

DOI: 10.24850/j-tyca-2022-04-08

Artículos

## **Diseño de biocolumnas con biomasa seca y triturada de *E. crassipes* para el tratamiento de agua contaminada con Cr (VI)**

### **Design of biocolumns with dry and crushed biomass of *E. crassipes* for the treatment of water contaminated with Cr (VI)**

Uriel Fernando Carreño-Sayago<sup>1</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4801-5725>

<sup>1</sup>Fundación Universitaria los Libertadores, Bogotá DC, Colombia, [ufcarrenos@libertadores.edu.co](mailto:ufcarrenos@libertadores.edu.co)

Autor para correspondencia: Uriel Fernando Carreño-Sayago, [ufcarrenos@libertadores.edu.co](mailto:ufcarrenos@libertadores.edu.co)

## **Resumen**



Muchas investigaciones alrededor del mundo se centran en encontrar procesos y materiales con la suficiente capacidad para descontaminar aguas de una manera eficiente y económica. Con celulosa seca y triturada de la planta *E. crassipes* se realizan experimentos a escala de laboratorio con resultados interesantes debido a su abundancia y eficacia en la retención de contaminantes, pero la implementación en la industria de estos procesos con esta biomasa para el tratamiento de sus efluentes ha sido un poco dispendiosa. El objetivo de esta investigación es diseñar biocolumnas con biomasa seca y triturada de *E. crassipes* para el tratamiento de agua contaminada con Cr (VI), donde se transformó con cloruro de hierro para favorecer la capacidad de intercambio de cationes. Se experimentó el proceso de adsorción a una escala laboratorio en batch para determinar las capacidades de adsorción a través de las isotemas de Langmuir. Con estas capacidades se diseñó el montaje experimental de biocolumnas a una escala piloto de laboratorio y posteriormente se realizó un balance de materia, con el fin de determinar el caudal ideal para el tratamiento de Cromo (VI). Se construyó un sistema de biocolumna con material de *E. crassipes* para el tratamiento eficaz del 85 % de cromo (VI) y una biocolumna con *E. crassipes* con hierro para un tratamiento alrededor del 95 % de cromo presente en el agua. Se concluye que este sistema de tratamiento tiene una confiabilidad alta para remover aguas contaminadas con cromo (VI).

**Palabras clave:** biotratamiento, celulosa, escalado, adsorción.



## Abstract

Much research worldwide focuses on finding processes and materials with enough capacity to decontaminate water efficiently and cheaply. With dry and crushed cellulose from the *E. crassipes* plant, experiments are carrying out on a laboratory scale with interesting results due to its plenty and efficiency in the retention of pollutants, but the implementation in the industry of these processes with this biomass for the treatment of its effluents It has been a bit wasteful. The objective of this research is to design bio-columns with dry and crushed biomass of *E. crassipes* for the treatment of water contaminated with Cr (VI), where it was transforming with iron chloride to favor the cation exchange capacity. The adsorption process was experimenting on a batch laboratory scale to determine the adsorption capacities through the Langmuir isotherms. With these capacities, the experimental set-up of the biofilter was designing on a pilot scale and subsequently, a material balance was carrying out to determine the volume necessary for the efficient removal of Chromium (VI). A biocolumn system with *E. crassipes* material was building for the effective treatment of 85 % of chromium (VI) and a biocolumn with *E. crassipes* with iron for treatment of around 95 % of chromium present in the water. Concluding that this treatment system has high reliability to remove water contaminated with chromium (VI).

**Keywords:** Biotreatment cellulose adsorption, scale.



Recibido: 30/11/2020

Aceptado: 11/06/2021

## Introducción

Hoy en día, el cuidado del agua se ha convertido en una necesidad imperiosa en las políticas ambientales en todo el mundo debido al constante deterioro de las fuentes de hídricas, como ríos, lagunas, humedales, etcétera. Una de las muchas formas en que se está atentando al agua de nuestro planeta es la desafortunada contaminación por parte de las industrias irresponsables con el vertimiento de metales pesados. Estos contaminantes deterioran de manera significativa los ecosistemas acuáticos con metales como el mercurio de la minería, el cromo de las curtiembres y el níquel de la industria de pinturas, entre otros, y causan graves impactos ambientales, sociales y económicos (Zhao *et al.*, 2016) Uno de los metales pesados que más graves impactos ocasiona a la naturaleza y a la salud humana es el cromo, que en su estado de oxidación



(VI) es letalmente cancerígeno para el humano (Sidhu, 2016), por tal motivo se debe tratar de una manera eficaz en las industrias que poseen este metal pesado en sus efluentes.

El tratamiento del agua es un objetivo fundamental en proyectos de sustentabilidad ambiental, y debido a esto se deben investigar, diseñar y desarrollar sistemas de tratamiento nuevos, efectivos y económicos a través de proyectos disruptivos (Sayago, 2020).

Con celulosa se podrían desarrollar sistemas de tratamiento alternos y eficientes debido que es un material en muchos casos de desecho y con la posibilidad de adsorber los contaminantes del agua por medio de sus múltiples sitios activos como OH, NH<sub>2</sub> y COOH, lugares donde se alojan los metales pesados; Li, Ma, Venkateswaran, & Hsiao, 2020; Garba *et al.*, 2020; Yao *et al.*, 2019; Carreño-Sayago & Rodríguez-Parra, 2019).

Una planta nativa, invasiva y de alto impacto es *E. crassipes*, pues brinda una gran cantidad de celulosa debido a su alta tasa de reproducción y por ello es un problema en humedales (Sayago, 2020); Emam, Faraha, Kamal, Gamal, & Basseem, 2020; Carreño-Sayago, 2016). Actualmente, esta biomasa de *E. crassipes* se desperdicia debido a la falta de proyectos de sostenibilidad para su adecuado aprovechamiento en sistemas de tratamiento alternos y económicos de aguas residuales industriales y domésticas (Yin, Zhang, Liu, Li, & Wang, 2016; Pratama, Amalia,

Rohmah, & Saraswati, 2020; Feng *et al.*, 2017; Sayago, 2019; Sayago, 2020).

Una forma de optimizar el proceso de tratamiento con la biomasa de *E. crassipes* es a través de cloruro de hierro por el pronunciado proceso oxidativo que ejerce sobre la materia orgánica creando más sitios activos y aumentando la probabilidad de adsorción de metales pesados (Chen *et al.*, 2019; Pereira *et al.*, 2020).

