2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

DOI: 10.24850/j-tyca-2021-03-01

Artículos

Diseño y validación de un sistema de adsorción de cromo hexavalente en efluentes de curtiembre usando cáscara de naranja y salvado de trigo

Design and validation of a system for hexavalent chromium adsorption in tannery effluents using orange peel and wheat bran

Edinson Fabián Monroy-Avila[1], ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3757-9442

Monika Cristina Echavarría-Pedraza[2], ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7684-5673

Dora Luz Gómez-Aguilar[3], ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5722-9063

[1]Universidad Manuela Beltrán, Magister en Tecnologías para el Manejo de Aguas y Residuos, Bogotá, Colombia, ingenierofabianm@gmail.com

[2] Universidad Manuela Beltrán, Docente de Ingeniería Ambiental, Bogotá, Colombia, monikepe@hotmail.com

[3] Universidad Pedagógica de Colombia, Docente Universidad Pedagógica de Colombia, Bogotá, Colombia, dgomez@pedagogica.edu.co

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Autor para correspondencia: Edinson Fabián Monroy-Avila, ingenierofabianm@gmail.com

Resumen

Este estudio se ha centrado en proponer un sistema de adsorción a escala piloto capaz de remover las altas concentraciones de cromo hexavalente presentes en las aguas residuales del proceso de curtido que son vertidos directamente al río Bogotá. Se realizó la evaluación de dos bioadsorbentes en agua sintética utilizando bioadsorbentes de naranja y trigo. Para ello, en el laboratorio y mediante el floculador (test de jarras) y técnicas de colorimetría se validó la capacidad de remoción de la naranja y el trigo, con un diámetro de 850 µm a pH 1, pH 3 y pH 5 en agua sintética; de allí se seleccionaron las condiciones y el adsorbente más eficiente para posteriormente aplicarlo en aguas residuales; finalmente se diseñó y validó el sistema de adsorción a escala piloto que simulara las condiciones del laboratorio. Los resultados muestran que en el agua sintética las condiciones más eficientes de los absorbentes fueron a pH 1 y pH 3 para la naranja con una remoción del 68 % y el trigo de 33 %, respectivamente. Al momento de aplicar el adsorbente de naranja a pH 1 en aguas residuales en el floculador, la remoción fue del 37 % de Cr (VI), mientras que la validación del sistema arrojó una eficiencia media del 58 % de resultados significativos para la implementación del sistema en el sector de las curtiembres.

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Palabras clave: curtiembre, adsorción, remoción de contaminantes, compuestos de cromo

Abstract

This study has focused on a pilot system. A pilot capable of removing the high amounts of hexavalent chromium present in the waters of the tanning process that are dumped directly into the Bogotá River. The evaluation of bioadsorbents in synthetic water was carried out with orange and wheat bioadsorbents. To do this in the laboratory and using the Flocculator (Jar Test) and Colorimetry Techniques, the removal capacity of orange and wheat with a diameter of 850 µm at pH 1, pH 3 and pH 5 in synthetic water is validated; in this way, the conditions were selected and the adsorbent was more applied in the wastewater; finally, a pilot scale biosystem was designed and validated that simulated the laboratory conditions. The results shown in synthetic water are the most efficient conditions of the absorbents: pH 1 and pH 3 for orange with a removal of 68 % and wheat 33 %, respectively. At the time of applying the orange adsorbent at pH 1 in wastewater in the flocculator, the removal was 37 % Cr (VI), while the validation of the biosystem yielded an average efficiency of 58 % significant results for the implementation of the biosystem in the tanneries sector.

Keywords: Tanning, adsorption, removal of contaminants, chromium compounds

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Recibido: 06/08/2019

Aceptado: 27/07/2020

Introducción

El proceso de curtido es la transformación de las pieles microbiológicamente inestables en cuero estable mediante la reticulación y el secado parcial de las proteínas (Vilardi, Ochando, Stoller, Verdone, & Palma, 2018); para ello se emplean agentes curtientes, como sales de cromo, que tienen el potencial de estabilizar las fibras proteicas de la piel, mediante la formación de complejos tipo quelatos que evitan la descomposición y el deterioro del cuero (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2010).

Según Arias (2013), las industrias en Colombia dedicadas a la actividad de curtido se encuentran en su mayoría en el norte de Cundinamarca, municipios de Chocontá y Villapinzón, donde se concentra el 81.3 % de las curtiembres que existen en todo Colombia (Escobar, Ubaque, & Bohórquez, 2012); este sector industrial ocasiona problemas sociales, económicos y ambientales de gran magnitud (Barba, Ballestero, Patiño, & Callejas, 2013). El más fuerte es la contaminación del recurso hídrico con sustancias químicas altamente tóxicas (CAR, 2014).

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

La generación de cromo se da en el proceso unitario del curtido. Una vez que éste entra en contacto con la materia orgánica presente en las aguas residuales se oxida de cromo trivalente (Cr III) a cromo hexavalente (Cr VI), dependiendo del pH de la solución, la concentración total de Cr, y la presencia de compuestos oxidantes y reductores (Jobby, Jha, Yadav, & Desai, 2018); es altamente tóxica para la biota acuática y la población que utiliza el recurso aguas abajo (Barba *et al*., 2013). De este modo, las altas concentraciones de Cr VI en los efluentes industriales de las curtiembres (Hongrui *et al*., 2017) y la falta de tratamientos eficientes (Artuz, Martinez, & Morales, 2011) representan riesgos muy altos para la salud humana y el ecosistema del río Bogotá (Díaz & Granada, 2016; Castillo *et al*., 2004).

De acuerdo con Tejada-Tovar, Villabona-Ortiz y Ruiz-Rangel (2012), entre las tecnologías más eficientes para remover metales pesados se destacan la precipitación, ultrafiltración, ósmosis inversa, intercambio iónico, electrodiálisis, oxidación, reducción, filtración, tratamiento electroquímico y tecnologías de membrana, entre otras (Garces & Coavas, 2012), con eficiencias cercanas al 99 %; sin embargo, y a pesar de su eficiencia, el alto costo de instalación y mantenimiento de estas tecnologías hace cada vez más compleja la implementación en pequeñas y medianas empresas, situación que conlleva a que cada día las curtiembres sigan generando vertimientos altamente contaminantes y las autoridades ambientales tengan que sellarlas.

Sin embargo, en los últimos años han surgido alternativas viables y amigables con el ambiente, entre ellas se destacan la fitorremediación,

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

biorremediacion, desorción térmica y bioadsorción (Ocampo-Barrero, 2012); esta última es de las más sencillas, pues permite a ciertos materiales de origen natural retener y concentrar en la superficie sustancias y compuestos de diversa naturaleza química presentes en disoluciones acuosas, incluyendo metales pesados (Izquierdo, 2010).

Según Jobby *et al*. (2018), los compuestos de Cr (VI) son oxidantes fuertes que se reducen con facilidad a Cr (III) en presencia de donantes de electrones orgánicos o inorgánicos, lo cual favorece la remediación mediante métodos físicos, químicos y/o biológicos. Un ejemplo de ello son las investigaciones que emplean la técnica de la bioadsorción de cromo VI, entre las que cabe mencionar la investigación realizada por Singh, Hasan, Talat, Singh y Gangwar (2009), quienes usaron salvado de trigo; en el estudio adelantado por González *et al*. (2010) se emplearon soluciones con cáscara de naranja; la investigación de Singha, Kumar, Bhattacharya y Das (2011) buscó medir la eliminación de iones Cr (VI) a partir de soluciones acuosas; y por último, la investigación de Garces y Coavas (2012) evaluó la cáscara de naranja modificada con quitosano para la remoción de Cr.

