes dañadas y restos de sustancias extrañas de las raíces y fueron lavadas con abundante agua de pozo, se colocaron en un recipiente de 1000 litros para su aclimatación y reproducción, como se muestra en la Figura 2.

El esquema de adaptación que se muestra en la Tabla 1, consistió en la sustitución parcial del agua del río por agua del pozo, en proporciones 50:50 durante una semana, hasta llegar al 100% de agua de pozo cuyos parámetros físico-químicos se determinaron de acuerdo a los requerimientos de la NP 24 001 80/2011 Agua Potable, empleando los métodos analíticos del "Standar Methods" para análisis de aguas y aguas residuales (APHA, AWWA, 2012). Además se determinó parámetros del agua de río extraído del lugar de la colecta de *Eichhornia crassipes*, empleando los mismos métodos analíticos.

Un ejemplar con flor, fue depositado en el Laboratorio de Análisis de Recursos Vegetales



Figura 2. Aclimatación de las plantas colectadas.

Tabla 1. Condiciones de adaptación.

Agua	T °C	pH (UpH)	CE (µS/cm)
Río	33,0	6,8	108,0
Pozo	29,0	5,3	184,3
Río : pozo(50:50)	31,0	6,1	126,6
Río: pozo (20:80)	30,0	5,5	149,9

del Departamento de Biología de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, para su identificación taxonómica.

Los nuevos estolones fueron separados en otros recipientes. Las plantas de *Eichhornia crassipes* empleadas en los ensayos, se seleccionaron en base al tamaño, peso húmedo y número de hojas.

Toma de muestra de efluente final de curtiembre

Las muestras de efluente final de curtiembre utilizadas fueron provistas por el consultor de la curtiembre PELT S.A. La misma está ubicada en la calle Buena Ventura y Paraguari, Barrio Santa Librada de la ciudad de Yaguarón, al noroeste del departamento de Paraguari, distante 48 km de la capital Asunción.

Se determinaron en el efluente los parámetros solicitados en el padrón de calidad de aguas en el territorio nacional resolución 222/02 artículo 7° de la SEAM El método analítico empleado fue según (APHA, AWWA, 2012).

Soluciones de cromo

Se preparó una solución madre de Cr³⁺ de 200 mg.L⁻¹, a partir de una sal comercial, sulfato básico de cromo Cr(OH)SO₄, sustancia muy utilizada para la etapa de curtición, mediante cálculo estequiométrico utilizando los datos de las especificaciones del certificado de calidad del producto.

Ensayo de tolerancia al cromo en solución acuosa de *E. crassipes*

Se prepararon ocho soluciones de diferentes concentraciones que detallan en la Tabla 2 y distribuidos en frascos nuevos de polipropileno de 700 mL

Tabla 2. Concentraciones de Cr³⁺ en las soluciones.

Soluciones	1	2	3	4	5	6	7	8
Concentraciones teóricas (mg.l ⁻¹)	2	5	10	15,0	20	50	100	200
Concentraciones reales (mg.l ⁻¹)	0,12	3,3	6,7	16,0	17,8	68,5	100,5	199,5

conteniendo 500 mL con 5 réplicas de cada concentración, en los cuales se expusieron la *Eichhornia crassipes* (una unidad en cada vaso) como se ilustra en la Figura 3.

Fueron seleccionadas de acuerdo al número de hojas (entre 3-4 unidades), largo del tallo (16,5±4,7 cm) y largo de la raíz (17,0±7,1 cm). De las 5 réplicas, 3 fueron seleccionados al azar para el monitoreo.

También se realizaron controles que consisten en las plantas expuestas solamente en agua de pozo (control negativo), las soluciones de cromo sin planta (control positivo) y controles de pH.

Ensayo de selección del método de extracción del cromo en las macrófitas

Como parte del trabajo se evaluaron dos metodologías de extracción del cromo captado por las



Figura 3. Ensayo de tolerancia. **a)** *Eichhornia crassipes* en solución de Cromo. **b)** Control positivo. **c)** Control negativo. **d)** Control de pH.

plantas: Vía seca, combustión seca (o calcinación) y Vía húmeda (digestión ácida).