Para determinar las eficiencias de remoción de metales pesados a través de biomasa, por lo general se llevan a cabo en batch, a escala de laboratorio, obteniendo así las capacidades de adsorción y las cinéticas de adsorción (Lin, Yang, Na, & Lin, 2018). Después estos experimentos deben validarse a través de pruebas a mayor escala, por ejemplo, experimentos en columna fija de flujo continuo, en una disposición similar a la que debe usarse en los tratamientos de los efluentes industriales (Yakubua, Adekolab, & Olatunjib, 2019; Nazir, Tahir, Akhtar, & Abdullah, 2019; Qiao, Li, Li, Liu, & Du, 2020; Xiao *et al.*, 2019; Sayago, 2021).

La presente investigación consta de dos fases. En la primera fase se llevará a cabo la experimentación por lotes (batch) para determinar la capacidad de adsorción de Cr (VI) por *E. crassipes* (EC) y *E. crassipes* modificado con cloruro de hierro (EC + Fe), con el fin de encontrar los parámetros de diseño de la siguiente fase de esta investigación, que consiste en un proceso de balance de materia para determinar las variables de diseño ideales en la construcción de un proceso de

biocolumna en continuo con el mismo material biológico, donde se evaluaron la cinética de adsorción y las capacidades de adsorción.

## Materiales y métodos

La presente investigación se divide en dos secciones, que se desarrollaron en serie. La primera sección consiste en la experimentación a escala de laboratorio (batch), donde se realizó la experimentación por lotes, para encontrar la capacidad de adsorción ( $q$ ) de (EC) y (EC + Fe) en la adsorción de cromo (VI). Después de este proceso, el comportamiento de adsorción se determinará a través de diferentes modelos matemáticos, validando estos resultados con el diseño y construcción de biocolumnas con material adsorbente (EC) y (EC + Fe).

### Uso de *E. crassipes* (EC)



Las plantas de *E. crassipes* se recolectaron en un humedal en el municipio de Mosquera, en las afueras de Bogotá D.C., Colombia; luego se lavaron con agua destilada, separando la raíz del tallo y las hojas. Se recolectaron alrededor de 30 plantas; luego se secaron a 70 °C durante 48 h para eliminar la humedad y moler hasta un diámetro de 0.220 mm. La biomasa pulverizada se tamizó a través de un molino de cuchillas para obtener diferentes tamaños de partículas, en un tamiz número malla 70 (U.S. STD. Sieve).

## Obtención de celulosa modificada con hierro

Biomasa con cloruro de hierro: se mezcló con 1 g de celulosa (*E. crassipes*) y 200 ml de agua desionizada; luego se agregó 1 g de cloruro de hierro FeCl<sub>3</sub> anhidro con un pH de 3.0. Después, la suspensión se colocó en un agitador durante tres horas a 175 rpm y 50 °C para impregnar Fe (III) en la superficie de la celulosa (Lin *et al.*, 2018). Posteriormente, el pH de la suspensión se ajustó a 10.0 para formar oxi-

hidróxido de hierro  $\text{FeOOH}$  en la superficie de la celulosa usando 40 mg/l de NaOH.

## Medición de cromo

Medición de Cr (VI): 20, 50, 100 y 200 mg de cromo/l. Se tomaron muestras en el matraz en cada intervalo de tiempo, analizando la concentración de cromo residual. Se tomaron muestras de 20  $\mu\text{m}$  y luego se llevaron a la centrífuga (KASAI MIKRO 200). En el muestreo, se analizaron alícuotas de la mezcla de reacción para determinar la concentración de cromo residual usando un UV84.

Espectrofotómetro (espectrofotómetro Evolution 300) mediante el monitoreo de cambios en la absorbancia. Todos los procedimientos para la determinación de cromo, para agua y sustratos, se llevaron a cabo mediante la implementación de APHA (procedimiento de la Asociación Estadounidense de Salud Pública) para pruebas estándar (métodos estándar para el examen de agua y aguas residuales).

## Experimento de adsorción en lote

Los experimentos de adsorción por lotes se hicieron en un recipiente de vidrio de 100 ml con agitación constante (agitador IKA Ks 4000) a 20 °C, 250 rpm. Los datos se tomaron cada 20 minutos hasta que se completaron 180 minutos. La muestra tomada es de 20  $\mu$ L. Todos los experimentos se realizaron por triplicado, con un promedio de los valores finales. La solución madre de 1 000 mg/l de Cr (VI) se preparó con agua destilada usando dicromato de potasio. Esta solución madre se usó para preparar las soluciones de prueba de 20, 50, 100, 200, 300 y 600 mg/l Cr (VI). La capacidad de adsorción se determinó suspendiendo 0.3 g de biomasa en 40 ml de solución de prueba de Cr (VI) durante 140 minutos a 200 rpm, tomando muestras cada 20 minutos.

## Experimentación en continuo. Diseño y construcción de biocolumnas a escala piloto



Se construyeron las biocolumnas con embaces plásticos reciclados pet; se cortaron en la parte superior y se unieron para crear un compartimiento. El volumen de la biocolumna se determinó a través de la Ecuación (15), donde se encontró que se necesitaría un espacio de 246 ml para la biomasa de (EC + Fe). Para el cumplimiento de este parámetro se estableció un diámetro de 12.5 cm y una altura de 6.4 cm. Para el cumplimiento de la biocolumna determinada en la Ecuación (15) de 316 ml se estableció una altura de 8 cm y un diámetro de 12.5 cm.

Se dispone de orificios a la entrada para controlar el flujo regulando la velocidad de flujo de 20 ml/min.

Se mantuvo constante la densidad del lecho, en condiciones de temperatura y presión de 20 °C y 1 bar, respectivamente, el sistema dispone de un control de flujo manual, se tomaron muestras cuando pasaron 100 ml por el sistema, la segunda fueron otros 100 ml, y así hasta completar la saturación del sistema; las muestras tomadas se analizaron en el equipo de absorción atómica. El pH de la muestra se mantuvo neutro.

En la Figura 1 se observa un esquema del montaje experimental empleado. Todas las pruebas se hicieron por duplicado para la confiabilidad de los resultados; se calculó el promedio entre los datos obtenidos y con esto el porcentaje de remoción de Cr (VI).



**Figura 1.** Biocolumna utilizada en el proceso de adsorción.

## Resultados

Un concepto especial en el presente artículo es la densidad de la partícula ( $\rho_p$ ); esta densidad se define como la masa diminuta de la partícula ( $m_p$ ) sobre el pequeño volumen de la partícula ( $V_p$ ) ocupado en un espacio. Ecuación (1):

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (1)$$

El volumen de cada partícula, asumiendo que son esféricas. Ecuación (2):

$$V_p = \frac{4\pi r^3}{3} \quad (2)$$

Donde  $r$  es el radio de la partícula; la relación de entre densidades es soportada por el parámetro de diseño de la porosidad  $\varepsilon$ , este parámetro

relaciona la masa de la partícula con el volumen ocupado de la partícula y relaciona la biomasa total con el volumen ocupado. Ecuación (3):

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho b}{\rho p} \quad (3)$$

Donde la densidad  $\rho b$  del medio filtrante de (EC) y (EC + Fe), la masa del (m) y el volumen del adsorbente (V) vienen dados a través de la Ecuación (4):

$$\rho b = \frac{m}{V} \quad (4)$$

Los valores de la porosidad deben estar por encima de 0.5. En los diseños de los filtros biológicos es tan importante el diámetro de la partícula (Iváñez, 2017; Worch, 2012), teniendo una porosidad ( $\varepsilon$ ), donde la densidad de la partícula sea superior a la densidad del contenido de la biomasa.

