

Artículo Original

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA REMOCIÓN DE CROMO MEDIANTE HUMEDALES SUBSUPERFICIALES HORIZONTALES

ASSESSMENT OF CHROMIUM REMOVAL BEHAVIOR THROUGH HORIZONTAL SUBSURFACE WETLANDS

Alejandro Boza Abreu¹ <https://orcid.org/0009-0008-8766-3494>
Luis Ernesto Morera Hernández^{2*} <https://orcid.org/0000-0002-4201-7906>
Maira María Pérez Villar² <https://orcid.org/0000-0002-3907-7449>

¹ UEB División Territorial de Comercialización de Combustibles Villa Clara, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

² Centro de Estudios de Química Aplicada (CEQA). Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Junio 11, 2024; Revisado: Julio 5, 2024; Aceptado: Agosto 12, 2024

RESUMEN

Introducción:

La contaminación de las aguas es uno de los principales problemas ambientales que afecta a Cuba. Las industrias galvánicas y del curtido de cueros del mismo país, generan aguas residuales contaminadas con cromo que pueden ser tratadas utilizando humedales construidos.

Objetivo:

Evaluar el comportamiento de la remoción de cromo en humedales subsuperficiales experimentales.

Materiales y Métodos:

Se construyeron dos sistemas experimentales constituidos por humedales de flujo subsuperficial horizontal: uno plantado con *Cyperus Alternifolius* y otro con dos variedades de *Heliconia* (*Rostrata* y *Wagneriana*), utilizando como sustrato el suelo ferralítico rojo. Para la determinación de cromo total se utilizó el método de Espectrometría de Absorción Atómica y para el procesamiento estadístico se empleó el Excel del paquete Office 2021 en su versión 16.0.17726.



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Luis E. Morera, Email: lmorera@uclv.cu



Resultados y Discusión:

La especie que mejor asimilación mostró fue la *Cyperus Alternifolius*, logrando transportar el metal hacia las hojas. Se evaluó la cinética de remoción de cromo en el humedal y en el suelo usado como sustrato, demostrándose la importancia de las plantas y los microorganismos asociados en la retención del metal, al observarse mayores retenciones en el humedal. Se obtuvieron eficiencias de remoción de cromo superiores al 98%.

Conclusiones:

Utilizando la planta *Cyperus Alternifolius* junto con el suelo ferralítico rojo, y realizando el escalado correspondiente con las constantes cinéticas obtenidas, es posible construir un sistema de tratamiento que remueva el cromo de manera eficiente de aguas residuales asociadas a la industria galvánica y tannerías.

Palabras clave: cromo; humedales; microorganismos; planta; subsuperficiales; suelo.

ABSTRACT

Introduction:

Water pollution is one of the main environmental problems affecting Cuba. The galvanic and leather tanning industries in the same country generate wastewater contaminated with chromium which can be treated using constructed wetlands.

Objective:

To evaluate chromium removal behavior in experimental subsurface wetlands.

Materials and Methods:

Two experimental systems consisting of horizontal subsurface flow wetlands were constructed: one planted with *Cyperus Alternifolius* and the other with two varieties of *Heliconia* (*Rostrata* and *Wagneriana*), using red ferrallitic soil as substrate. The Atomic Absorption Spectrometry method was used for the determination of total chromium and Excel of the Office package in its version 16.0.17726 was the software adopted for statistical processing.

Results and Discussion:

The *Cyperus Alternifolius* was the species that showed the best assimilation, managing to transport the metal to the leaves. The kinetics of chromium removal in the wetland and in the soil used as substrate were evaluated, demonstrating the importance of plants and associated microorganisms in the retention of the metal, with higher retention in the wetland. Chromium removal efficiencies of over 98% were obtained.

Conclusions:

Using the *Cyperus Alternifolius* plant together with the red ferrallitic soil, and performing the corresponding scaling with the kinetic constants obtained, it is possible to construct a treatment system that efficiently removes chromium from wastewater associated with the galvanic industry and tanneries.

Keywords: chromium; wetlands; microorganisms; plant; subsurface; soil.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación de las aguas en Cuba es uno de los principales problemas ambientales, debido a los vertimientos de residuales sin tratar o con tratamientos deficientes en los ecosistemas. Las industrias existentes asociadas al curtido de cueros y a la galvanoplastia, generan aguas residuales contaminadas con cromo (Morera, 2020).

Para este tipo de residuales, los humedales construidos vienen a constituir una alternativa de tratamiento de bajo costo, sostenible y eco-amigable, con respecto a los métodos tradicionales de remoción de cromo y los altos costos e insumos necesarios que ellos conllevan (Younas y col., 2022a). En estos humedales artificiales, se producen diversos mecanismos; como la biosorción, la absorción por microorganismos y plantas, la adsorción en sustratos, la biodegradación, la coprecipitación y la sedimentación, que de manera natural viabilizan la remoción de contaminantes, destacándose los sistemas clasificados como subsuperficiales (Batoool y Saleh, 2020).

