

Diseño y construcción de una columna de plecho fijo como herramienta didáctica para el estudio de la adsorción en flujo continuo utilizando fibras de bagazo de agave como biosorbente

Design and construction of a fixed bed column for the study of continuous flow adsorption of lanasol blue on agave bagasse fibers

Mario Elías Gonzáles-Rosas ^a, Camila Soe Gómez-Navarro ^a, Lydia Olvera-Ávila ^b, Jesús A. Padilla-Rodríguez ^c, Ana I. Zárate-Guzmán ^a, Luis A. Romero-Cano ^{a,*}

^a Grupo de Investigación en Materiales y Fenómenos de Superficie. Departamento de Biotecnológicas y Ambientales. Universidad Autónoma de Guadalajara. Av. Patria 1201, C.P. 45129. Zapopan, Jalisco. México.

^b Centro de Investigación para el Desarrollo Industrial (CIDI). Universidad Autónoma de Guadalajara. Av. Patria 1201, C.P. 45129. Zapopan, Jalisco. México.

^c Decanato de Ciencias Sociales, Económicas y Administrativas. Universidad Autónoma de Guadalajara. Av. Patria 1201, C.P. 45129. Zapopan, Jalisco. México.

* autor por correspondencia
luis.cano@edu.uag.mx

RESUMEN

Con el objetivo de diseñar prácticas de laboratorio responsables con el ambiente se diseñó un sistema experimental basado en el uso de fibras de bagazo de agave como material adsorbente empacado en una columna de lecho fijo. En términos generales, la columna de adsorción propuesta consiste en tres piezas ensamblables de polimetilmetacrilato. La parte central de la columna es de 11 cm de longitud y un diámetro interno de 1.2 cm. El sistema experimental lo complementan una bomba peristáltica que alimenta la solución a tratar por la parte inferior de la columna y un auto muestreador que recoge el efluente tratado por la parte superior de la columna. Con el objetivo de mostrar el potencial del sistema experimental propuesto en procesos de tratamiento de agua, se llevaron a cabo estudios de adsorción en flujo continuo empleando como adsorbato modelo el colorante azul lanasol. Se obtuvieron las curvas de ruptura a diferentes concentraciones. La capacidad máxima de adsorción en las condiciones ensayadas fue de 23.18 mg g⁻¹ atribuible a que el mecanismo de adsorción predominante en el proceso es una interacción física entre adsorbente y adsorbato. El modelo de cinética de Thomas es el que predice mejor el rendimiento de la columna de lecho fijo ($R^2 > 0.99$) en comparación con el modelo de Adams-Bohart, corroborando el mecanismo propuesto. Debido a lo anterior se valida el sistema experimental propuesto debido a que sus componentes y disposición han brindado resultados favorables a nivel laboratorio.

Palabras clave: Residuos de la industria tequilera, Sustentabilidad, Fenómenos de Superficie, Laboratorios de DCyT-UAG

ABSTRACT

With the aim of designing sustainable and environmentally friendly laboratory practices, an experimental system was designed based on the use of agave bagasse fibers as an adsorbent material packed in a fixed bed column. In general terms, the proposed adsorption column consists of three assemble able pieces of polymethylmethacrylate. The central part of the column is 11 cm long and has an internal diameter of 1.2 cm. The experimental system is complemented by a peristaltic pump that feeds the solution to be treated through the lower part of the column and an auto sampler that collects the treated effluent through the upper part of the column. With the objective of showing the potential of the proposed experimental system in water treatment processes, continuous flow adsorption studies were carried out using lanasol blue model adsorbate. Breakthrough curves were obtained at different concentrations. The maximum adsorption capacity under the conditions tested was 23.18 mg g⁻¹, attributable to the fact that the predominant adsorption mechanism in the process is a physical interaction between adsorbent and adsorbate. The Thomas kinetics model best predicts the performance of the fixed bed column ($R^2 > 0.99$) compared to the Adams-Bohart model, corroborating the proposed mechanism. Due to the above, the proposed experimental system is validated because its components and arrangement have provided favorable results at the laboratory level.