## Balance de masa en la biocolumna

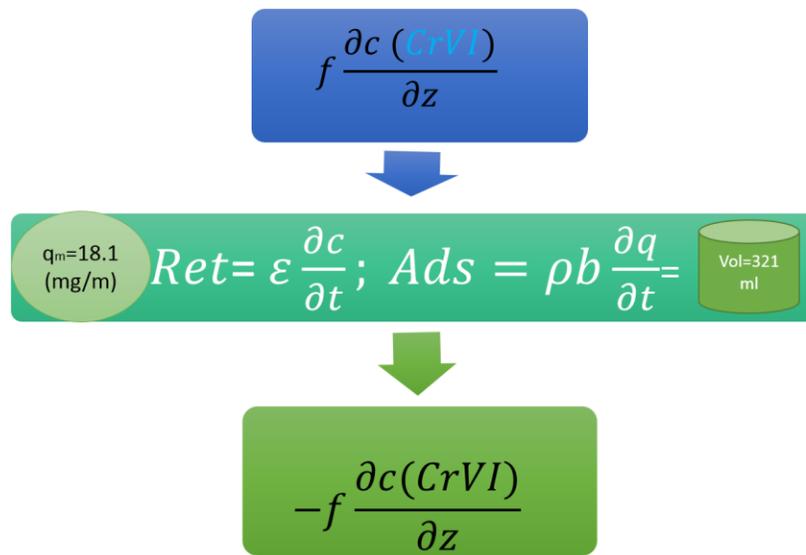


La cantidad adsorbida de metal pesado en la biocolumna es la forma de tratamiento del agua contaminada, siendo un proceso de quimiadsorción. La diferencia entre la entrada de contaminación y salida de la misma junto con la quimisorción es igual a la retención dentro del proceso de tratamiento, representado en la Ecuación (5):

$$\text{Retención} = (\partial) \text{Entrada} - (\partial) \text{Salida} - (\partial) \text{Quimisorción} \quad (5)$$

A través de ecuaciones diferenciales se podrán explicar los procesos representativos de la quimisorción debido a que ocurren cambios ( $\partial$ ) a través del tiempo en la capacidad ( $\partial q$ ), la concentración ( $\partial c$ ) y la porosidad ( $\partial \varepsilon$ ). En la Figura 2 se representan las ecuaciones y el balance de materia realizado para encontrar los parámetros ideales de las biocolumnas. La entrada a la biocolumna se relaciona con la velocidad del agua de entrada ( $f$ ), junto con el volumen en capacidad ( $v$ ), la concentración inicial de Cr (VI), relacionado con la zona longitudinal de la biocolumna ( $z$ ):

$$\text{Entrada} = f \frac{\partial Cr(VI)(t,z)}{\partial z} \quad (6)$$



**Figura 2.** Representación del modelo de la biocolumna en el proceso de tratamiento de Cr (VI).

Quedando la masa de entrada de Cr (VI) por unidad de tiempo:

$$Entrada = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (7)$$

La salida en la biocolumna se asocia con la velocidad del agua ( $f$ ) la concentración final de Cr (VI) se vincula con la zona longitudinal de la biocolumna ( $z$ ):

$$Salida = f \frac{\partial Cr(VI)(t,z)}{\partial z} \quad (8)$$

Quedando la masa de salida de Cr (VI) por unidad de tiempo:

$$Salida = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (9)$$

La diferencia entre las ecuaciones (7) y (9) se reflejará en la ecuación final del proceso de balance volumétrico.

En el proceso de tratamiento en la biocolumna, el término de la adsorción química es determinante, siendo la densidad de la partícula ( $\rho$ ) determinante como variable de diseño del proceso; la capacidad de esta biomasa ( $q$ ) está en función del tiempo:

$$Adsorción = \rho \frac{\partial q(t,z)}{\partial t} = \rho b \frac{\partial q}{\partial t} \quad (10)$$

La retención se representa por la diferencia entre las densidades de la biocolumna y la densidad de la partícula (Ecuación (3)):

$$\text{Retención} = \varepsilon \frac{\partial c(t,z)}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial c}{\partial t} \quad (11)$$

Teniendo en cuenta la Ecuación (5), queda la Ecuación (12) general de balance de masa en la biocolumna:

$$\varepsilon \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial c}{\partial t} - \rho b \frac{\partial q}{\partial t} \quad (12)$$

En el proceso de tratamiento inicial se podría decir que todos estos parámetros de diseño son constantes, quedando la Ecuación (13):

$$\frac{\varepsilon c}{t} = \frac{c}{t} - \frac{mq}{vt} \quad (13)$$

Todo se multiplica por el volumen y por el tiempo, quedando la ecuación de diseño de procesos de biocolumna, donde el tiempo ( $T$ ) será el de la ruptura del proceso, quedando la Ecuación (14):

$$Co\varepsilon V = QCoT - mq \quad (14)$$

Despejando ( $Q$ ), queda la Ecuación (15):



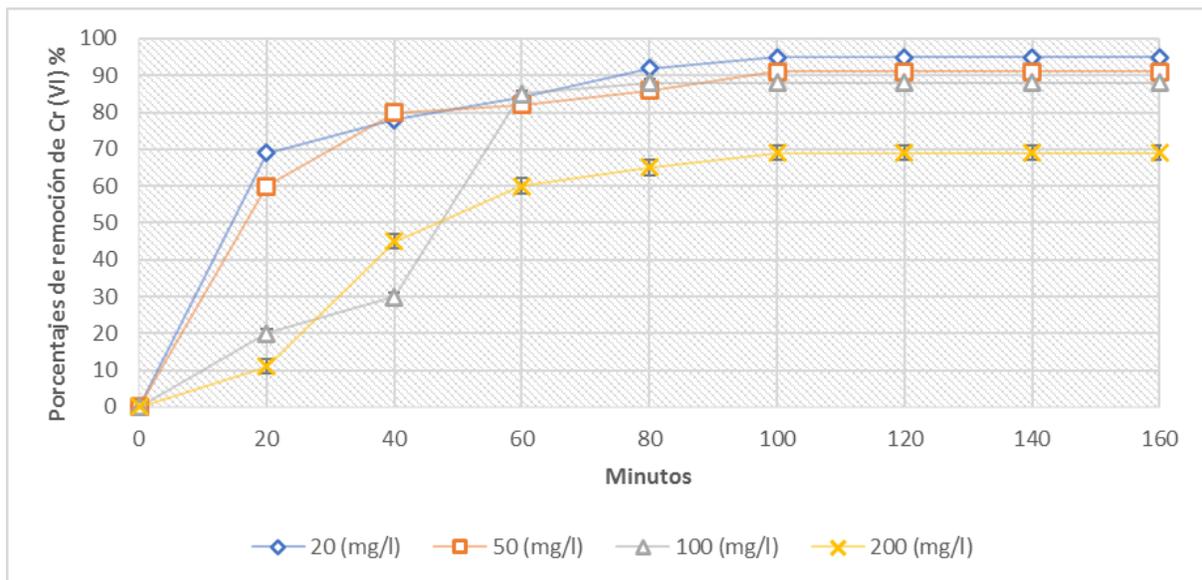
$$Q = \frac{v\varepsilon}{T} + \frac{mq}{CoT} \quad (15)$$