Para ello se utilizó una solución estándar de cromo de 20 mg.L⁻¹ como referencia y las plantas expuestas a concentraciones altas en el ensayo de la evaluación de la tolerancia. Estas muestras de vegetales fueron lavadas con agua de pozo, colocadas en bandejas de aluminio y secadas a temperatura ambiente en el invernadero durante 5 días. Luego fueron transportadas al laboratorio, donde se procedió a la separación de raíz y parte aérea. Las fracciones fueron colocadas por separadas en bandejas de aluminio bien identificadas y se continuó el secado en estufa a 75 ± 2 °C durante 48 horas. Una vez terminado el periodo de secado se colocaron en un desecador durante 2 horas y posteriormente fueron molidas, mediante un molino de laboratorio. Estas fracciones molidas se guardaron en frascos de plástico con tapa hermética bien identificada hasta su posterior tratamiento por calcinación y digestión ácida.

El cromo extraído del medio líquido y de los tejidos vegetales se cuantificó mediante lecturas por espectrofotometría de absorción atómica según metodología estandarizada, llama aire-acetileno método 3111 B (APHA, AWWA, 2012).

Ensayo de remoción de cromo de efluente final de curtiembre

Al no detectarse cromo en el mismo siguiendo la técnica convencional, se agrega al efluente la solución madre de cromo de 200 mg.L⁻¹ de modo a lograr una concentración final similar a la máxima tolerable por la especie.

El tiempo y las condiciones de exposición, así como los procedimientos de extracción de muestra de efluente y del material vegetal, el procesamiento de las mismas, así como de los controles y la cuantificación de cromo fueron iguales a los descritos en el punto anterior

Se determinó Cr⁶⁺ al inicio y final del experimento para observar si hubo oxidación del cromo. El procedimiento se realizó conforme al método colorimétrico 3500-Cr D descrito en el (APHA, AWWA, 2012)

Determinación de clorofila

Con el fin de observar si el crecimiento de las plantas fue afectado por la presencia de Cr³⁺ se realizaron determinaciones de contenido de clorofila en las plantas. Para ello, se homogeneizaron 0,1 g de hoja del material vegetal fresco en 10 ml de etanol absoluto. Se centrifugaron a aproximadamente 2500 rpm durante 5 min a 15 °C. La cuantificación de la clorofila *a+b* se realizó mediante lecturas espectrofotométricas a 664 nm (Wintermans & De Motts, 1965)

Los valores de absorbancia se tradujeron a microgramos de clorofila/g de tejido (o microgramos/mg), mediante los siguientes cálculos:

$$\text{clorofila } a + b = \frac{1000A (654 \text{ nm})}{39} \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{mL}} \right] \quad (1)$$

$$\frac{\mu\text{g de clorofila}}{\text{Pf de hoja}} \left[\frac{\text{nv}}{\text{p}} \right] \quad (2)$$

Siendo:

V: volumen de etanol usado en la extracción en mL

n: microgramos de clorofila/mL, según la ecuación (1)

Pf: peso fresco del material vegetal presente en el extracto en gramos o miligramos.

Para observar si la cantidad de clorofila se veía afectada por el tratamiento, se evaluó el contenido de clorofila en los vegetales en dos condiciones: el vegetal en agua libre de cromo (control) y los vegetales expuestos a la solución de cromo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Colecta de *E. crassipes* y adaptación a condiciones de cultivo

Suficientes ejemplares de *E. crassipes* fueron colectados de su ambiente natural, el esquema de sustitución gradual (Tabla 1), del agua del origen por el agua de adaptación resultó exitoso obteniéndose cantidad necesaria de plantas hijas para la realización de los ensayos. La temperatura, pH y conductividad eléctrica del agua del río en

el momento de la colecta, el agua de pozo y las proporciones utilizados resultaron favorables para la adaptación.

Evaluación de la tolerancia *E. crassipes* al cromo en solución acuosa

Las plantas colocadas en las soluciones 1, 2, y 3 (de bajas concentraciones), detalladas en la Tabla 2, presentaron crecimientos normales, comportándose de manera similar al sistema control (soluciones sin cromo), es decir, desarrollaron nuevos estolones y no se observó palidez en las hojas, además vivieron hasta el final del experimento sin evidenciarse signos de deterioro.