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue evaluar el potencial de remoción de la naranja y el salvado de trigo en solución acuosa y en aguas residuales de curtiembre, con el fin de diseñar y evaluar un sistema viable de implementación en la industria de las curtiembres.

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Materiales y métodos

Las aguas residuales se recolectaron en la curtiembre Rodríguez Melo, ubicada en el kilómetro 66 en la zona industrial, entre el municipio de Villapinzón y Chocontá.

El diseño experimental utilizado fue 2k, siendo el diseño que describen los experimentos más adecuados para conocer el efecto que tienen k factores sobre una respuesta y descubrir si interaccionan entre sí. Así, se trabajaron dos factores variables, que fueron pH con tres niveles (1, 3 y 5), y tipo de adsorbente con dos niveles (cáscara de naranja, salvado de trigo); los factores constantes fueron el agua residual, diámetro del adsorbente, tiempo de mezcla y velocidad en la agitación.

Los bioadsorbentes utilizados fueron salvado de trigo y cáscara de naranja; el primero se obtuvo en el comercio y se tamizó a 850 micras; mientras que la cáscara de naranja se obtuvo mediante la recolección de frutos similares en color y especie, luego se limpiaron, se secaron a 105 °C durante 12 horas en el horno, y posteriormente se trituraron y se tamizaron a 850 micras.

Los análisis de cromo hexavalente se desarrollaron en los laboratorios de química de la Universidad Manuela Beltrán mediante la técnica de colorimétrica de difenilcarbazida.

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 12(3), 1-31. DOI: 10.24850/j-tyca-2021-03-01

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Para preparar el agua sintética con una concentración de 1 000 ppm (mg*$L^{-1)}$ de iones de Cr (VI) se necesitó emplear 0.56 g de $K_2Cr_2O_7$, que se diluyó en 0.2 litros de agua destilada; de esta solución se prepararon cinco patrones por cada escala de pH en las concentraciones de 0.2, 0.5, 1, 1.5 y 2 ppm, que se acidificaron con H_2SO_4 1 N para obtener los pH 1 - 3 y 5; luego se adicionaron 0.5 ml de difenilcarbazida, y finalmente se aforó con H_2SO_4 0.2 N en un balón de 25 ml, y de este modo se obtuvieron las curvas de calibración del espectrofotómetro con una longitud de onda de 540 nanometros.

De la solución de 1 000 ppm se prepararon soluciones de 10, 20, 30 y 50 ppm mediante las ecuaciones de disolución; posterior a ello se realizó el procedimiento de la Figura 1, el cual se realizó seis veces por cada absorbente.

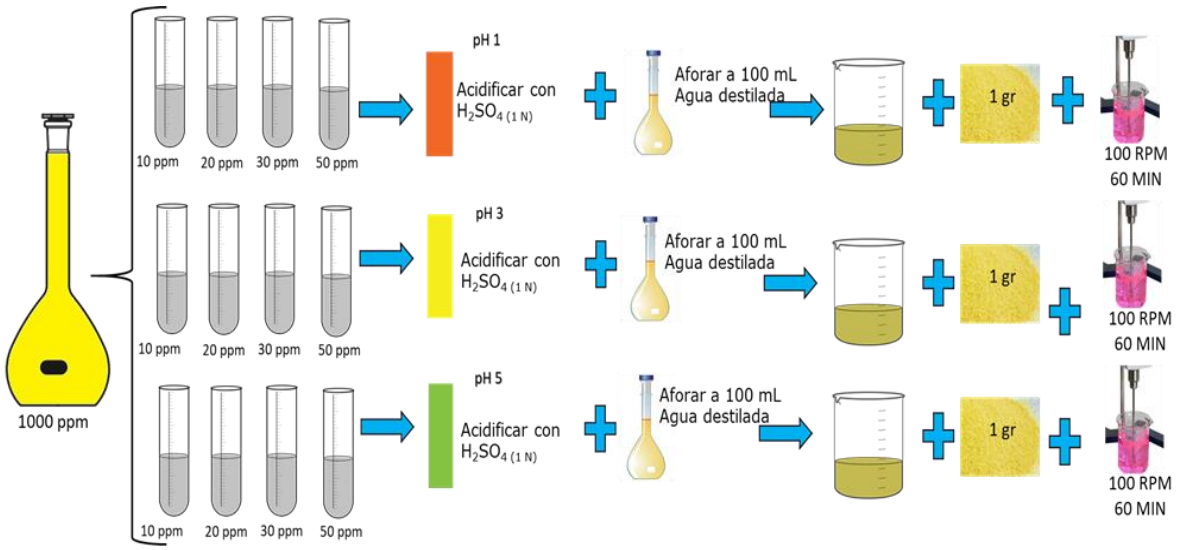

Figura 1. Diagrama experimental de la investigación.

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 12(3), 1-31. DOI: 10.24850/j-tyca-2021-03-01

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Luego de los 60 minutos de agitación, se hizo un filtrado de la solución, de la cual se tomaron alícuotas de 5 ml, a las que se les adicionó 0.5 ml de difenilcarbazida, 5 ml de H_2SO_4 1 N y H_2SO_4 a 0.2 N para completar el aforo a 25 ml; de este modo se tomaron las lecturas de absorbancia y se calcularon los porcentajes de remoción de Cr VI.

Una vez culminada la primera fase en agua sintética se procedió a seleccionar el pH y el adsorbente más eficiente, el cual se aplicó en aguas residuales de la curtiembre Rodríguez Melo; en esta fase se prepararon soluciones de 20 40 y 60 ppm, aforando a 100 ml de agua destilada; luego se acidificó con H_2SO_4 1 N; se adicionó el adsorbente, e inició el proceso de agitación. Este procedimiento se realizó ocho veces por cada concentración.

Diseño y evaluación del sistema

Terminada la evaluación del adsorbente en el agua residual, se procedió a diseñar y evaluar el sistema de adsorción a escala piloto. Para el diseño del sistema se emplearon las ecuaciones heurísticas; para agitadores mecánicos, las ecuaciones de placas inclinadas, partiendo de un tanque de forma de cilíndrica; y para la zona de fondo del sistema se tuvieron en

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 12(3), 1-31. DOI: 10.24850/j-tyca-2021-03-01

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

cuenta los teoremas de Bernoulli y Torricelli, pues los fondos de un depósito son los más influyentes en la agitación y desde allí se redireccionan los flujos del líquido.

El sistema electrónico se programó mediante el *software Arduino 1.8.5*, buscando comandos de funcionamiento automáticos y estandarizados en el tablero digital. Por último, los análisis estadísticos se realizaron con el paquete de *software Arena* mediante la herramienta *Input Analyzer*.

Luego de diseñar y construir el sistema se realizaron las simulaciones con agua residual de la curtiembre, tomando un volumen de 30 l, al que se adicionaron 300 g de adsorbente (10 g/l) y 300 ml de ácido sulfúrico 1N para acidificar la solución a pH a 1. Pasados 60 minutos de agitación constante a 100 RPM se llevaron a cabo los análisis de colorimetría y lecturas de absorbancia.