Se han realizado varias investigaciones en este ámbito, asociado a la contaminación de las aguas con cromo y el empleo de humedales subsuperficiales para la remoción del mismo con resultados alentadores (Ortega y Sánchez, 2019; Alemu y col., 2020; Younas y col., 2022b); aunque en su mayoría procedentes de otros países. En estos últimos, las condiciones tanto climáticas como experimentales difieren considerablemente de las existentes en Cuba. Por tanto, la presente investigación tiene como objetivo evaluar el comportamiento de la remoción de cromo en humedales subsuperficiales experimentales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Diseño de los humedales

Las dimensiones de los humedales experimentales de flujo subsuperficial horizontal (Figura 1) fueron 0,45 m de largo, 0,33 m de ancho y 0,2 m de profundidad, logrando así una mayor oxigenación en los sistemas menos profundos. Los humedales poseen una capa de suelo ferralítico rojo de 0,15 m de espesor y la capa restante de grava 5-10 mm de diámetro (procedente del molino de piedra El Purio en Encrucijada).



a)

b)

Figura 1. a) Sistema de tratamiento experimental I
b) Sistema de tratamiento experimental II

2.2. Suelo y características

El suelo ferralítico rojo utilizado se tomó de la localidad de Mata, municipio de Cifuentes de la provincia Villa Clara. Para ello se definió una red de muestreo de 80 x 40 m, mientras que los puntos de la misma se fijaron a razón de 20 x 20 m, resultando un área total de 3200 m². El muestreo se efectuó hasta 20 cm de profundidad, en el mes de febrero. Posteriormente la muestra fue llevada al laboratorio, secada a temperatura ambiente y finalmente, se procedió a prepararla en función de los ensayos a efectuar. La muestra que se analiza es compuesta, representativa de todos los puntos de la red de muestreo.

El muestreo del suelo ferralítico rojo en el humedal subsuperficial se realizó marcando puntos a razón de 0,10 x 0,10 m en el mes de mayo a 0,01; 0,12 y 0,18 m de profundidad, posteriormente se manipuló de la misma forma que con el suelo anterior para prepararla en función de los ensayos correspondientes. La muestra es compuesta y representativa de todos los puntos de la red de muestreo, evitando errores debido a diferencias entre las distintas áreas del suelo del humedal.

2.3. Especies vegetales

Las plantas emergentes seleccionadas fueron la *Cyperus Alternifolius*, *Heliconia Rostrata* y *Heliconia Wagneriana*, tomadas del jardín botánico de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. Las plantas fueron escogidas por brindar buenos resultados en la remoción de contaminantes, tanto en Cuba como en otras regiones geográficas. Tal es el caso de Malaviya y col., (2020) y Morera (2020), quienes obtuvieron buenos resultados en la remoción de níquel con humedales experimentales sembrados con estas especies de plantas.

2.4. Métodos de ensayo

Para el análisis de las especies vegetales se realizó un lavado con agua destilada y luego con agua desionizada, con el objetivo de eliminar la mayor parte de las partículas de polvo y todos los restos de suelo que se encontraban adheridos a las raíces. Se separaron en tres clases: hojas, tallos y raíces (y rizomas); se trituraron hasta un tamaño de partícula inferior a 0,5 mm y se mezclaron cada una de las clases por separado para lograr la homogenización respectivamente. Se secaron en estufa a 60 °C hasta mantener peso constante, para posteriormente proceder a la preparación, a fin de realizar los ensayos subsecuentes.

La determinación de cromo total se realizó mediante el método de Espectrometría de Absorción Atómica (APHA, AWWA, WEF, 2005), para lo cual se preparó una curva de calibración instrumental estableciendo varios patrones desde 1 hasta 10 mg/L a partir de una disolución patrón de cromo total de concentración 1000 mg/L (preparada a partir del metal en medio ácido).

En tanto, se llevaron a cabo extracciones simples y secuenciales; las primeras empleando agua desionizada/EDTA, y las últimas, siguiendo el método de referencia europeo BCR (*Bureau Community of Reference*) (Qureshi y col., 2020) donde se toman como solventes al ácido acético (HAc) [primera etapa], cloruro de hidroxilamonio (NH₂OH • HCl) [segunda etapa], peróxido de hidrógeno (H₂O₂) seguido de acetato de amonio (NH₄CH₃COO) [tercera etapa] y al ácido nítrico (HNO₃) junto con el ácido

clorhídrico (HCl) 3:1 para la fracción residual.