Las plantas expuestas a la solución 4, no presentaron signos de marchitamiento en los primeros días de exposición, luego comenzaron a marchitarse, llegando a casi 70% de marchitamiento después de los 4 días. Posteriormente se mantuvieron estables sin nuevos signos de deterioro hasta el día 8, a partir del cual se manifiesta nuevamente marchitamiento seguido de una recuperación con brote de nuevas hojas.

El porcentaje de marchitamiento osciló entre 30 y 70 % durante todo el periodo de observación, llegando a un 60 % al final debido al marchitamiento de las hojas existentes desde el inicio y el desarrollo de nuevos estolones durante todo el periodo de exposición.

La recuperación de las plantas y posterior marchitamiento da indicios de que esta concentración es el límite tolerable.

Las plantas en las soluciones 1 al 4, sobrevivieron hasta el final del periodo de ensayo (20 días).

Las *E. crassipes* que fueron expuestas a altas concentraciones, soluciones de 5 al 6, se marchitaron completamente a los 6 días de exposición sin haber desarrollado nuevos estolones. Esto indicó que estas concentraciones resultaron tóxicas para la especie, como se observa en la Figura 4.

En un trabajo realizado por Gonzales *et al* (2017) en tolerancia al metal en cultivares de cebada y trigo, en el caso de Cr, el desarrollo de la planta y los rasgos fisiológicos se vieron significativamente afectados. Para la concentración más alta de Cr.

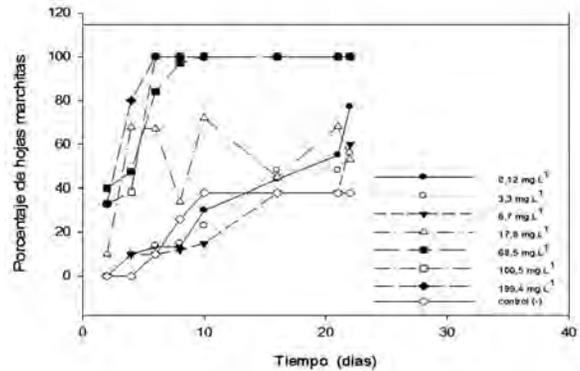


Figura 4. Tolerancia de *E. crassipes* a distintas concentraciones de cromo en función del tiempo de exposición evaluadas como el porcentaje de hojas muerta.

Ensayo de selección del método de extracción del cromo de las macrófitas

Los resultados de los dos métodos de extracción, vía seca y vía húmeda tanto para un estándar de cromo de 20 mg.L⁻¹ y para el material vegetal seco se muestran en la Tabla 3 y Tabla 4 respectivamente.

Se encontró que la cantidad de cromo recuperado en el proceso de vía húmeda fue muy superior al recuperado por vía seca, debido a que hubo menos pérdida de analito comparado con el método por vía seca. La poca recuperación del analito por vía seca podría deberse a la formación de óxidos de cromo durante la incineración de las muestras, y este es insoluble en agua y no es fácilmente atacado por ácidos o bases.

El límite de detección (LD) y de cuantificación (LQ) del mismo en parte aérea y raíces del material vegetal fueron LD (mg.g⁻¹):0,01 y 0,1 LQ (mg.g⁻¹):0,02 y 0,2 respectivamente.

Ensayo de capacidad de absorción de cromo por *E. crassipes*

Para determinar la capacidad de absorción de cromo por parte de las plantas, se analizaron muestras expuestas a 500 mL de soluciones ,6,7 y 8 que corresponden a cantidades suministrada de 34,2; 50,2 y 99,7 mg de Cr³⁺ por unidad del vegetal, respectivamente. Después de 6 días de exposición de las plantas a las soluciones de cromo se marchitaron completamente, es decir resultaron tóxicas para la especie.

Tablas 3-4. Recuperación de cromo por vía húmeda y vía seca. **3)** a partir de la solución estándar. **4)** Recuperación por vía húmeda y vía seca a partir del material vegetal.