Resultados

De acuerdo con la Figura 2, la remoción media de Cr VI utilizando salvado de trigo en agua sintética fue del 28 %; en pH 1, la remoción máxima fue del 67 % en el patrón de 10 ppm y la remoción mínima fue del 5 % con

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 12(3), 1-31. DOI: 10.24850/j-tyca-2021-03-01

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

una confianza del 95 % en el patrón de 50 ppm, siendo la remoción media de este pH del 31 %.

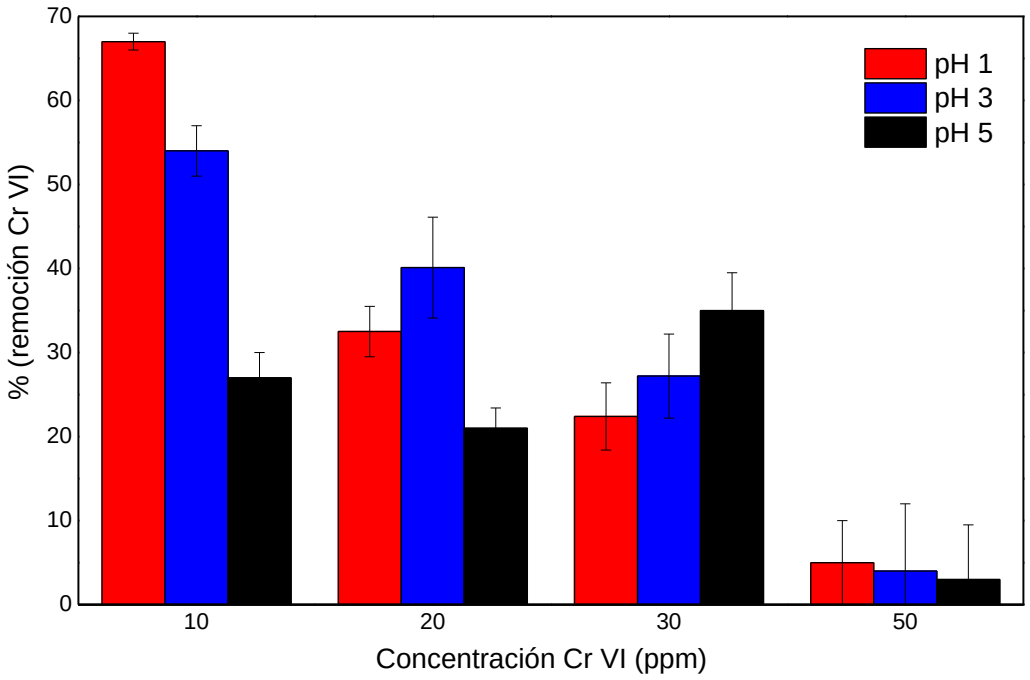

Figura 2. Rangos de remoción de cromo VI con salvado de trigo.

Para el pH 3, la remoción media de cromo VI fue del 34 %, fluctuando entre el 54 % (10 ppm) y el 4% (50 ppm); en pH 5 se encontró que la remoción media de iones de cromo VI fue del 19 %. En dicho Ph, la remoción máxima fue del 35 % a 30 ppm y la mínima del 3 % en 50 ppm eficiencias poco significativas en la remoción de cromo VI. Finalmente se encontró que la remoción más alta en función del pH empleando salvado de trigo fue en pH 3.

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 12(3), 1-31. DOI: 10.24850/j-tyca-2021-03-01

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Los resultados para el adsorbente de naranja presentaron una remoción media del 42 %. En la Figura 3 se evidencia que la máxima remoción de Cr VI a pH 1 fue del 88 % en el patrón de 10 ppm y el más bajo de 31 % en el patrón de 50 ppm, siendo la remoción media del 68 % con un nivel de confianza del 95 %.

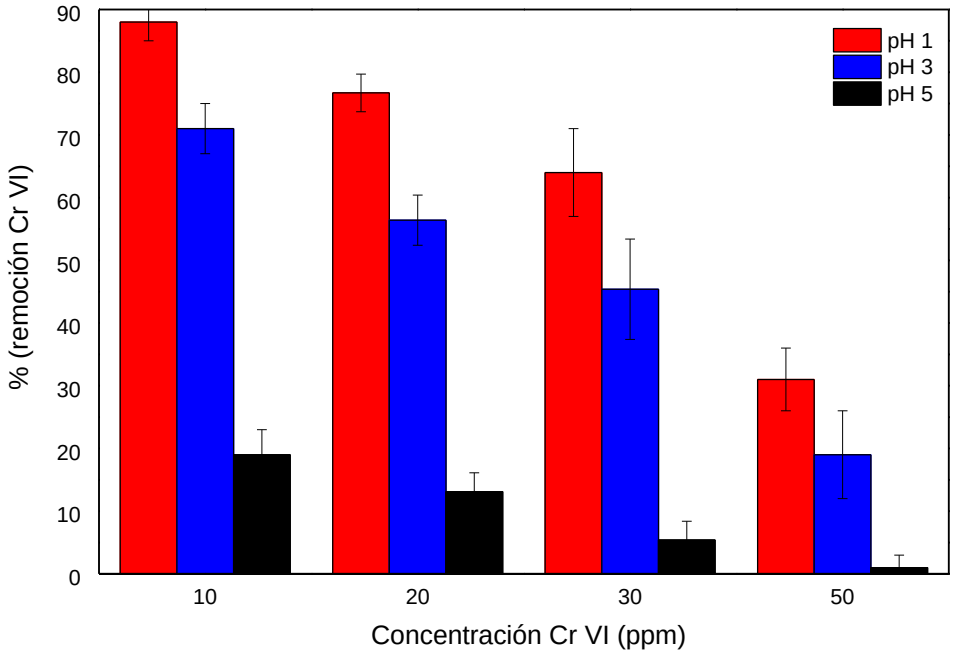

Figura 3. Rangos de remoción de cromo VI con cáscara de con naranja.

Los rangos de remoción para pH 3 corresponden a 71 % en un patrón de 10 ppm y 19 % para 50 ppm, siendo la remoción media del 49 %, mientras que en pH 5 el adsorbente de cáscara de naranja presentó un comportamiento variable, donde el valor máximo de remoción fue del

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 12(3), 1-31. DOI: 10.24850/j-tyca-2021-03-01

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

19 % (10 ppm) y el mínimo 1 % (50 ppm), lo cual conlleva a que la remoción media de la cáscara de naranja a pH 5 fuera del 9 %.

Una vez evaluadas las concentraciones y los rangos de remoción de los dos adsorbentes se seleccionaron las condiciones de pH más adecuadas para la remoción de cromo hexavalente en aguas residuales. Según la Figura 4, en la que se interponen los resultados de cada pH y cada adsorbente, se encuentra que la cáscara de naranja a pH 1 es la más eficiente.