Por último, se desarrolló el estudio cinético de la remoción de cromo total en el tipo de suelo específico y en el humedal de mejores resultados. Esto último se realizó con disoluciones patrón de 10 y 20 mg/L de este metal. El experimento se llevó a cabo con un flujo discontinuo, pasando el agua residual desde un tanque colocado a un nivel superior hacia el humedal subsuperficial, tomando muestras del agua residual afluyente (C_0) y efluente (C_e) cada 5; 10; 15; 20; 30; 45; 60; 75; 90; 105 y 120 minutos respectivamente. La ecuación que se utiliza para calcular la eficiencia de remoción es la 1.

$$\% \text{ Remoción} = \left[\frac{C_{\text{afluente}} - C_{\text{efluente}}}{C_{\text{afluente}}} \right] \times 100 \quad (1)$$

Donde:

% Remoción: Eficiencia de remoción

C_{afluente} : concentración del afluyente en mg/L

C_{efluente} : concentración del efluente en mg/L

2.5. Procesamiento estadístico

El software empleado en el procesamiento fue Excel del paquete Office en su versión 16.0.17726. Todos los valores se determinaron por triplicado, los atípicos fueron eliminados (test de Grubbs) y las medias se obtuvieron para el empleo en los cálculos subsiguientes. En el caso específico de la curva de calibración, se calculó el coeficiente de determinación y se elaboró el gráfico de residuales (con los valores de las réplicas de los patrones empleados).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Curva de calibración del cromo total

Como base para los resultados de los subsiguientes experimentos realizados, se tomó la ecuación de la curva de calibración obtenida ($A = 0,0267c - 0,0072$) donde “A” corresponde a la absorbancia del cromo y “c” a la concentración del mismo. El coeficiente de determinación de la misma obtenido ($R^2 = 0,995$) y la dispersión aleatoria alrededor del 0 en el gráfico de los residuales, indican que no existe diferencia apreciable entre los valores experimentales de absorbancia obtenidos y los puntos de concentración de las curvas; por tanto, se puede afirmar que la linealidad es aceptable.

3.2. Influencia del suelo y la planta en la remoción del cromo total

3.2.1. Evaluación del comportamiento cromo total en las especies de plantas de ambos sistemas experimentales

Con el objetivo de conocer la influencia de la planta en la remoción de cromo, se analizó el contenido de cromo total de las tres especies de plantas estudiadas (hoja, tallo y raíz) antes de la puesta en funcionamiento de los humedales (APF) y una vez finalizado los tratamientos (DPF), luego de 6 meses iniciados los experimentos. Los resultados obtenidos se muestran en las Figura 2.

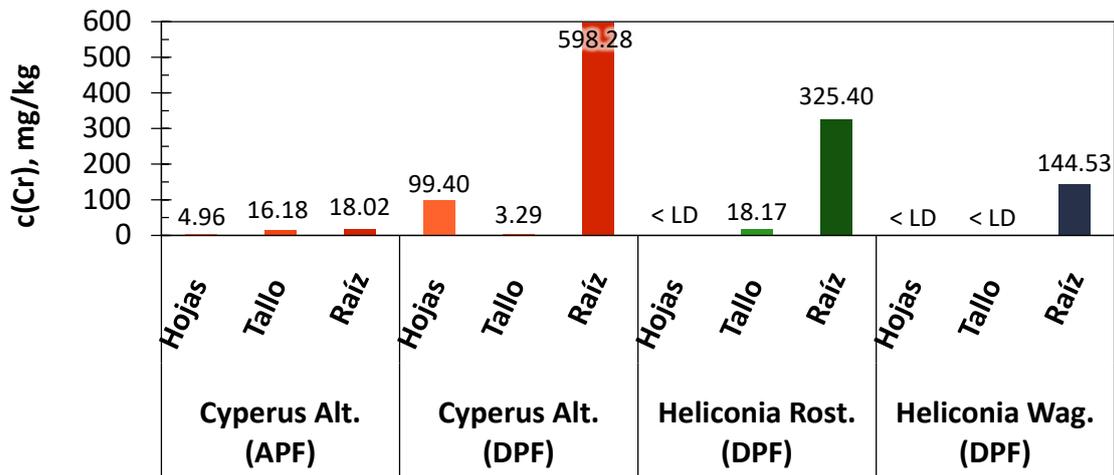


Figura 2. Contenido de cromo en las plantas (*seudo tallo, raíz y rizomas)

Como se observa en la Figura 2, solo la *Cyperus Alternifolius* contenía cromo antes de plantada en el humedal experimental, siendo estos valores inferiores a 20 mg/kg. Esto se debe a la tendencia acumuladora de metales que la propia planta posee, reportada por Terfie y Asfaw, (2015), Nokande y col., (2022). En las demás especies de plantas analizadas, el contenido de cromo se encontraba por debajo del límite de detección del método analítico.