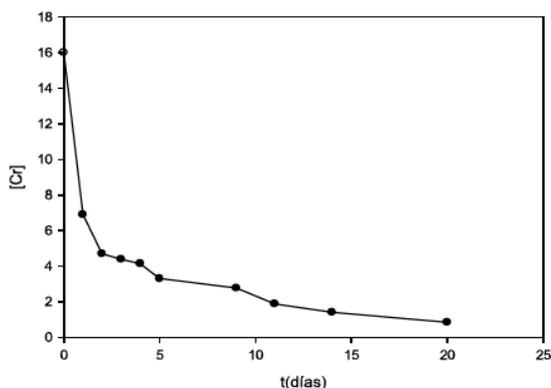
3	Método	Estándar de Cr 20 (mg.L⁻¹)	Recuperación (mg.L⁻¹)	Recuperación (porcentaje)
	Vía Húmeda	20,0	18,7	93,4
	Vía Seca	20,0	0,02	1,4

4	Método	Suministrado (mg)	Recuperación (mg)	Recuperación (porcentaje)
	Vía Húmeda	34,2	23,9	69,9
	Vía Seca	34,2	8,9	26,1

Los análisis del contenido de cromo en las partes aéreas de las plantas mostraron un importante aumento de la solución 6 al 7. Acumularon 7,8 a 22,5 mg. respectivamente, seguido de una leve disminución de la cantidad absorbida al aumentar la cantidad de cromo suministrada 20,9 mg. en la solución de 8 y en las raíces se mantuvo entre 15 y 18 mg en las concentraciones altas. El mayor porcentaje absorbido por unidad de vegetal se observó en el suministro de 50,2 mg de Cr³⁺, (ver Figura 9).

Ensayo de remoción de cromo a partir de una solución de agua de pozo

La Figura 5 muestra la variación de la concentración de cromo en la solución (inicialmente de 16,00 mg.L⁻¹), que suministró 8,0 mg Cr³⁺ por cada recipiente que contiene 500 ml de solución y un ejemplar

**Figura 5.** Variación de la concentración de cromo en función del tiempo.

de la especie. Se encontró que la mayor cantidad de cromo fue absorbido en los primeros días de exposición (48 horas), luego disminuye gradualmente en el transcurso del tiempo, quedando 1,05 mg Cr³⁺.L⁻¹ al final de los 20 días y no se observó signos de fitotoxicidad.

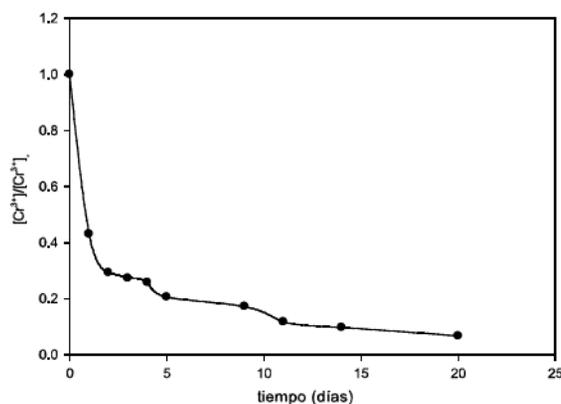
Este tipo de comportamiento se puede asimilar a una cinética de pseudo primer orden, graficando la

[Cr] vs t, y de acuerdo a la ecuación de cinética de

primer orden $\frac{[Cr]}{[Cr_0]} = e^{-kt}$, graficando $\frac{[Cr]}{[Cr_0]}$ vs t, ec-

uación (3), en la Figura 6, se observa un decaimiento exponencial y linealizando la ecuación aplicando

logaritmo natural a la ecuación de primer orden resulta $\ln \frac{[Cr]}{[Cr_0]} = -k.t$ y graficando $\ln \frac{[Cr]}{[Cr_0]}$ vs t,

**Figura 6.** Grafica según la ecuación de cinética de primer orden.

ecuación (4), se obtiene la pendiente de la línea recta que corresponde al valor de la constante de absorción se muestra en la Figura 7 y el tiempo de vida media aplicando la fórmula correspondiente

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k}$$

K_{ab} : 0,10 días⁻¹, y el $t_{1/2}$ = 6,8 días⁻¹.