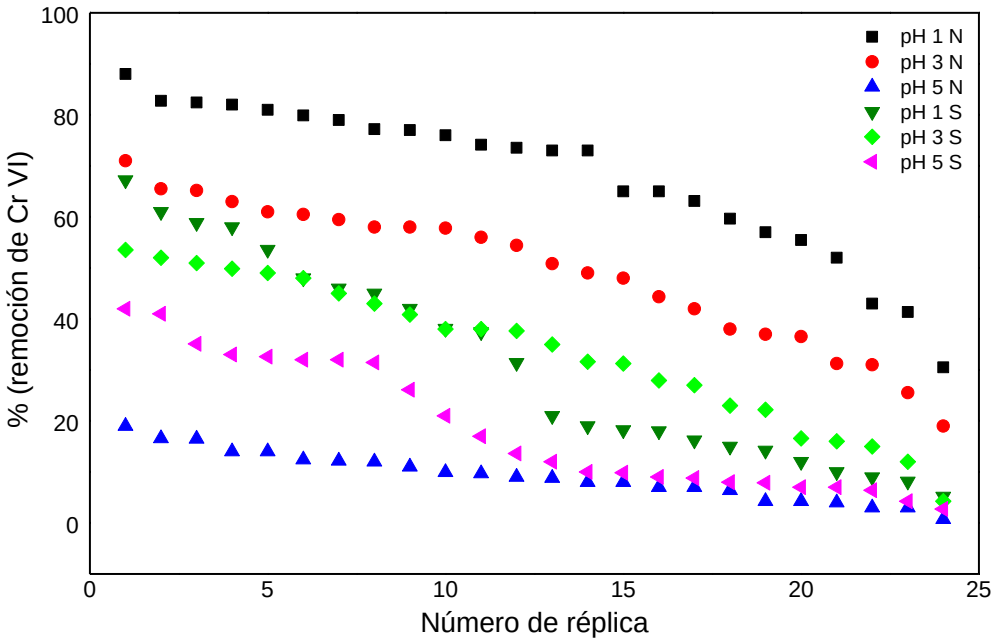

Figura 4. Rangos de remoción de los adsorbentes en función del pH.

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 12(3), 1-31. DOI: 10.24850/j-tyca-2021-03-01

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Con el Input Analyzer del Arena se determinó el tipo de distribución no normal y la prueba de Kruskal-Wails, prueba que se aplicó para los dos adsorbentes (naranja y salvado de trigo), en función de los pH (pH 1 y pH 3, pH 5); la hipótesis consintió en evaluar si la naranja y el salvado de trigo eran eficientes para la remoción de cromo hexavalente en aguas de Curtiembre, de donde se concluye que el adsorbente que no tiene rangos de remoción similar es el salvado de trigo, dado que existen diferencias estadísticamente significativas.

En la Tabla 1 se encuentra la caracterización química del agua en la curtiembre Rodríguez Melo, allí se identificó que los altos niveles de cromo VI se generan en el proceso unitario del curtido.

Tabla 1. Resultados de la caracterización del agua residual.

Parámetros	Desencalado	Pelambre	Curtido	Teñido
pH	9.32	12.07	4.81	3.95
Conductividad µS/cm	18.25	6.22	10.36	12.33
DQO ($mg*l^{-1}$)	-----	2 946.8	2 964.4	1 715.3
cromo Total ($mg*l^{-1}$)	1.24	8.81	1 363.4	13.96
Cromo (VI) ($mg*l^{-1}$)	-----	-------	112.8	7.2

El agua residual problema presentó una concentración inicial de 1 363.4 ppm de cromo total y 112.8 ppm de Cr VI, la cual se acidificó con H_2SO_4 1 N hasta obtener el pH 1, condiciones en las cuales se procedió a adicionar el adsorbente de naranja.

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 12(3), 1-31. DOI: 10.24850/j-tyca-2021-03-01

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

De acuerdo con la Figura 5, la adsorción de los iones metálicos de Cr VI a pH 1 en agua residual con cáscara de naranja en distintos patrones de concentración permitió encontrar que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las distintas concentraciones de cromo, pues para el patrón de 20 ppm, la remoción media fue del 39 %, para el de 40 ppm del 38 % y para la escala de 60 ppm del 34 %.

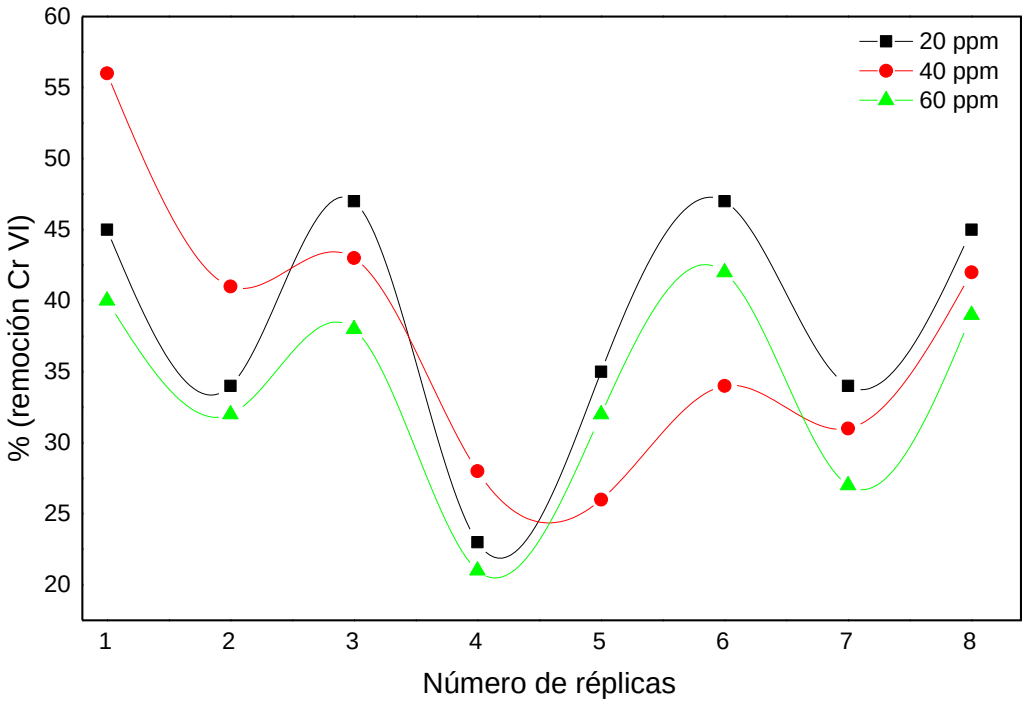

Figura 5. Rangos de remoción de cromo VI con cáscara de naranja.

Una vez encontrado que la concentración del metal no afecta la remoción de Cr VI en las condiciones seleccionadas para el agua residual, se realizaron 24 corridas experimentales, las cuales se presentan en la

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 12(3), 1-31. DOI: 10.24850/j-tyca-2021-03-01

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Figura 6; allí se tiene que la máxima remoción de la cáscara de naranja en las aguas residuales de curtiembre fue del 56 % y la mínima del 21 %, siendo la media de remoción el 37 %.