Todas las especies de plantas incrementaron los niveles del metal en sus órganos, a los seis meses de la puesta en funcionamiento del sistema experimental; lo que indica la adaptación gradual a las condiciones atípicas. La mayor concentración de metal en las tres plantas analizadas se encontró en las raíces, reflejando el carácter parcial de la asimilación del contaminante. La especie que mostró una mejor asimilación del metal fue la *Cyperus Alternifolius*, logrando el transporte del metal hacia las hojas y una mayor retención en la raíz; lo que evidencia la considerable utilidad de la misma en estos sistemas. Los resultados también se corresponden con los obtenidos por Morera (2020) para la remoción de níquel, donde ambas especies tuvieron un comportamiento bien similar.

La acumulación del cromo en las plantas *Heliconia Rostrata* y *Wagneriana* son menores que en el *Cyperus Alternifolius*, ninguna de las dos variedades de *Heliconia* logra transportar dicho metal hasta las hojas, solo en el caso de la *Heliconia Rostrata* se aprecia una concentración del metal de 18,17 mg/kg en el pseudo tallo. Esto constata nuevamente el comportamiento acumulador de metales que posee la *Cyperus Alternifolius*. Las raíces y rizomas constituyeron la porción de mayor acumulación, donde se concentra la mayor cantidad de microorganismos responsables de la transformación en especies asimilables por la planta o inmovilización. De las dos variedades de *Heliconias* fue la *Rostrata* la que ofreció los mejores resultados en la retención de este metal, lo que confirma su mayor resistencia al estrés causado por ese elemento tóxico como bien plantean Rocha y col., (2022).

3.2.2. Influencia del suelo en la remoción del cromo total

3.2.2.1. Extracciones Simples

Se realizaron dos extracciones simples de cromo total retenido en el suelo (Figura 3); primeramente, con agua desionizada y luego con un agente quelatante (EDTA). En el primer caso se lleva a cabo para determinar de la posibilidad de que tiene el metal de ser lixiviado y devuelto a los cuerpos de agua (primera valoración de la movilidad de un metal); y en la segunda variante ofrece una medida de la posible transferencia de los metales a las plantas (biodisponibilidad). Cada una de las extracciones se realizó por triplicado.

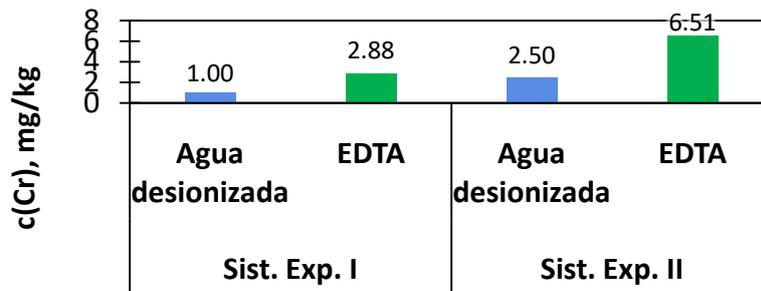


Figura 3. Extracciones simples realizadas al suelo en ambos sistemas experimentales (DPF)

Como se observa en la Figura 3, se obtuvo un mayor valor de concentración de cromo en ambos extractos en el Sistema Experimental II a los seis meses de su puesta en funcionamiento, evidenciando la mayor presencia de cromo disponible para la planta en este sistema experimental. Se observa además, que la concentración de cromo es superior en el extracto con EDTA para los suelos de los dos humedales experimentales, mostrando así mejores condiciones para la asimilación del metal por la planta que para la lixiviación. Esto último es claramente asociado al acomplejamiento del cromo con el EDTA, proceso que ocurre de manera natural, debido a la acción microorganismos y la materia orgánica, tal y como lo plantean Malyan y col., (2021).

3.2.2.2. Extracciones secuenciales

Se observa que, en los análisis realizados en ambos humedales (Figura 4), la mayor concentración del metal en el suelo se encuentra en la última fracción (residual); esta representa al metal con menor movilidad y por tanto con menor peligro de contaminación. Existe una diferencia entre la concentración del cromo retenido en la fracción residual del primer sistema experimental y el segundo, siendo mayor la concentración del metal en la fracción residual del primer sistema experimental, lo que demuestra su mayor capacidad para la inmovilización del metal. Se observan concentraciones de cromo superiores en las primeras fracciones del Sistema Experimental I, lo que no resulta un inconveniente debido a que el cromo presente en estas fracciones puede ser absorbido por las plantas con mayor facilidad; dato este constatado con los resultados obtenidos en las extracciones simples anteriormente mencionadas, donde el extracto con agua fue notablemente menor en el primer caso.