A fin de observar si hubo oxidación de la solución durante el transcurso del experimento, se realizó la determinación de Cr⁶⁺ en la solución acuosa inicial y al final del tiempo de exposición. En ambos casos, no se detectó la presencia del analito en la solución.

Ensayo de remoción de cromo en efluente final de curtiembre

La concentración real de como en el efluente fortificado se determinó en el momento de iniciar el ensayo arrojando como resultado 22,4 mg Cr³⁺.L⁻¹ que suministró 11,2 mg Cr³⁺ por 500 ml de solución a cada unidad vegetal y se procedió como se describió anteriormente.

Se encontró que la máxima cantidad de cromo absorbido en las primeros días de exposición, (48 horas), luego disminuyó a 1,28 mg.L⁻¹, por debajo del máximo admisible para efluente a ser vertidos a cursos de agua, en la solución residual, manteniéndose constante en ese valor por el resto del periodo de ensayo como se observa en la Figura 8. Mayor cantidad del cromo absorbido se encontró en la raíz del vegetal tanto para la solución como para el efluente, no obstante, hubo mayor remoción

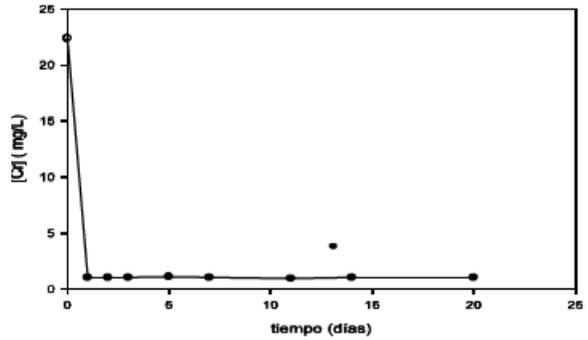


Figura 8. Grafica de concentración de Cr³⁺ en el efluente en función del tiempo.

de cromo desde el efluente, en total 98,1 % de la cantidad suministrada por unidad de vegetal, se muestra en la Figura 9.

Estos comportamientos son similares a los observados por Maine et al., (2001) para la remoción de cadmio con E. crassipes, a partir de una concentración de 1 mg Cd.L⁻¹. Dicha concentración fue disminuyendo durante todo el tiempo del experimento. La mayor parte de esta reducción tomó lugar en las primeras 24 horas. A los 21 días la E. crassipes absorbió aproximadamente 72% de la concentración inicial, lo que indicó que la especie tiene una alta capacidad de remoción de Cd.

En otro estudio de absorción de cromo trivalente, utilizando sauce híbrido, Yu & Gu (2007) observaron que más de 90% de Cr³⁺ aplicado fue removido de la solución hidropónica en concentraciones de hasta 7,5 mg de Cr.L⁻¹. Aproximadamente el 70 % del cromo fue recuperado en los materiales vegetales. En el tratamiento con bajo

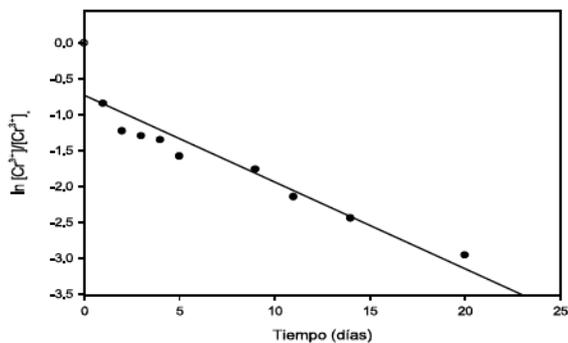


Figura 7. Grafica de licalizacion de la ecuación de primer orden.

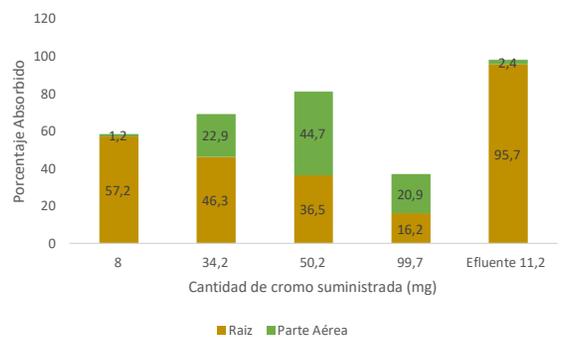


Figura 9. Porcentaje de cromo absorbido por organo de E. Crassipes.