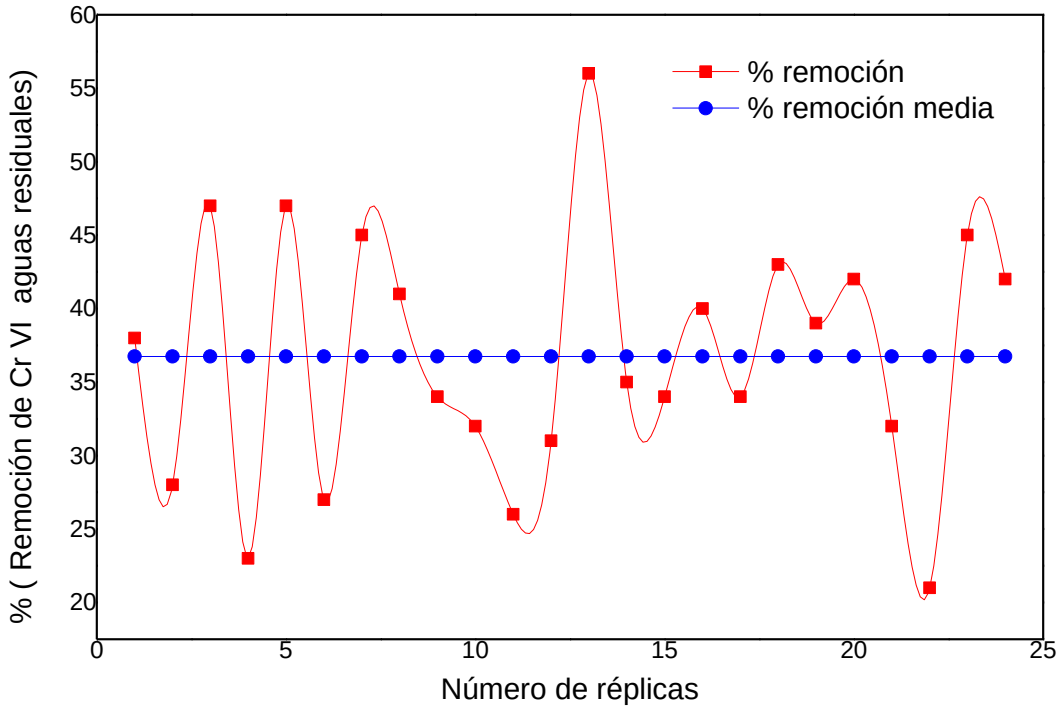

Figura 6. Remoción de Cr VI con cáscara de naranja en agua residual pH 1.

La media de remoción de cromo hexavalente, con cáscara de naranja en agua sintética fue del 68 % mientras que en las aguas residuales la remoción media fue del 37 %, disminución causada por los

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 12(3), 1-31. DOI: 10.24850/j-tyca-2021-03-01

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

químicos que son adicionados al proceso del curtido, los cuales cambian la composición química del agua en condiciones más complejas.

De acuerdo con las ecuaciones heurísticas para el proyecto de agitadores mecánicos, se diseñó un agitador de placas inclinadas (Figura 7); se calcularon las potencias requeridas para mantener en suspensión los sólidos del adsorbente durante 60 minutos a 100 RPM; se diseñó el fondo de Klopper con radio esférico, a fin de extraer por la salida lateral el agua clarificada y después de un tiempo de sedimentación extraer los lodos con el cromo adsorbido.

Para el diseño del orificio de salida se realizaron pruebas de sedimentación, donde se encontró que la altura en el agitador ocupada por el sedimento se encuentra entre el 11.4 y 11.7 % de la altura total de la lámina de agua en el sistema. Para evitar que por dicha salida se fugue el sedimento, se consideró incrementar un 3 % (factor de seguridad), lo cual permite analizar que para el diseño del orificio de salida el rango varió entre 14.4 y 14.7 %.

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

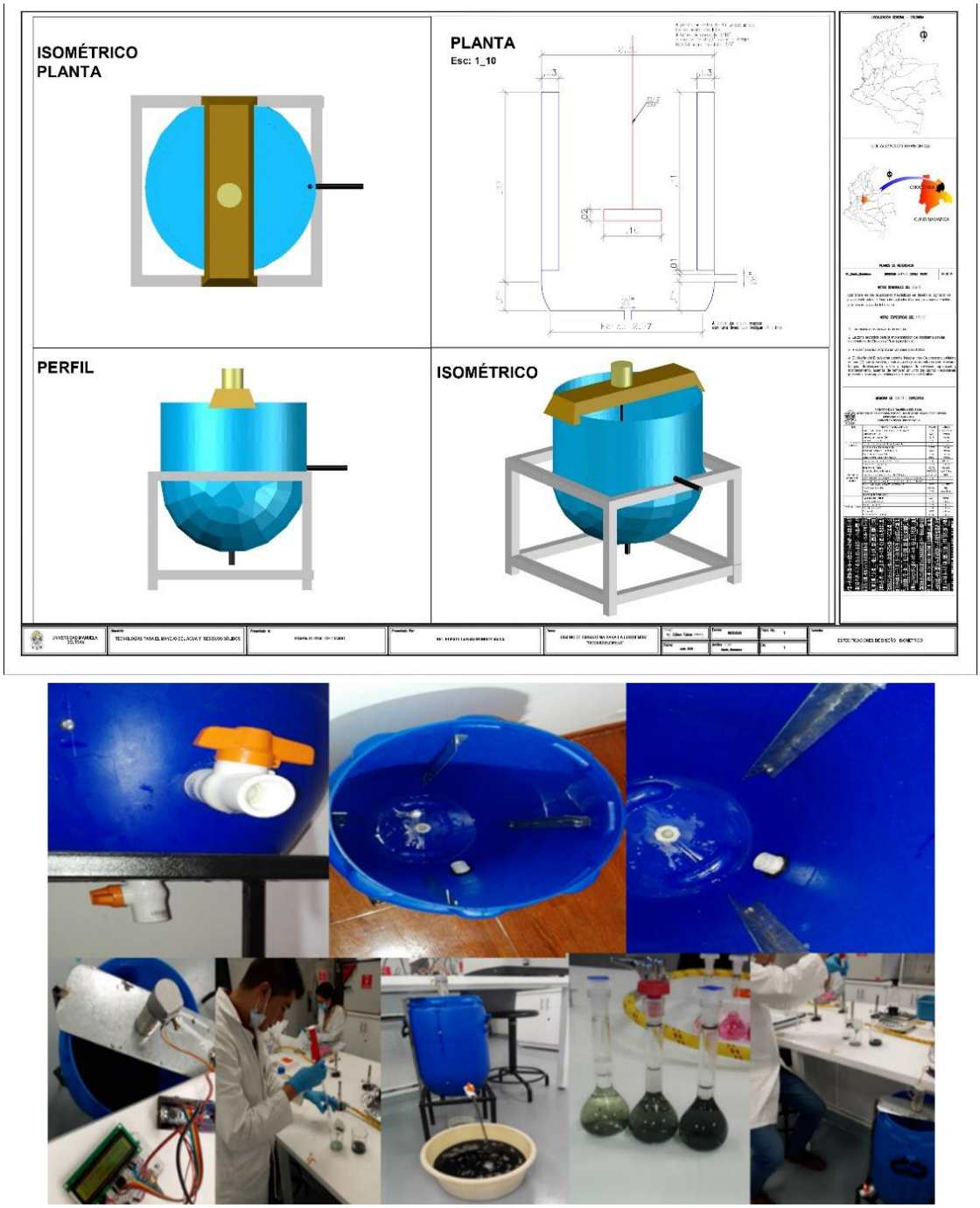

Figura 7. Diseño y construcción del sistema de adsorción.