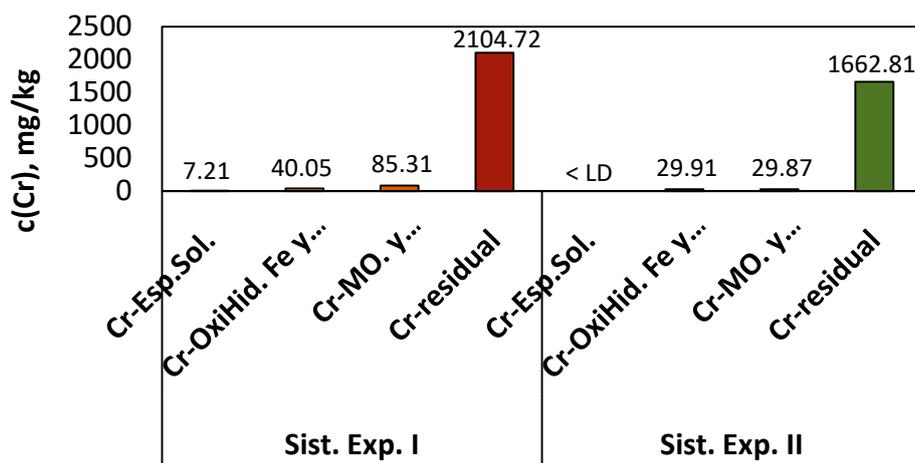


Figura 4. Extracciones secuenciales realizadas al suelo de ambos sistemas experimentales (DPF)

*Cromo unido a: Especies Solubles (Cr-Esp.Sol.), Oxihidróxidos de Hierro y Manganeseo (Cr-OxiHid. Fe y Mn), Materia Orgánica y Sulfuros (Cr-MO. y Sulfuros), Fracción residual (Cr-residual)

3.3. Cinética de remoción del cromo total en el suelo ferralítico rojo

Con el fin de determinar la influencia que ejerce el suelo en la reducción de la concentración de este metal, fue realizada la cinética de remoción del cromo al sustrato que fue empleado en ambos sistemas experimentales. En la Figura 5 se muestra el comportamiento cinético de la remoción de cromo a la temperatura de 25 °C, teniendo en cuenta que el humedal opera a temperatura ambiente. Se observa una adsorción máxima a los 45 minutos a la temperatura evaluada.

El contenido máximo de cromo retenido en el suelo sin plantar (265 mg/kg), es muy inferior al obtenido en el suelo usado como sustrato del humedal (2237 mg/kg). Esto evidencia el elevado impacto de las plantas y los microorganismos asociados a las raíces, en la retención del cromo en el suelo, como también reportan Rocha y col., (2022).

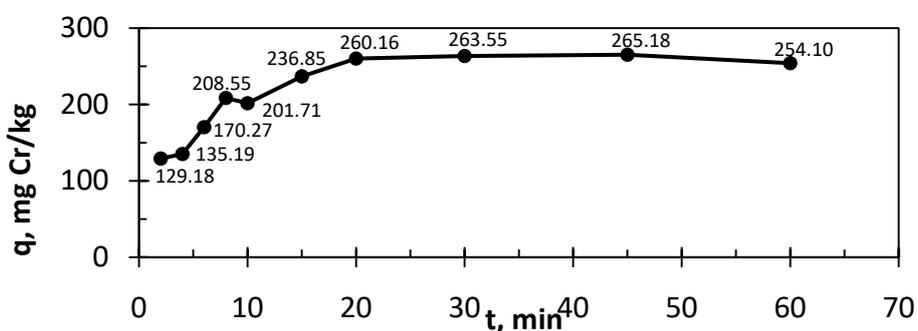


Figura 5. Comportamiento cinético de la remoción de cromo total con suelo ferralítico rojo

Los datos experimentales anteriores fueron ajustados a los modelos cinéticos más reportados en la adsorción de metales en diferentes sustratos donde, los que mejores resultados mostraron fueron el de pseudo segundo orden y el de Elovich. Esto

demuestra la naturaleza química y las interacciones complejas multimoleculares del proceso como bien plantean Wang y Guo, (2020). En la Tabla 1 se muestra la ecuación de la recta y el coeficiente de correlación para dichos modelos, observándose un mejor ajuste al modelo de pseudo segundo orden en todos los casos.

Tabla 1. Modelos cinéticos para la adsorción de cromo total en el suelo ferralítico rojo a 25 °C

<i>Modelo</i>	<i>Ecuación</i>	<i>Ecuación de la recta y coeficiente de correlación</i>
Pseudo segundo orden	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{h} + \frac{1}{q_e} \cdot t$ (2)	$y = 3,6514x + 9,7910$ $R^2 = 0,9957$
Elovich	$q_t = \alpha + \beta \cdot \ln(t)$ (3)	$y = 0,0455x + 0,0795$ $R^2 = 0,8793$

3.3. Cinética y eficiencia de remoción de cromo total en el humedal subsuperficial horizontal

Se procedió a realizar el estudio cinético de la remoción de cromo en el Sistema Experimental I que fue el que mejores resultados brindó en los experimentos realizados anteriormente. Los valores medios y la desviación estándar de los datos experimentales obtenidos de la remoción de cromo en el humedal se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores medios y desviación estándar del cromo total en los ensayos