Donde  $Q$  es el caudal que se utilizará ml/min;  $(V)$ , el volumen de diseño del proceso de biocolumna;  $Co$ , la concentración inicial de  $Cr$  del proceso mg/l; se debe calcular  $(\varepsilon)$  con la Ecuación (3), relacionando las densidades de la partícula y la densidad del lecho, junto con el tiempo estipulado de ruptura  $(T)$ ; el parámetro medido en batch será  $(q)$  la capacidad de adsorción para las dos biomasas con unidades de m/m. A través de la Ecuación (15) se encontrará el caudal de diseño ideal para el debido tratamiento.

## Experimentación en batch

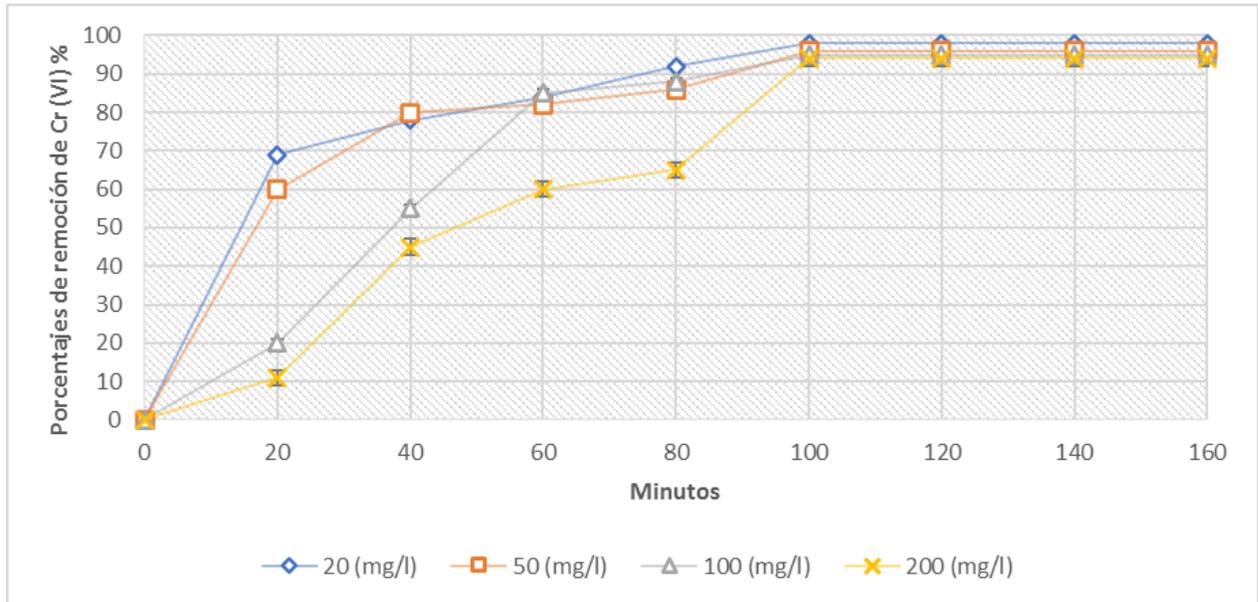
La Figura 3 representa la experimentación de las pruebas realizadas en batch para la biocolumna de solo material vegetal de (EC), mostrando algunas complicaciones para remover cromo (VI) con concentraciones iniciales de 200 mg/l, pues tan sólo removió un 65 % de este material contaminante. Con las concentraciones de 100, 50 y 20 mg/l de  $Cr$  (VI)

iniciales se pudieron observar unas remociones importantes de más del 80 %; se cumplieron las expectativas de remoción.



**Figura 3.** Porcentajes de remoción de celulosa de (EC).

La biocolumna de (EC) bajo esta experimentación es interesante con concentraciones bajas de Cr (VI), tal y como se observó en Sarkar, Rahman y Bhounik (2017), donde las remociones de Cr (VI) fueron relevantes con concentraciones bajas de este metal pesado. La Figura 4 muestra las remociones de (EC + Fe).



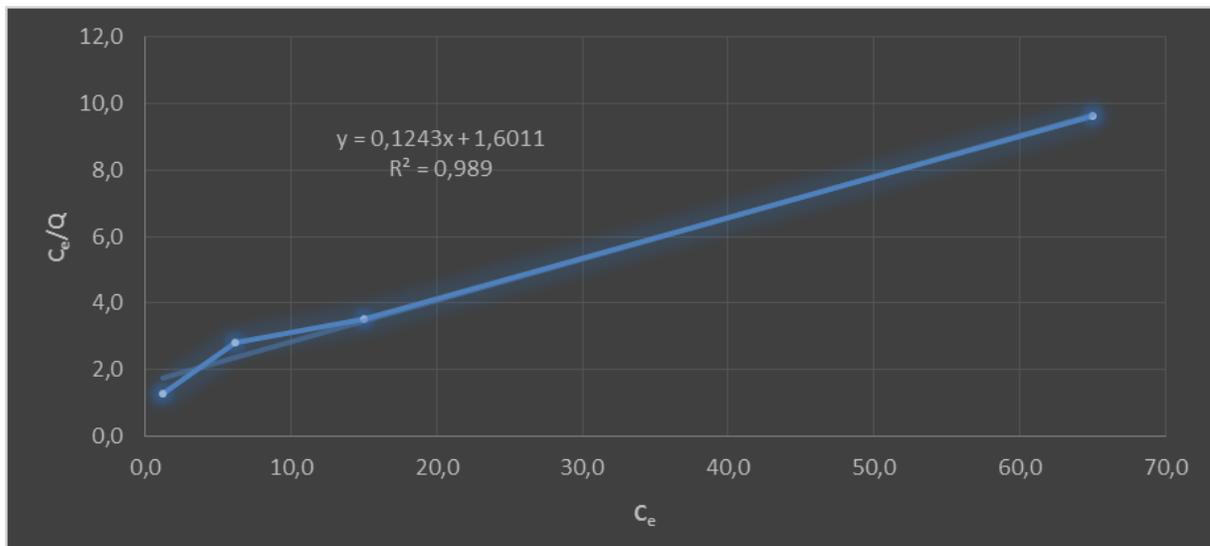
**Figura 4.** Porcentajes de remoción (EC + Fe).