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 12(3), 1-31. DOI: 10.24850/j-tyca-2021-03-01

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Luego de diseñar y construir el sistema de adsorción se dio inicio a las 24 simulaciones con agua residual del proceso unitario de curtido a pH 5 y concentración de 112.8 ppm de Cr VI; cada cinco minutos se tomaron muestras de remoción, con el fin de conocer el comportamiento de la misma en función del tiempo.

En la Figura 8 se observa el comportamiento de la remoción de cromo hexavalente en el sistema, donde se encontró que la remoción máxima fue del 64 %, la mínima del 45 % y el valor medio de remoción del 54 %.

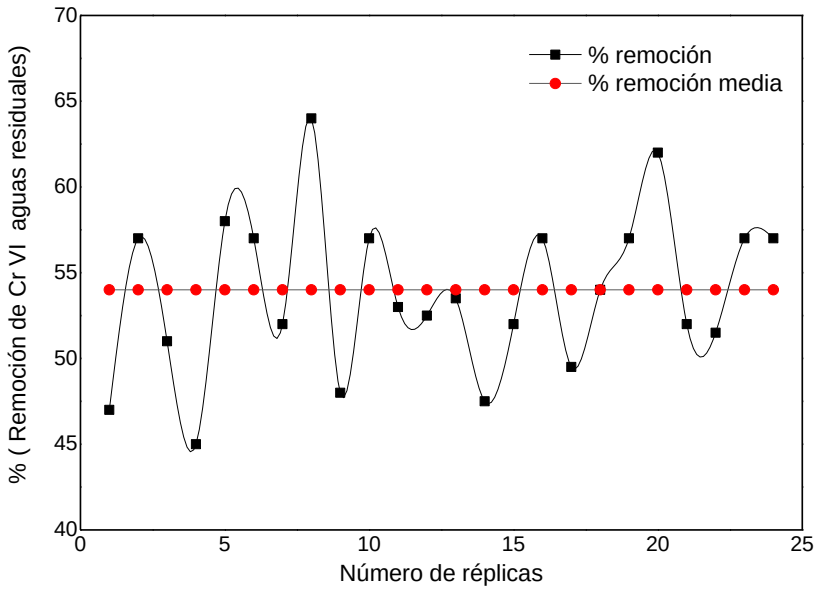

Figura 8. Remoción de la cáscara de naranja en el sistema.

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 12(3), 1-31. DOI: 10.24850/j-tyca-2021-03-01

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Luego de conocer la eficiencia media del sistema validado se cruzaron las tres curvas de remoción media. En la Figura 9 se comparó la media de remoción de cromo (VI) en los tres escenarios agua sintética (68 %), agua residual en laboratorios (37 %) y agua residual en el sistema (54 %). Se encuentra que la eficiencia del sistema diseñado es mayor que la eficiencia obtenida en agua residual a escala de laboratorio.

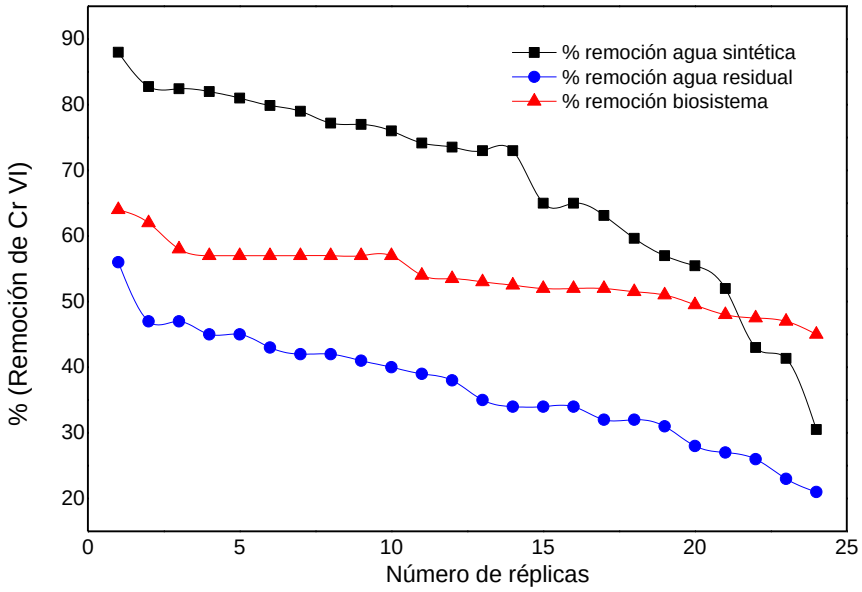

Figura 9. Curvas de remoción en los (3) escenarios evaluados.

Durante las simulaciones y cada 2.5 minutos se tomaban lecturas de remoción, con el propósito de identificar el momento en el que ocurre la mayor remoción el tiempo óptimo. En la Figura 10 se encuentra el comportamiento de la remoción de Cr VI, identificándose que a los 10 minutos se presenta el mayor porcentaje de remoción, con valor promedio

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

del 68 %; a partir de los 40 a 60 minutos, la variación de la curva es poco significativa, ya que los rangos de remoción varían entre 55 y 57 %.

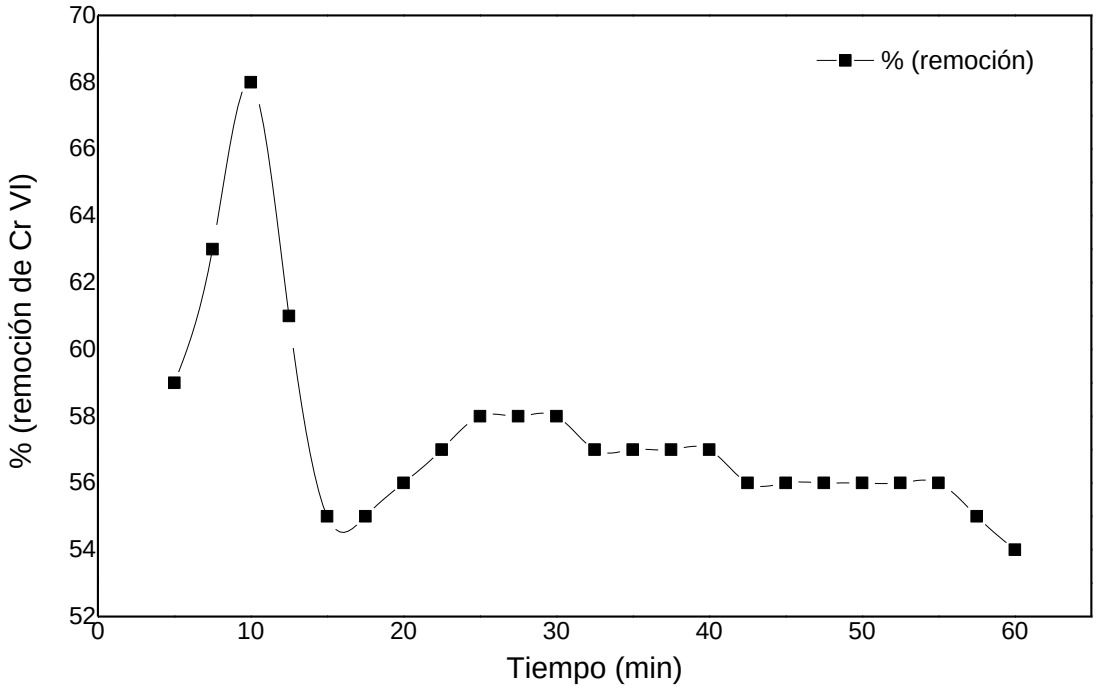

Figura 10. Remoción de Cr VI vs tiempo de contacto.