<i>Tiempo (minutos)</i>	<i>c (Cr) 10 mg/L</i>	<i>c (Cr) 20 mg/L</i>
5	0,21 ±0,02	1,00 ±0,38
10	0,21 ±0,05	0,98 ±0,38
15	0,23 ±0,02	0,90 ±0,27
20	0,17 ±0,06	0,81 ±0,26
30	0,17 ±0,04	0,67 ±0,14
45	0,15 ±0,02	0,56 ±0,11
60	0,15 ±0,02	0,49 ±0,09
75	0,16 ±0,03	0,44 ±0,05
90	0,16 ±0,02	0,33 ±0,08
105	0,18 ±0,06	0,29 ±0,10
120	0,12 ±0,04	0,27 ±0,06

En el tratamiento del agua residual con el humedal subsuperficial se produce una disminución de la concentración de cromo total (Tabla 2) desde los primeros 5 minutos de tiempo de retención, demostrando la efectividad de este sistema natural de tratamiento para la remoción de cromo. La eficiencia de remoción de cromo en el humedal experimental a los 120 minutos de tiempo de retención del agua residual en el sistema de tratamiento se muestra en la Tabla 3, observándose que las mismas fueron superiores al 98 % para ambas disoluciones patrón, resultados que se corresponden con los obtenidos por Morera (2020) para la remoción de níquel con humedales experimentales.

Tabla 3. Eficiencia de remoción de cromo total en el humedal experimental a los 120 minutos

<i>Parámetro</i>	<i>Afluente Humedal</i>	<i>Efluente Humedal</i>	<i>% Remoción</i>
Patrón (Cr) (10 mg/L) (S. Exp. I)	10,00± 0,41	0,12 ±0,04	98,80
Patrón (Cr) (20 mg/L) (S. Exp. I)	20,00± 1,46	0,27 ±0,06	98,65

*S. Exp. I: Sistema Experimental I

Se realizó el ajuste de estos datos determinados experimentalmente a los modelos cinéticos más reportados para la remoción de contaminantes mediante humedales subsuperficiales.

1. Modelo de primer orden: es el modelo más utilizado para estimar la remoción de los contaminantes en estos sistemas (Ventura y col., 2022).
2. Modelo de orden cero: se reporta principalmente para altas concentraciones de los contaminantes en el agua residual (Reed y col., 1995).
3. Modelo de saturación o Monod: según diferentes autores como Reed y Brown (1995), Mitchell y McNevin, (2001), este modelo puede explicar el comportamiento cinético de primer orden para bajas concentraciones y de cero orden para altas concentraciones.
4. Modelo de segundo orden: Reportado principalmente para procesos químicos de remoción (Sikdar y Anderson, (2007); González-Roche y col., (2019)).

La ecuación de la recta y el coeficiente de correlación para dichos modelos se muestran en la Tabla 4, observándose un mejor ajuste para ambas concentraciones utilizadas al modelo de Saturación o Monod. Este modelo es el típico reportado para humedales subsuperficiales (Reed y Brown, (1995); Vymazal (2005); Tan y col., (2021)). El gráfico obtenido para el mismo, se muestra en la Figura 6.

Tabla 4. Modelos cinéticos para el cromo (10 mg/L y 20 mg/L respectivamente)

<i>Modelo cinético</i>	<i>Cromo total</i>	<i>Coefficiente de Correlación</i>
Cero orden $C_o - C_e = k * t$ (4)	$C_o - C_e = 0,0007 * t + 11,217$ (4.1) $C_o - C_e = 0,0017 * t + 19,564$ (4.2)	$R^2 = 0,6702$ $R^2 = 0,8761$
Primer orden $\ln \frac{C_o}{C_e} = -k * t$ (5)	$\ln \frac{C_o}{C_e} = -0,0133 * t - 2,908$ (5.1) $\ln \frac{C_o}{C_e} = -0,0117 * t - 2,9553$ (5.2)	$R^2 = 0,9536$ $R^2 = 0,9880$
Segundo orden $\frac{1}{C_e} - \frac{1}{C_o} = k * t$ (6)	$\frac{1}{C_e} - \frac{1}{C_o} = 0,0248 * t + 4,9211$ (6.1) $\frac{1}{C_e} - \frac{1}{C_o} = 0,0658 * t + 3,087$ (6.2)	$R^2 = 0,6032$ $R^2 = 0,8413$
Saturación $\frac{1}{t} \ln \frac{C_e}{C_o} = \frac{k}{K} + \frac{1}{K} \left(\frac{C_e - C_o}{t} \right)$ (7)	$\frac{1}{t} \ln \frac{C_e}{C_o} = 0,3552 * \left(\frac{C_e - C_o}{t} \right) - 0,0056$ (7.1) $\frac{1}{t} \ln \frac{C_e}{C_o} = 0,2181 * \left(\frac{C_e - C_o}{t} \right) - 0,0083$ (7.2)	$R^2 = 0,9996$ $R^2 = 0,9998$