Al contrario de la biocolumna de (EC), las remociones con ayuda de hierro para esta biomasa de *E. crassipes* fueron interesantes debido al aporte de sitios activos de (OH), en donde el cromo se quimiadsorbió (Lin *et al.*, 2018); esto se muestra en las remociones importantes con concentraciones iniciales de 200 mg/l, alcanzando una remoción de más del 95 %. También bajo concentraciones de 100, 50 y 20 mg/l se mostraron eficiencias superiores al 95 % en la quimisorción de este metal pesado.

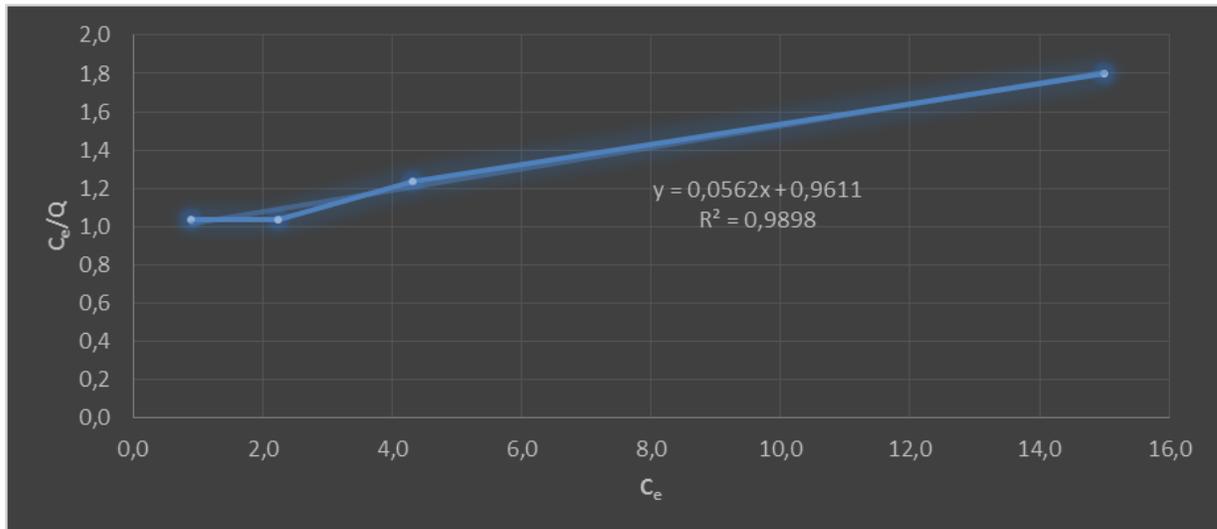
## Isotermas de adsorción

Hubo cuatro puntos iniciales diferentes, donde fue la concentración inicial de 20, 50, 100 y 200 mg/l de cromo (VI). Cada proceso arrojó cuatro concentraciones finales ( $C_e$ ), y cuatro capacidades finales ( $q$ ); con estos parámetros se obtendrán las isotermas de Langmuir (Yi et al., 2016; El-Zawahry, Abdelghaffar, Abdelghaffar, & Hassabo, 2016).

Las isotermas de adsorción de Langmuir se muestran en la Figura 5 y Figura 6; la gráfica de  $C_e/Q$  vs.  $C_e$  para la adsorción de Cr (VI) representa la ecuación de Langmuir; con esta gráfica se pudo obtener la capacidad máxima ( $q$ ) de adsorción de estas biomazas.



**Figura 5.** Isotermas de Langmuir de (EC).



**Figura 6.** Isotermas de Langmuir del experimento (EC + Fe).

Se puede observar un ajuste representativo del 0.989  $R^2$ . Tomando como referencia la Ecuación (16) de Langmuir linealizada:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m} C_e + \left(\frac{1}{q_m B}\right) \quad (16)$$

La variable de capacidad máxima ( $q_m$ ) es el parámetro de diseño de capacidad máxima de retención de cromo (VI) por parte de la biomasa de (EC) de 8.1 mg/l; resultados afines se vieron en los experimentos

reportados por Li, Liu, Na, Lu y Liu (2013); Lin *et al.* (2018), y Zhang *et al.* (2015), donde utilizó biomasa de *E. crassipes* sin modificación. En la Figura 5 se muestran las isotermas de Langmuir del experimento de la biomasa (EC + Fe).

Teniendo en cuenta la Figura 6, la capacidad máxima ( $q_m$ ) de la celulosa de (EC + Fe) es 18.2 mg/g. En la Tabla 1 se muestran los parámetros  $q_m$  y  $B$  de las biomazas experimentadas.

**Tabla 1.** Resumen de los parámetros de Langmuir.

	$q_m$ (mg/m)	$B$
EC	8.1	0.077
EC + Fe	18.2	0.052

En comparación de EC y EC + Fe se puede concluir que esta última tiene una capacidad casi de 2.2 veces más grande que la biomasa de (EC); el hierro oxidó la materia orgánica creando más grupos activos, como (OH), favoreciendo el alojamiento del Cr (VI) en la biomasa de (EC + Fe).

Con los valores de capacidad de EC + Fe, y CE de 18.2 y 8.1 mg/g, respectivamente, se procederá a diseñar y desarrollar una biocolumna con estos materiales.

## Experimentación en continuo

Con la Ecuación (1) se obtiene la densidad de la partícula. El tamaño del diámetro por partícula tanto para EC y EC + Fe es de 0.220 mm. Con este valor se calculará el volumen de cada partícula, asumiendo que son esféricas, a través de la Ecuación (4). Resolviendo esta ecuación se obtiene el volumen ocupado por la partícula de EC y EC + Fe, que es de 0.05 mm<sup>3</sup> de la esferita de partícula de EC y EC + Fe.

Tomando el peso de la diminuta partícula de EC y EC + Fe, arrojó un valor aproximado de 0.015 g, siendo la densidad de la partícula de 2 mg/mm<sup>3</sup>.

La biomasa utilizada en el proceso de adsorción será de 50 g, para la biocolumna de EC + Fe, y 60 g para la biocolumna de EC, donde la altura relacionada es de 8 cm, con un diámetro de 12.5 cm.