Discusión

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 12(3), 1-31. DOI: 10.24850/j-tyca-2021-03-01

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

De acuerdo con los resultados obtenidos en agua sintética se determinó que al aumentar la concentración de cromo, disminuye la capacidad de adsorción del bioadsorbente. Altun y Pehlivan (2012) establecieron que esta baja se debe a la merma de la atracción electrostática, donde una alta concentración de iones H^+ facilita la adsorción, mientras que una alta concentración de iones OH^- suprime la reacción de adsorción.

Al comparar la eficiencia de los adsorbentes, la naranja removió el 68 % de Cr VI, mientras que el salvado de trigo fue de 34 %, diferencia que se según Wen, Jiangshui, Yinjia, Xiao y Zhengqing (2015); Marshall y Champagne (1995, citados por Tejeda, Tejada, Marimón y Villabona (2014), se debe a que la cáscara de naranja en su estructura química contiene una mayor proporción de grupos hidroxilo y carboxilo, pertenecientes a los enlaces de celulosa, pectina, hemicelulosa y lignina, siendo éstos los sitios activos para la unión del ion metálico y el Cr VI.

Los pH más óptimos para la remoción de Cr VI en agua sintética fueron pH 1 y pH 3, resultados que sustentan las teorías de González *et al*. (2010); Tejada, Montiel y Acevedo (2016); Garces y Coavas (2012), y Eggs, Salvarezza, Azario, Fernández y García (2012), quienes afirmaron que la mayor adsorción del Cr (VI) se presenta entre pH 1 y pH 3 debido a la activación química de los grupos funcionales presentes en el material adsorbente, pues la superficie del biomaterial se carga positivamente y los grupos funcionales se convierten en grupos protonados que liberan el oxígeno responsable de la oxidación.

En el agua residual se encontró que la adsorción de Cr VI a pH 1 con cáscara de naranja a distintas concentraciones no afecta la remoción

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

en las condiciones seleccionadas para el agua residual, dado que no existen diferencias estadísticas significativas en los porcentajes de remoción obtenidos.

Con base en la Figura 3 se evidenció que la remoción de la naranja a pH 1 disminuyó del 68 % en agua sintética al 37 % en agua residual, lo cual se debe a que las aguas residuales del proceso del curtido consisten en una matriz compleja, con altos niveles de compuestos nocivos inorgánicos y orgánicos (Schrank, José, Moreira, & Schröder, 2005), producto de los químicos que son adicionados al proceso del curtido, los cuales transforman la composición química del agua a condiciones más complejas que afectan de manera directa el adsorbente, disminuyendo el área superficial útil de adsorción.

Teniendo en cuenta que estudios de remoción de metales pesados por adsorción, entre ellos el adelantado por Izquierdo (2010), Schrank *et al*. (2005) recomendaron que en las aguas residuales con carga orgánica baja se pueden emplear columnas de lecho fijo, mientras que en valores elevados lo más recomendable es emplear sistemas en los que se mantenga constante una agitación, para poder garantizar el contacto entre el contaminante y el bioadsorbente.

Luego de diseñar, construir y validar en el sistema la remoción de Cr VI en aguas residuales, se encontró que la capacidad de remoción aumentó un 17 % sobre el valor obtenido en el laboratorio. Ello se debe a los agitadores de flujo axial para la mezcla y suspensión de sólidos (Arrieta, 2012), en conjunto con los bafles instalados al interior del sistema, los cuales se encargan de mejorar la turbulencia, la mezcla del

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

fluido y evitar la formación de vórtices (Valencia, 2010) durante el tiempo de funcionamiento; dichos parámetros aumentan la eficiencia de remoción de cromo (VI) debido a que se incrementa el área de contacto del mismo; es una de las ventajas del sistema sobre sistemas de filtración.

Las eficiencias del sistema validado no dan cumplimiento a la normatividad nacional, la cual establece límites menores de 1.5 ppm Cr VI, razón por la cual se recomienda que al implementar la bioadsorción se evalúen dos tanques en serie para lograr mayores eficiencias y cumplir con las normas de calidad del agua.

En la Figura 9 se observa que la curva de remoción del sistema no supera la curva de remoción en agua sintética, de modo que se afirma lo anteriormente establecido, y es que el agua sintética solo contenía iones de potasio y cromo, mientras que en el agua residual el contenido de materia orgánica, las sales residuales del pelambre y la presencia de otros químicos afectan de manera directa el área superficial del adsorbente.

Según la Figura 10, la mayor capacidad de remoción en función del tiempo ocurrió en tiempos menores a 15 minutos; son resultados similares a los reportados por González *et al*. (2010), quienes concluyeron que a bajas concentraciones del metal, la biomasa estudiada adsorbe el 100 % a los 10 minutos; pasados los 35 minutos, el comportamiento de la remoción no presenta variaciones significativas.

Por último, el cromo residual del proceso del curtido se encuentra en el estado de oxidación trivalente, el cual es fácilmente oxidado a cromo hexavalente debido a las altas concentraciones de la materia orgánica y

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

variaciones en el pH, siendo éstas las variables que más influyen en el proceso de adsorción.

Conclusiones

En agua sintética, la cáscara de naranja mostró el punto más óptimo de remoción de Cr (VI) a pH 1 con una eficiencia media del 68 %, mientras que la remoción más óptima del salvado de trigo fue a pH 3 con valor medio del 33 %, lo que se debe a la presencia de los grupos hidroxilo y carboxilo sitios activos para la unión del ion metálico y el Cr (VI).

La cáscara de naranja aplicada en las aguas residuales removió el 37 %, valor que disminuyó debido a la presencia de múltiples sustancias en las aguas del curtido y que también se adhieren a la superficie del adsorbente, disminuyendo el área útil para la adsorción de los iones de Cr (VI).

Al simular la adsorción de cromo VI en el sistema, la remoción media fue del 54 %, aumento significativo que se debe principalmente al sistema de agitación y los bafles instalados al interior del tanque, elementos que garantizan la suspensión constante del bioadsorbente.

Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 12(3), 1-31. DOI: 10.24850/j-tyca-2021-03-01

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

El sistema de adsorción diseñado presenta dos ventajas sobre un sistema de biofiltración: la primera corresponde a la capacidad de aumentar el área útil del adsorbente generado por el sistema de agitación y suspensión; la segunda se debe a que la materia orgánica presente en el agua residual colmata la superficie del filtro, dificultando la filtración en profundidad, situación que no ocurre en el sistema diseñado, construido y validado.

El tiempo óptimo para la adsorción del metal en el sistema puede estar entre 10 y 35 minutos, tiempo en el cual se puede remover entre el 55 y 68 % de la concentración inicial de Cr VI.

El diseño del sistema de adsorción se constituye como un gran aporte para la implementación de la bioadsorción, considerándose viable implementar el sistema de bioadsorción en los procesos unitarios del curtido de pieles debido a su eficiencia técnica, que permite dar soluciones a la realidad del sector industrial artesanal que se desarrolla en la región norte de Cundinamarca y en el mismo Distrito Capital de Colombia.