Tabla 5. Absorción de cromo por el tejido vegetal.

Cromo suministrado	Solución 8,0 mg/500mL	Solución 5 34,2 mg/500mL	Solución 6 50,2 mg/500mL	Solución 7 99,7 mg/500mL	Efluente 11,2 mg/500 mL
Cromo (mg) Absorbido Parte aérea	0,1	7,8	22,5	20,9	0,3
Cromo (mg) Absorbido Raíz	4,6	15,8	18,3	16,1	10,7
Cromo (mg) Absorbido Planta	4,7	23,6	40,8	37,0	10,9

contenido de cromo ($2,5 \text{ mg.L}^{-1}$) la acumulación fue mayor en la raíz (92%) y más bajas en las hojas (0,2%).

Las cantidades de cromo absorbidas por las distintas partes de la planta *E. crassipes* se muestran en la Tabla 5. El Cr^{6+} en el efluente, tanto al inicio como al final resultaron inferiores al límite de detección del método.

El análisis de la varianza se los datos obtenidos mediante la herramienta estadística ANOVA de un factor ($p=0,05$), arrojó una diferencia significativas del contenido de Cr^{3+} en las partes aéreas y raíces de *E. Crassipes* entre las concentraciones estudiadas.

La prueba de Tukey también mostró que existe diferencia significativas en el contenido de Cr^{3+} en las partes aéreas y raíces de *E. crassipes* para concentraciones altas ver en la Tabla 5

Al final del ensayo se observó disminución importante de la mayoría de los parámetros fisicoquímicos ensayados del efluente, estas diferencias se observan en la Tabla 6. y Según el estudio realizado por Sricoth et al, (2018) el extenso sistema de raíces de las plantas mejoró la calidad del agua según lo determinó una marcada disminución de la turbidez después de 7 días de tratamiento. El contenido de DBO sirvió como un indicador útil de la calidad del agua; La DBO disminuyó en un 91% en 21 días, *E. crassipes* acumulo metales tanto en

las raíces como en los brotes.

Factor de Translocación y bioacumulación

Los datos obtenidos de la Tabla 5 fueron usados para estimar los factores de translocación (FT) y Bioconcentración (FBC).

El factor de translocación para el cromo en las plantas se calculó como la concentración de cromo en la parte aérea dividida entre la concentración en la raíz. El factor de bioconcentración fue expresado por la proporción de la concentración del metal en la raíz sobre la concentración total en el agua (Tu et al., 2003, Rizzi et al., 2004, Maldonado et al., 2011)

$$CFT = \frac{\text{metales en la parte aérea}}{\text{metales en raíces}} \quad (5)$$

Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos del efluente.

Parámetros	Inicial (mg.L^{-1})	Final (mg.L^{-1})	Disminución (%)
pH (upH)	8,0	8,1	---
Demanda Química de Oxígeno	340,0	266,2	21,7
Demanda Bioquímica de Oxígeno	26,0	14	46,2
Nitrógeno Amoniacal expresado en $\text{NH}_3\text{-N}$	58,2	1,4	97,6
Nitrógeno total kjeldhal expresado en $\text{NH}_3\text{-N}$	72,8	7,0	90,4
Grasas y aceites	8,4	No se detecta	100
Sólidos en suspensión	24,5	No se detecta	100
Cromo hexavalente	<0,1	<0,1	---
Cromo total	22,4	1,28	94,3

Tabla 7. Factores de translocación y bioacumulación.

Cromo (mg/500 ml)	8,0	34,2	50,2	99,7	11,2 (Efluente)
FT	0,008	0,18	0,42	0,44	0,02
FBC	11,6	588,6	455,9	206,0	3,2

$$FBC = \frac{\text{metales en la raíz}}{\text{metales en el agua}} \quad (6)$$

Las Tabla 7 presenta los FT y FBC estimados para las soluciones y del efluente, en todos los casos los factores de translocación resultaron inferiores a uno ($FT < 1$) indicando que no hubo importante translocación del metal desde la raíz a la parte aérea, los factores de bioacumulación mayor a la unidad ($FBC > 1$), significa acumulación del cromo trivalente en las raíces del vegetal, tanto en soluciones como en efluente y los $FBC \gg 1$ en las soluciones de concentraciones altas es sinónimo de un hiperacumulación del metal en la raíz del vegetal.