Con la Ecuación (2) se obtiene el volumen total de la biomasa ocupada en la biocolumna, alrededor de 175 cm<sup>3</sup>, siendo su densidad de

material adsorbente ( $\rho$ ) de EC + Fe de  $0.85 \text{ g/cm}^3$ ; para ambos procesos se tiene una biomasa de 60 g y posee una densidad de  $0.95 \text{ g/cm}^3$ .

La relación entre densidades es soportada por el parámetro de diseño de la porosidad ( $\varepsilon$ ); este parámetro relaciona la masa de la partícula con el volumen ocupado de la partícula, y asocia la biomasa total con el volumen ocupado (Ecuación (3)):

$$\varepsilon = 1 - \frac{0.75}{2} = 0.6$$

Los valores de la porosidad deben estar por encima de 0.5. En los diseños de los filtros biológicos es importante el diámetro de la partícula (Iváñez, 2017; Worch, 2012) teniendo una porosidad ( $\varepsilon$ ) donde la densidad de la partícula sea superior a la densidad del contenido de la biomasa. Esto se consigue con el diámetro de la partícula bien finito inferior a 0.220 mm.

A través de la Ecuación (15) se obtiene el volumen teórico de la biocolumna para la remoción y eficiencia de la biocolumna:

$$Q = \frac{250 \text{ ml} * 0.6}{92 \text{ min}} + \frac{50 \text{ g} * 18.1 \frac{\text{mg}}{\text{g}}}{92 \text{ min} * 0.5 \frac{\text{mg}}{\text{ml}}}$$

$Q$  = caudal de diseño, 21 ml/min.

$V$  = 250 ml.

$m$  = 50 g.

$\varepsilon$  = 0.6 (obtenida en la Ecuación (3)).

$q$  = capacidad de adsorción de EC + Fe, 18.1 mg/g.

$C_0$  = 0.5 mg/ml.

$T_b$  = 92 minutos.

El caudal ( $Q$ ) de 20 ml/min es la cantidad de agua que soportaría la biocolumna para un adecuado tratamiento, ya que de ésta depende la porosidad ( $\varepsilon$ ) y la capacidad de adsorción ( $q$ ), junto con todas las variables de diseño relacionadas en la ecuación. La capacidad de adsorción encontrada en batch ayudó a encontrar el volumen para que el tratamiento tenga una eficacia en el cumplimiento de normatividad colombiana.

Para la biomasa de EC se calcula al igual que EC + Fe, pero con capacidad de adsorción de 8.1 mg/g; debido en comparación con la biomasa de EC + Fe se debe aumentar la masa y, por ende, el volumen del sistema se reemplaza en los términos en la Ecuación (15), arrojando un caudal de:

$$Q = \frac{300 \text{ ml} * 0.6}{55 \text{ min}} + \frac{60 \text{ g} * 8.2 \frac{\text{mg}}{\text{g}}}{55 \text{ min} * 0.5 \frac{\text{mg}}{\text{ml}}}$$

$Q$  = caudal de diseño, 26 ml/min.

$V$  = 300 ml.

$m$  = 60 g.

$\varepsilon$  = 0.6 (obtenida en la Ecuación (3)).

$q$  = capacidad de adsorción de EC + Fe, 8.2 mg/g.

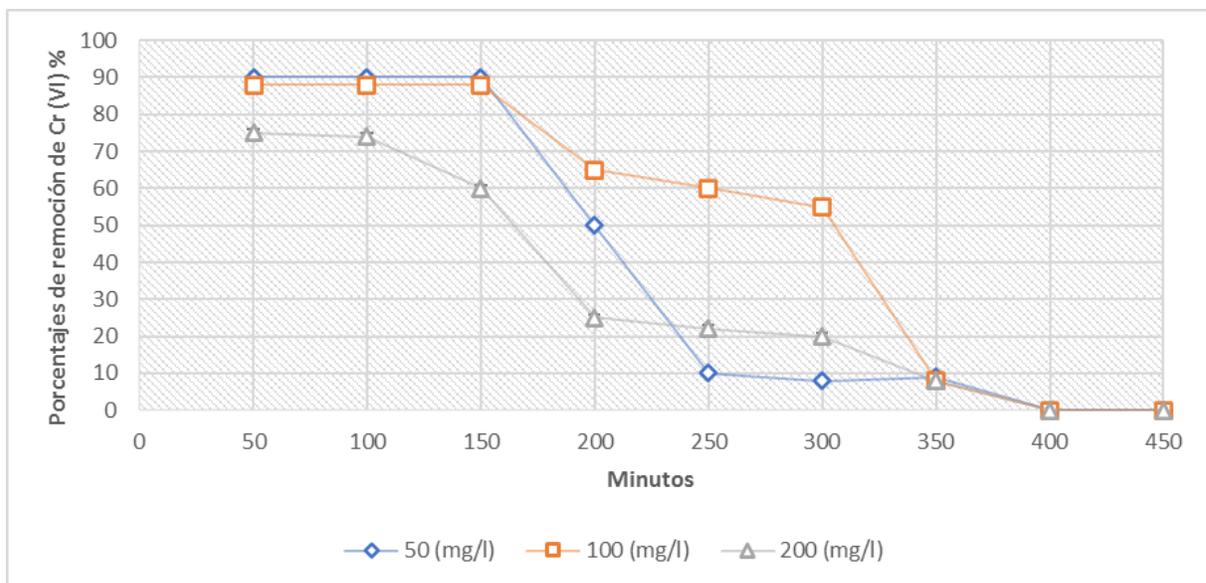
$C_0$  = 0.5 mg/ml.

$T_b$  = 55 minutos.

Para esta biocolumna se demoraría un poco más el tratamiento en comparación con la biocolumna de EC + Fe; este tratamiento posee 300 ml y una masa de 60 g para el adecuado tratamiento del agua contaminada con Cr (VI) debido a que esta biomasa tiene una capacidad de adsorción más baja. El tiempo de ruptura teórico para la biomasa de (EC) es de 55 minutos; por su mayor capacidad, la biomasa de EC + Fe puede soportar más minutos antes de su posible saturación, por este motivo se utilizará más biomasa de EC. Después de saber el valor teórico de los caudales, se establecieron las condiciones del montaje para el desarrollo de estas biocolumnas.