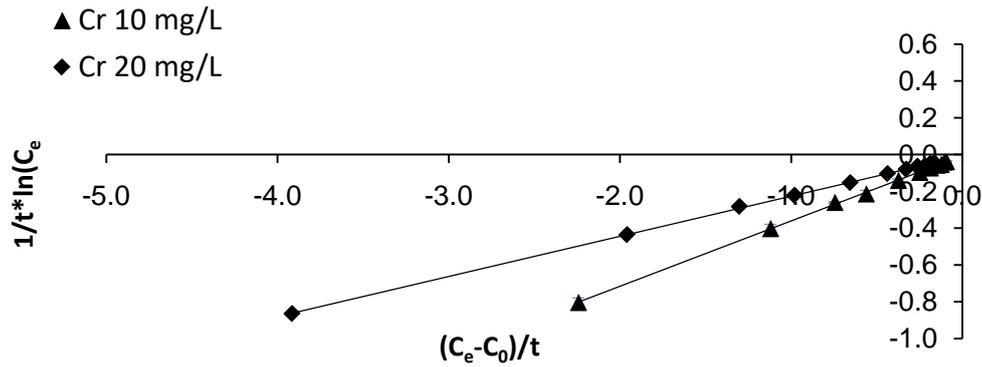


Figura 6. Comportamiento del modelo de Saturación para el cromo

Las constantes obtenidas para la remoción de cromo con el modelo de saturación o Monod, se reportan en la Tabla 5. Estas constantes permiten el diseño de humedales subsuperficiales horizontales para la remoción de cromo a mayor escala para las condiciones específicas en que fueron obtenidas, siendo de gran utilidad para el empleo de estos métodos naturales de tratamiento en industrias que emiten efluentes contaminados con este metal.

Tabla 5. Constantes obtenidas por el modelo de saturación

<i>Cromo</i>	<i>10 mg/L</i>	<i>20 mg/L</i>
Constante de Saturación (K) mg/L	2,8	4,6
Constante cinética (k) mg L ⁻¹ min ⁻¹	-0,02	-0,04

4. CONCLUSIONES

1. La especie *Cyperus Alternifolius* resultó ser la de mayor adaptación a las condiciones de contaminación por cromo en los sistemas experimentales estudiados; evidenciado esto en la elevada retención del metal en las raíces (rizomas), y en el transporte del mismo hacia las hojas de la planta en una cuantía considerable (99,4 mg/kg).
2. Los sustratos de ambos humedales mostraron la fuerte retención del cromo a la fracción residual, así como una biodisponibilidad mayoritaria metal móvil presente en los mismos, lo que reduce considerablemente el riesgo de contaminación por la posible lixiviación del cromo.
3. Existe una influencia marcada de las plantas y los microorganismos (asociados a ellas) en la depuración de cromo para estos sistemas de tratamiento, corroborado con el mejor ajuste al modelo cinético Monod en el humedal y las eficiencias de remoción superiores al 98%.
4. Apoyándose en las constantes cinéticas para realizar el escalado correspondiente, y utilizando la planta *Cyperus Alternifolius* junto con el suelo ferralítico rojo, es posible construir un sistema de tratamiento que remueva el cromo de manera eficiente de aguas residuales asociadas a la industria galvánica y tenerías.

REFERENCIAS

- Alemu, A., Gabbiye, N., & Lemma, B., Application of integrated local plant species and vesicular basalt rock for the treatment of chromium in tannery wastewater in a horizontal subsurface flow wetland system., *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol. 8, No. 4, 2020, pp. 103-940. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103940>
- APHA, AWWA, WEF., *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.*, American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Ed. 21, Washington, DC, 2005.
- Batool, A., & Saleh, T.A., Removal of toxic metals from wastewater in constructed wetlands as a green technology; catalyst role of substrates and chelators., *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Vol. 189, 2020, 109924. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109924>
- González-Roche, Y.M., Pérez-Villar, M.M., Martínez-Nodal, P. de la C., y Pedrozo-Alfonso, J.C., Comportamiento de un humedal subsuperficial en la depuración de aguas oleosas. Cinética de remoción de DQO., *Revista Cubana de Química*, Vol. 31, No 3, 2019, pp. 452-462. <http://scielo.sld.cu/pdf/ind/v31n3/2224-5421-ind-31-03-452.pdf>
- Malaviya, P., Singh, A., & Anderson, T.A., Aquatic phytoremediation strategies for chromium removal., *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, Vol. 19, 2020, pp. 897–944. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09552-y>
- Malyan, S.K., Yadav, S., Sonkar, V., Goyal, V.C., Singh, O., & Singh, R., Mechanistic understanding of the pollutant removal and transformation processes in the constructed wetland system., *Water Environment Research*, Vol. 93, 2021, pp. 1882–1909. <https://doi.org/10.1002/wer.1599>
- Mitchell, C., & McNevin, D., Alternative analysis of BOD removal in subsurface flow constructed wetlands employing Monod kinetics., *Water Research*, Vol. 35, No. 5, 2001, pp. 1295–1303. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00373-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00373-0)
- Morera, L.E., Evaluación de la eficiencia de humedales subsuperficiales para la remoción de níquel en aguas residuales de la industria galvánica., Tesis presentada en opción al Grado Científico de Máster en Seguridad Tecnológica y Ambiental, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba, 2020.
- Nokande, S.E., Razavi, S.M., & Mohammadian, M.A., The capacity of heavy metal remediation by *Cyperus alternifolius*, *Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty, and *Aloe vera* (L.) Burm. f. under industrial and urban wastewater treatment., *Chiang Mai University Journal of Natural Sciences*, Vol. 21, No. 4, 2022, e2022057. <http://dx.doi.org/10.12982/CMUJNS.2022.057>
- Ortega, S.M., del C., y Sánchez, D., Evaluación de la capacidad de remoción de cromo de *Eichhornia crassipes* y *Azolla* sp. con miras a su aplicación como tratamiento complementario de aguas residuales de la industria galvanotécnica., Tesis de grado, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia, 2019. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1137/
- Qureshi, A.A., Kazi, T.G., Baig, J.A., Arain, M.B., & Afridi, H.I., Exposure of heavy metals in coal gangue soil, in and outside the mining area using BCR conventional
-