La distribución de Cr^{3+} en los tejidos vegetales varió con las concentraciones iniciales del mismo. A bajas concentraciones, la translocación de raíz a la parte aérea fue menor que a altas concentraciones, no obstante en ambos casos las raíces fueron el principal acumulador de este metal., según Faisal y Hasnain (2005) La *E. Crasipes* es un excelente removedor de cromo y otros metales pesados del medio Ambiente.

Los valores de FT Y FBC **0,44 y 206** son muy cercanos a los valores obtenidos por Subhashini & Swamy (2013) en la Fitorremediación de Cd y Cr de suelo contaminado usando *Physalis minima* Linn, al final de experimento (60 días) se observó que la acumulación de los mismos fue más alta en la raíz que en las partes aéreas, los FT y FBC estimados resultaron, Para Cd 2,17 y 51,2; para Cr **0,48 y 218**. FBC **3,2** para Cr encontrado en el efluente de curtiembre (Tabla 7) es muy próximo al encontrado por Pandey (2016) en fitorremediación

Tabla 8. Concentración de Clorofila.

Muestra	Promedio Clorofila/ peso fresco ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	Disminución (%)
Control al inicio	2546,2	
Control al final	1329,7	48
Muestras al final	1215,5	52

en estanque de cenizas volátiles con *E. crassipes*, Cr (**3.75**) > Cu (2.62) > Cd (1.05), and Cu (1.35) en la raíz y vástago.

Determinación de clorofila

Se encontró, que a lo largo del periodo de ensayo hay una disminución de la clorofila en las plantas, tanto en los ejemplares control, como así también en las plantas que fueron expuestas en solución de cromo, siendo el porcentaje de disminución 48% y 52% respectivamente, como muestra la Tabla 8.

El análisis de varianza de los datos indicó que la disminución del contenido de clorofila en las plantas control y en las expuestas a cromo no es significativamente diferente al 95 % de confianza. La presencia de cromo en el agua no afectó significativamente el contenido de la clorofila en las plantas expuestas a $16,0 \text{ mgCr}^{3+}\cdot\text{L}^{-1}$.

En el trabajo de Yu & Gu (2007) se demostró que el contenido clorofila en las hojas de sauce híbrido tratadas, varió con la dosis de cromo. El contenido de clorofila en las hojas de los sauces expuestos a $7,5 \text{ mg Cr}\cdot\text{L}^{-1}$ fue más alto que el de las plantas no tratadas, pero inferior a aquellas tratadas con $30,0 \text{ mg de Cr}\cdot\text{L}^{-1}$.

CONCLUSIONES

Los ejemplares de *Eichhornia crassipes* colectadas se adaptaron y reprodujeron satisfactoriamente y los experimentos se realizaron con los nuevos estolones seleccionados de acuerdo al tamaño, peso y número de hojas.

En cuanto al método de extracción del cromo, se encontró que la vía húmeda fue más eficiente y

se utilizaron en todos los ensayos realizados.

La máxima concentración tolerable de las estudiadas resultó 17,8 mgCr³⁺.L⁻¹, concentraciones inferiores se comportaron como el control y concentraciones mayores resultaron letales para esta especie.

Basado en el FBC estimados y en los análisis estadísticos de la varianza del contenido de cromo en los órganos vegetales. La *E. Crassipes* resultó una acumuladora de Cr³⁺ y translocación de Cr³⁺ de la raíz a las hojas es limitada por la cantidad suministrada y en las condiciones del experimento no hubo oxidación (biótica o abiótica) del cromo trivalente, ni afectó significativamente el contenido de la clorofila en las plantas.

El tratamiento propuesto en este trabajo, muestra que se logra la disminución de cromo en agua residual por debajo de los estándares de la ley. La información sugiere que la bioacumulación de Cr³⁺ de agua contaminada a través de la fitorremediación es una tecnología alternativa y prometedora de remediación actualmente disponible.