## Proceso experimental en continuo

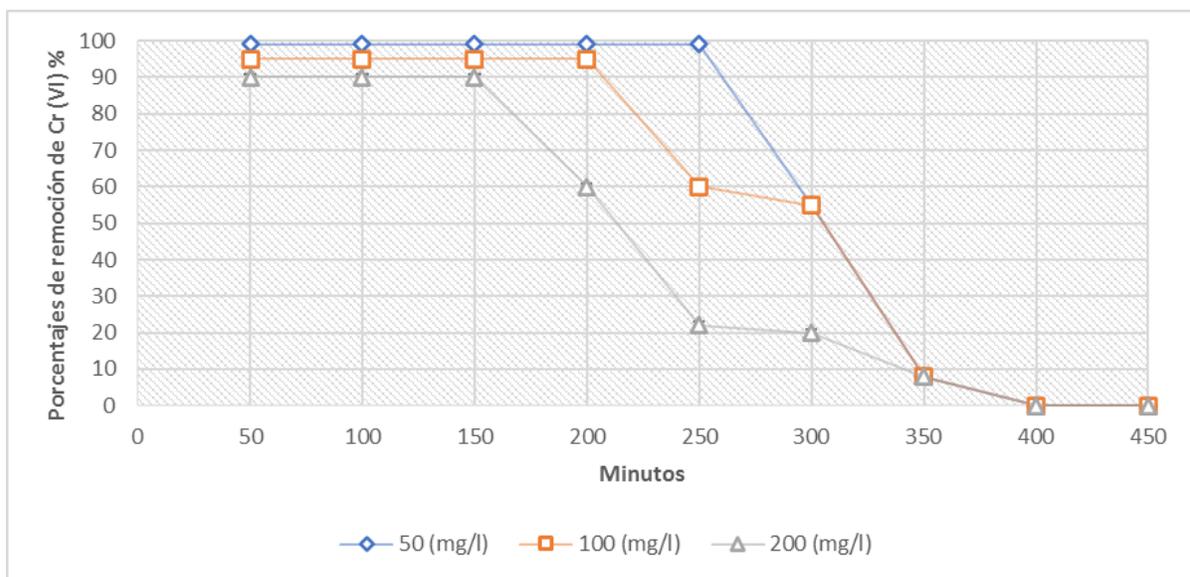
Las remociones se muestran en la Figura 7: biocolumna con biomasa de EC y EC + Fe. Se realizaron pruebas con 20, 50 y 100 mg/l iniciales de Cr (VI).



**Figura 7.** Porcentajes de remoción de EC.

En los procesos de remoción con 100 mg/l para la biocolumna de (EC) empezaron remociones alrededor de 75 % de Cr (VI), siendo su punto de ruptura el minuto 55, cuando llevaba 300 ml; por el contrario, en la biocolumna de biomasa (EC + Fe) con la misma concentración inicial, el punto de ruptura fue cuando llevaba 400 ml de tratamiento en el minuto 100, con remociones alrededor de 90 %.

El rendimiento de la biocolumna (EC) de 50 mg/l de Cr(VI) iniciales es donde empezaron rendimientos alrededor del 85 %, siendo sus puntos de ruptura alrededor del minuto 100, tratando alrededor de 300 ml de agua. En la Figura 8 se encuentra la biocolumna EC + Fe.



**Figura 8.** Porcentajes de remoción de EC + Fe.

La biocolumna de EC + Fe removió alrededor de 95 % con 50 mg/l iniciales, tratando alrededor de 500 ml de agua. También fue evidente la optimización de la biocolumna con concentraciones iniciales de 20 mg/l, donde la biomasa con EC + Fe estuvo por encima del 96 % de remociones de cromo, tratando alrededor del litro de agua, teniendo su punto de ruptura en el minuto 250. También en la Figura 8 se puede apreciar que en el experimento de 50 y 20 mg/l, las concentraciones de Cr (VI) terminaron por debajo de 1 mg/l, cumpliendo con la normatividad Resolución 3957: "la norma técnica, para el control y manejo de los vertimientos realizados a la red de alcantarillado público en el Distrito Capital" (Normatividad la Resolución 3957, 2009). El tratamiento con hierro (Fe) significó que el rendimiento del filtro se optimizará en comparación con EC debido a una demora del punto de ruptura de todas las concentraciones iniciales, señalando que la biomasa utilizada en la biocolumna fue la indicada para el tratamiento; resultados afines se vieron en los experimentos reportados Lin *et al.* (2018).

## Discusiones



La biocolumna con CE es una alternativa económica para la industria con efluentes de metales pesados y otros contaminantes por debajo de 500 mg/l. Este tratamiento a escala piloto, para tratar alrededor de 10 litros, tendría un costo aproximado de tres dólares según Sayago *et al.* (2020).

La biocolumna con modificación con hierro se puede utilizar en la industria donde la contaminación de sus efluentes es muy alta, por encima de 500 mg/l; aunque este biofiltro es más difícil de desarrollar, puede tratar contaminantes más complejos. La biocolumna a escala piloto, para tratamiento de casi 10 litros, tendría un costo aproximado de 3.5 dólares. según Sayago *et al.* (2020).

Se debe continuar con la investigación, determinando técnicas de elución del cromo, con el fin de optimizar el rendimiento de la biomasa de *E. crassipes*.

La biomasa saturada de cromo (VI) se dispuso finalmente como residuo peligroso; se recomienda continuar con proyectos sostenibles de producción de biocombustibles con este material, aprovechando su cantidad de celulosa.

Se desarrolló la Ecuación (15) para el diseño de sistemas de tratamiento con parámetros característicos de tratamiento de aguas residuales industriales.

## Conclusiones

Se realizó experimentación batch a escala laboratorio para determinar el parámetro de capacidad de la biomasa de *E. crassipes* (EC) y *E. crassipes* con hierro (EC + Fe), encontrándose que esas biomásas tienen 8.1 y 18.2 mg/g, respectivamente. Estos parámetros se utilizaron en el diseño del modelo de balance de materia.

Se desarrolló a través del modelo de balance de materia una biocolumna a escala piloto de laboratorio, arrojando la capacidad de caudal de 21 ml/min con la biomasa de EC + Fe con una capacidad en volumen de 250 ml y una biomasa de 50 g de este prototipo, eliminando alrededor del 95 % de Cr (VI) presente en 1 l de agua.

Para la biocolumna de EC, el modelo arrojó un tratamiento con un caudal de 26 ml/min, a través de una capacidad de volumen de 300 ml y 60 g, removiendo alrededor del 85 % del Cr (VI) presente en 1 l de agua, determinando que estos sistemas de tratamiento tienen una confiabilidad alta para remover aguas contaminadas con Cr (VI).