La remoción del Cr VI en la cuenca alta y media del río Bogotá, producido por la industria de las curtiembres, contribuirá al cumplimiento de la sentencia proferida por el Consejo de Estado, al igual que al proyecto de adecuación hidráulica y recuperación ambiental río Bogotá.

Agradecimientos

En primer lugar siempre darle las gracias a Dios por sus infinitas bendiciones, al igual que mi madre Luz Fanny, mis hermanos Cesar Arbey

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

y Daddy Zahir; a toda mi familia, a mis amigos y compañeros maestrantes por su gran apoyo y compañía en el día a día a lo largo de esta magna etapa de nuestras vidas; a la Universidad Manuela Beltrán; al señor Alveiro Rodríguez Melo por su valiosa colaboración en esta investigación; a la doctora Monika Echavarría y a la doctora Dora luz Gómez por su liderazgo y colaboración en esta grandiosa experiencia académica; a todos ustedes, eternas gracias.

Referencias

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2010). *Guía para la gestión y manejo integral de residuos industria de curtiembres y tenerías*. Bogotá, Colombia: Alcaldía Mayor de Bogotá.

Altun, T., & Pehlivan, E. (2012). Removal of Cr (VI) from aqueous solutions by modified walnut shells. *Food Chemistry*, 132(2), 693-700.

Arias, W. (2013). *Remoción de cromo (III) y DQO a través de la electrocoagulación en aguas residuales de la industria curtiembre haciendo uso racional de la energía* (tesis de maestría en Ingeniería), Universidad Libre, Bogotá, Colombia.

Arrieta, G. (2012). *Metodología de optimización numérica multi-objetivo y de simulación numérica de la interacción fluido-estructura del desempeño de un agitador con impulsor PBT variando ángulo, altura y velocidad de rotación utilizando ANSYS CFX, mechanical y design explorer*. Lima, Perú: Pontificia Universidad del Perú.

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Artuz, L., Martínez, M., & Morales, C. (2011). *Las industrias curtiembres y su incidencia en la contaminación del río Bogotá*. Bogotá, Colombia: Universidad Santo Tomás.

Barba, L., Ballestero, Y., Patiño, P., & Callejas, C. (2013). *Impacto generado por los vertimientos de las curtiembres en corrientes superficiales usando pruebas de toxicidad*. Cali, Colombia: Universidad del Valle.

CAR, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2014). *Caso Emblemático - OPAG - Contaminación del río Bogotá por curtiembres en Chocontá*. Bogotá, Colombia: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.

Castillo, G., Díaz, M., Pica, Y., Ronco, A., Sobrero, C., & Bulus, G. (2004). *Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas*. Jiutepec, Ciudad de México, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo.

Díaz, M. J., & Granada, T. C. (2016). Efecto de las actividades antrópicas sobre las características fisicoquímicas y microbiológicas del río Bogotá a lo largo del municipio de Villapinzón, Colombia. *Revista de la Facultad de Medicina*, 66(1), 45-52.

Eggs, N., Salvarezza, S., Azario, R., Fernández, N., & García, M. (2012). Adsorción de cromo hexavalente en la cáscara de arroz modificada químicamente. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 2(3), 141-151.

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Escobar, A., Ubaque, C., & Bohórquez, M. (2012). *Identificación y evaluación de la contaminación del agua por curtiembres en el municipio de Chocontá*. Recuperado de revistas.udistrital.edu.co.

Garces, L., & Coavas, S. (2012). *Evaluación de la capacidad de adsorción en la cáscara de naranja (*Citrus sinensis*) modificada con quitosano para la remoción de Cr (Vi) en aguas residuales*. Cartagena, Colombia: Universidad De Cartagena.

González, H., Bautista, D., Sandoval, P., Cárdenas, J., Martínez, V., & Acosta, I. (2010). *Bioadsorción de cromo VI en solución por la cáscara de naranja* (Citrus sinensis Osbeck). Hidalgo, México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Hongrui, M., Jianjun, Z., Li, H., Fengxia, C., Lixiang, Z., & Xianrong, Q. (2017). Chromium recovery from tannery sludge by bioleaching and its reuse in tanning process. *Journal of Cleaner Production*, 142(4), 2752-2760.

Izquierdo, M. (2010). *Eliminación de metales pesados en aguas mediante bioadsorción. Evaluación de materiales y modelación del proceso*. (tesis de doctorado). Universidad de Valencia, Valencia, España.

Jobby, R., Jha, P., Yadav, A., & Desai, N. (2018). Biosorption and biotransformation of hexavalent chromium [Cr(VI)]: A comprehensive review. *Chemosphere*, 207, 255-266.

Marshall, W., & Champagne, E. (1995). Subproductos agrícolas como adsorbentes para iones metálicos en soluciones preparadas en

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

laboratorio y en la fabricación de aguas residuales. *Revista de Ciencias Ambientales y Salud*, Parte A, 30(2), 241-261.

Ocampo-Barrero, M. (2012). *Estudio de remoción de mercurio de aguas residuales provenientes de un relleno sanitario* (tesis de maestría), Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales, Caldas, Colombia.

Schrank, S., José, H., Moreira, R., & Schröder, H. (2005). Applicability of Fenton and H2O2/UV reactions in the treatment of tannery wastewaters. *Chemosphere*, 60(5), 644-655.

Singh, K., Hasan, S., Talat, M., Singh, V., & Gangwar, S. (2009). Removal of Cr (VI) from aqueous solutions using wheat bran. *Chemical Engineering Journal*, 151, 113-121.

Singha, B., Kumar, T., Bhattacharya, K., & Das, S. (2011). Cr(VI) Ions Removal from aqueous solutions using natural adsorbents—FTIR Studies. *Journal of Environmental Protection*, 2, 729-735.

Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortiz, Á., & Ruiz-Rangel, V. (2012). Biomasa residual para remoción de mercurio y cadmio: una revisión. *Ingenium*, 6(14), 11.

Tejada, C., Montiel, Z., & Acevedo, D. (2016). Aprovechamiento de cáscaras de yuca y ñame para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con Pb(II). *Información Tecnológica*, 27(1), 9-20.

Tejeda, L., Tejada, C., Marimón, W., & Villabona, Á. (2014). Estudio de modificación química y física de biomasa (*Citrus sinensis* y *Musa*

2021, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

paradisiaca) para la adsorción de metales pesados en solución. *Luna Azul*, (39), 124-142.

Valencia, A. (2010). Estudio numérico de la fluidodinámica de un estanque de agitación utilizando método de mallas deslizantes. Santiago, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

Vilardi, G., Ochando, P., Stoller, M., Verdone, N., & Palma, L. (2018). Fenton oxidation and chromium recovery from tannery wastewater by means of iron-based coated biomass as heterogeneous catalyst in fixed-bed columns. *Chemical Engineering Journal*, 351, 1-11.

Wen, L., Jiangshui, Z., Yinjia, J., Xiao, Z., & Zhengqing, C. (2015). Adsorption of Pb(II), Cd(II) and Zn(II) by extracellular polymeric substances extracted from aerobic granular sludge: Efficiency of protein. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3, 1223-1232.