- and vortex assisted and single step extraction methods. Impact on orchard grass., *Chemosphere*, Vol. 255, 2020, pp. 126-960. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126960>
- Reed, S.C., & Brown, D., Subsurface flow wetlands-a performance evaluation., *Water Environment Research*, Vol. 67, No. 2, 1995, pp. 244-248. <https://doi.org/10.2175/106143095X131420>
- Reed, S.C., Crites, R.W., & Middlebrooks, E.J., *Natural systems for waste management and treatment.*, Edition 2, McGraw-Hill, Inc., New York, USA, 1995, pp. 204-206.
- Rocha, C.S., Rocha, D.C., Kochi, L.Y., Carneiro, D.N.M., Dos Reis, M.V., & Gomes, M.P., Phytoremediation by ornamental plants: a beautiful and ecological alternative., *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 29, No. 3, 2022, pp. 3336-3354. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17307-7>
- Sikdar, A., & Anderson, B., Quantification of complex phosphorus removal reactions occurring within wetland filtration treatment systems., Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Filosofía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Queen, Kingston, Ontario, Canadá, 2007. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=a571bb3d9b33cd83118de8cef75308c8cba2809b>
- Tan, Y.Y., Tang, F.E., & Saptorio, A., Process-based models for nitrogen dynamics in subsurface flow constructed wetlands: A state-of-the-art review., *Environmental Reviews*, Vol. 29, No. 4, 2021, pp. 491-509. <https://doi.org/10.1139/er-2021-0001>
- Terfie, T.A., & Asfaw, S.L., Evaluation of selected wetland plants for removal of chromium from tannery wastewater in constructed wetlands, Ethiopia., *African Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 9, No. 5, 2015, pp. 420-427. <https://doi.org/10.5897/AJEST2014.1793>
- Ventura, D., Rapisarda, R., Sciuto, L., Milani, M., Consoli, S., Cirelli, G., & Licciardello, F., Application of first-order kinetic removal models on constructed wetlands under Mediterranean climatic conditions., *Ecological Engineering*, Vol. 175, 2022, pp. 106-500. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106500>
- Vymazal, J., Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment., *Ecological Engineering*, Vol. 25, No. 5, 2005, pp. 478-490. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.07.010>
- Wang, J., & Guo, X., Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications, and solving methods., *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 390, 2020, pp. 122-156. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122156>
- Younas, F., Bibi, I., Afzal, M., Niazi, N.K., & Aslam, Z., Elucidating the potential of vertical flow-constructed wetlands vegetated with different wetland plant species for the remediation of chromium-contaminated water., *Sustainability*, Vol. 14, No. 9, 2022a, pp. 5-230. <https://doi.org/10.3390/su14095230>
- Younas, F., Niazi, N.K., Bibi, I., Afzal, M., Hussain, K., Shahid, M., Aslam, Z., Bashir, S., Hussain, M.M., & Bundschuh, J., Constructed wetlands as a sustainable technology for wastewater treatment with emphasis on chromium-rich tannery wastewater., *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 422, 2022b, pp. 126-926. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126926>
-

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Lic. Alejandro Boza Abreu. Investigación, redacción - primera redacción.
 - M.Sc. Luis Ernesto Morera Hernández. Redacción - revisión y edición, análisis formal, visualización.
 - Dr.C. Maira María Pérez Villar. Conceptualización, metodología, supervisión, análisis formal.
-