## Referencias



- Carreño-Sayago, U. F., & Rodríguez-Parra, C. (2019). *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms: An integrated phytoremediation and bioenergy system. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales*, 25(3).
- Carreño-Sayago, U. F. (2016). Diseño y evaluación de un biosistema de tratamiento a escala piloto de aguas de curtiembres a través de la *Eichhornia crassipes*. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 18(2), 74-81.
- Chen, L., Li, F., Wei, Y., Li, G., Shen, K., & He, H. J. (2019). High cadmium adsorption on nanoscale zero-valent iron coated *Eichhornia crassipes* biochar. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1), 589-594.
- El-Zawahry, M. M., Abdelghaffar, F., Abdelghaffar, R. A., & Hassabo, A. G. (2016). Equilibrium and kinetic models on the adsorption of Reactive Black 5 from aqueous solution using *Eichhornia crassipes*/chitosan composite. *Carbohydrate Polymers*, 136, 507-515.
- Emam, A. A., Faraha, S. A. A., Kamal, F. H., Gamal, A. M., & Basseem, M. (2020). Modification and characterization of Nano cellulose crystalline from *Eichhornia crassipes* using citric acid: An adsorption study. *Carbohydrate Polymers*, 240, 116202.
- Feng, W., Xiao, K., Zhou, W., Zhu, D., Zhou, Y., Yuan, Y.,..., & Zhao, J. (2017). Analysis of utilization technologies for *Eichhornia crassipes*

- biomass harvested after restoration of wastewater. *Bioresource Technology*, 223, 287-295.
- Garba, Z. N., Lawan, I., Zhou, W., Zhang, M., Wang, L., & Yuan, Z. (2020). Microcrystalline cellulose (MCC) based materials as emerging adsorbents for the removal of dyes and heavy metals—A review. *Science of the Total Environment*, 717, 135070.
- Ivárez, M. (2017). *Diseño de un sistema de adsorción para la remoción de fenol presente en disolución acuosa* (doctoral dissertation). Universitat Politècnica de València. Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Valencia, España. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10251/91781>
- Li, C., Ma, H., Venkateswaran, S., & Hsiao, B. S. (2020). Highly efficient and sustainable carboxylated cellulose filters for removal of cationic dyes/heavy metals ions. *Chemical Engineering Journal*, 389, 123458.
- Li, X., Liu, S., Na, Z., Lu, D., & Liu, Z. (2013). La adsorción, la concentración, y la recuperación de iones de metales pesados acuosas con el polvo de raíz de *Eichhornia crassipes*. *Ingeniería Ecológica*, 60, 160-166.
- Lin, S., Yang, H., Na, Z., & Lin, K. (2018). A novel biodegradable arsenic adsorbent by immobilization of iron oxyhydroxide (FeOOH) on the root powder of long-root *Eichhornia crassipes*. *Chemosphere*, 192, 258-266.

- Nazir, M. S., Tahir, Z., Akhtar, M. N., & Abdullah, M. A. (2019). Biosorbents and composite cation exchanger for the treatment of heavy metals. In: *Applications of ion exchange materials in the environment* (pp. 135-159). Cham, Germany: Springer.
- Normatividad la Resolución 3957. (2009). *La norma técnica, para el control y manejo de los vertimientos realizados a la red de alcantarillado público en el Distrito Capital*. Recuperado de <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=37051>
- Pereira, A. R., Soares, L. C., Teodoro, F. S., Elias, M. M. C., Ferreira, G. M. D., Savedra, R. M. L.,..., & Gurgel, L. V. A. (2020). Aminated cellulose as a versatile adsorbent for batch removal of As (V) and Cu (II) from mono-and multicomponent aqueous solutions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 576, 158-175.
- Pratama, J. H., Amalia, A., Rohmah, R. L., & Saraswati, T. E. (May, 2020). The extraction of cellulose powder of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) as reinforcing agents in bioplastic. AIP Publishing LLC. *AIP Conference Proceedings*, 2219(1), 100003.
- Qiao, L., Li, S., Li, Y., Liu, Y., & Du, K. (2020). Fabrication of superporous cellulose beads via enhanced inner cross-linked linkages for high efficient adsorption of heavy metal ions. *Journal of Cleaner Production*, 120017.

- Sarkar, M., Rahman, A. K. M. L., & Bhoumik, N. C. (2017). Remediation of chromium and copper on water hyacinth (*E. crassipes*) shoot powder. *Water Resources and Industry*, 17, 1-6.
- Sayago, U. F. C. (2021). Design and development of a biotreatment of *E. crassipes* for the decontamination of water with chromium (VI). *Scientific Reports*, 11(1), 1-16.
- Sayago, U. F. C. (2020). *Buchón de agua (Eichhornia crassipes): impulsor de la fitorremediación*. Bogotá DC, Colombia: Editorial Los Libertadores.
- Sayago, U. F. C. (2019). Design of a sustainable development process between phytoremediation and production of bioethanol with *Eichhornia crassipes*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(4), 221.
- Sidhu, G. P. S. (2016). Heavy metal toxicity in soils: Sources, remediation technologies and challenges. *Advances in Plants & Agriculture Research*, 5(1), 1-2.
- Worch, E. (2012). *Adsorption technology in water treatment: Fundamentals, processes, and modeling*. Berlin, Germany: Walter de Gruyter.
- Xiao, Y., Liu, Y., Wang, X., Li, M., Lei, H., & Xu, H. (2019). Cellulose nanocrystals prepared from wheat bran: Characterization and

- cytotoxicity assessment. *International Journal of Biological Macromolecules*, 140, 225-233.
- Yakubua, A., Adekolab, F. A., & Olatunjib, G. A. (2019). Batch and continuous fixed-bed column adsorption of Cd (II) from aqueous solution and industrial effluent by functionalized nano-structured cellulose particles. *Desalination and Water Treatment*, 162, 313-330.
- Yao, M., Wang, Z., Liu, Y., Yang, G., & Chen, J. (2019). Preparation of dialdehyde cellulose grafted graphene oxide composite and its adsorption behavior for heavy metals from aqueous solution. *Carbohydrate Polymers*, 212, 345-351.
- Yi, Z. J., Yao, J., Chen, H. L., Wang, F., Yuan, Z. M., & Liu, X. (2016). Uranium biosorption from aqueous solution onto *Eichhornia crassipes*. *Journal of Environmental Radioactivity*, 154, 43-51.
- Yin, T., Zhang, X., Liu, X., Li, B., & Wang, C. (2016). Cellulose-based aerogel from *Eichhornia crassipes* as an oil superabsorbent. *RSC Advances*, 6(101), 98563-98570.
- Zhang, F., Wang, X., Yin, D., Peng, B., Tan, C., Liu, Y.,..., & Wu, S. (2015). Efficiency and mechanisms of Cd removal from aqueous solution by biochar derived from water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Journal of Environmental Management*, 153, 68-73.

Zhao, L., Cao, X., Zheng, W., Scott, J. W., Sharma, B. K., & Chen, X. (2016). Copyrolysis of biomass with phosphate fertilizers to improve biochar carbon retention, slow nutrient release, and stabilize heavy metals in soil. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(3), 1630-1636.