AGRADECIMIENTOS

A FACEN, por la oportunidad brindada para la realización de la Maestría en Físicoquímica Ambiental. A CONACYT, por la financiación de la mencionada Maestría. A los profesionales docentes y técnicos de los laboratorios de ensayos de FACEN e INTN.

LITERATURA CITADA

- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals--concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869–881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>.
- APHA, AWWA, W. (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.
- Pandey, v. c. (2016). Phytoremediation efficiency of *Eichhornia crassipes* in fly ash pond. *International Journal of Phytoremediation*, 18(5), 450–452. <https://doi.org/10.1080/15226514.2015.1109605>
- Barbafieri, M., Tassi, E., Rizzi, L., Molinar, M., & Nardella, A. (2004). Phytoremediation treatability test for an industrial site contaminated by Pb, Zn and As. *Soil & Sediment Contamination*, 13(2), 215. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=sso&db=geh&AN=2006-064196&lang=es&site=eds-live&scope=site>
- Faisal, M., & Hasnain, s., (2005). Beneficial role of hydrophytes in removing Cr(VI) from wastewater in association with chromate-reducing bacterial strains *Ochrobactrum intermedium* and *Brevibacterium*. *International Journal of Phytoremediation*, 7(4), 271–277. <https://doi.org/10.1080/16226510500327111>
- González, Á., del Mar Gil-Díaz, M. & del Carmen Lobo, M. J *Soils Sediments* (2017) 17: 1403. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1387-4>
- Maine, M. A., Duarte, M. V., & Suñé, N. L. (2001). Cadmium uptake by floating macrophytes. *Water Research*, 35(11), 2629–2634. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00557-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00557-1)
- Maldonado-Magaña, A., Favela-Torres, E., Rivera-Cabrera, F., & Volke-Sepulveda, T. L. (2011). Lead bioaccumulation in *Acacia farnesiana* and its effect on lipid peroxidation and glutathione production. *Plant and Soil*, 339(1), 377–389. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0589-6>
- Martelo, J., & Lara Borrero, J. A. (2012). Macrofitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales: una revisión del estado de arte. *Ingeniería y Ciencia. Ing. Cienc. ISSN 1794-9165*, 8 (15), 221–243. Retrieved from www.redalyc.org/articulo.oa?id=83524069011
- Sricoth, T., Meeinkuir, W., Pichtel, J., Taepayoon, P., & Saengwilai, P. (2018). Synergistic phytoremediation of wastewater by two aquatic plants (*Typha angustifolia* and *Eichhornia crassipes*) and potential as biomass fuel. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(6), 5344–5358. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0813-5>
- Subhashini, V., & Swamy, A. V. V. S. (2013). Phytoremediation of Cadmium and Chromium From Contaminated Soils Using *Physalis*

- Minima Linn. *American International Journal of Research in Formal, Applied & Natural Sciences*, 3(1), 119–122. Retrieved from <http://www.iasir.net>
- Tancioni, A., Bruno, M. R., García, B. N., Bianchi, L. I., & Alvarez, J. H. (2000). Método de remediación natural para completar la depuración de efluentes industriales contaminados con cromo vi., (1). Retrieved from http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/uruguay30/AR04575_Tancioni.pdf
- Tu, C., Ma, L. Q., Zhang, W., Cai, Y., & Harris, W. G. (2003). Arsenic species and leachability in the fronds of the hyperaccumulator Chinese brake (*Pteris vittata* L.). *Environmental Pollution*, 124(2), 223–230. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00470-0](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00470-0)
- Wintermans, J. F. G. M., & De Mots, A. (1965). Spectrophotometric characteristics of chlorophylls and their phenophytins in ethanol. *BBA - Biophysics Including Photosynthesis*, 109(2), 448–453. [https://doi.org/10.1016/0926-6585\(65\)90170-6](https://doi.org/10.1016/0926-6585(65)90170-6)
- Yu, X. Z., & Gu, J. D. (2007). Accumulation and distribution of trivalent chromium and effects on hybrid willow (*Salix matsudana* Koidz x *alba* L.) metabolism. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 52(4), 503–511. <https://doi.org/10.1007/s00244-006-0155-7>