Keywords: Waste from the tequila industry, Sustainability, Surface Phenomena, DCyT-UAG Laboratories.

.....

1. Introducción

Se denomina adsorción al fenómeno por el cual se produce un aumento de la concentración de una sustancia en bajo estado de agregación (adsorbato) en las proximidades de una fase en mayor estado de agregación (adsorbente) debido a la presencia de fuerzas superficiales (Dabrowski, 2001). Este fenómeno es ampliamente utilizado en procesos de separación y purificación de productos (Jagwe et al., 2021), por lo que es uno de los temas de estudio principales en cursos de ingeniería a nivel pregrado tales como fenómenos de superficie, ingeniería de materiales, transferencia de masa y operaciones unitarias. En este sentido, el material adsorbente considerado ideal en estos procesos es el carbón, debido a su abundancia en la naturaleza y la capacidad que posee su estructura para adaptarse a fin de generar adsorbentes hechos a la medida del adsorbato de interés (Heidarinejad et al., 2020). Al respecto existen numerosos estudios publicados, los cuales se centran en la síntesis, caracterización y uso del material para estudiar problemas específicos (Yin et al., 2007). Debido a ello tradicionalmente en los laboratorios de enseñanza a nivel pregrado se emplea el carbón activado para que el alumno sea capaz de comprender conceptos relacionados a la adsorción tales como cinética, equilibrio y termodinámica del proceso. Sin embargo, la educación actual se encuentra inmersa en una revolución científica que pretende una transformación sustentable (Grosseck et al., 2019). En este sentido destacan los principios de química verde, los cuales se dirigen hacia el diseño de productos y servicios en los cuales exista una reducción o eliminación de productos nocivos para el ambiente (Anastas, 2010). Por todo lo anterior el presente trabajo tiene como objetivo presentar a la comunidad un sistema experimental para el estudio de adsorción en flujo continuo para su uso en los laboratorios del Decanato de Diseño, Ciencia y Tecnología de la UAG. El sistema experimental se basa en el empleo de materiales adsorbentes emergentes, los cuales han sido ampliamente reportados como una alternativa potencial con respecto al carbón activado debido a que corresponden a residuos agroindustriales (biomasa inactiva) con alto contenido de carbono y numerosos grupos funcionales en su superficie (Aksu, 2005). En el presente trabajo de investigación se propone el uso de un material biosorbente obtenido a partir de bagazo de agave, residuo industrial de la cadena productiva Agave - Tequila. El método de obtención es muy sencillo y amigable con el ambiente ya que consiste en un tratamiento mecánico que no implica el uso de maquinaria especializada. Por todo lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo presentar el diseño y la construcción de una columna de lecho fijo para el estudio de procesos de adsorción en flujo continuo, empleando

fibras de bagazo de agave como material biosorbente. Este sistema experimental está concebido como una herramienta didáctica para el aprendizaje de conceptos relacionados con la adsorción en cursos de Ingeniería Química y Biotecnología en el Decanato de Diseño, Ciencia y Tecnología de la UAG.

2. Materiales y métodos

2.1 Material adsorbente

El bagazo de agave utilizado como precursor del material biosorbente se obtuvo de una industria tequilera ubicada en la región de los Valles, Jalisco - México, que utiliza una extracción de azúcares por difusor. Esta práctica consiste en el desgarrar en crudo de las plantas de Agave tequilana Weber variedad azul. El producto del desgarrado es transportado al difusor en el que se le agrega agua en el extremo opuesto, la cual se filtra a través del lecho de agave. El agua disuelve el azúcar contenido en el agave, dando lugar a un jugo rico en azúcar que se recoge en una tina. Este jugo se bombea a la siguiente etapa de producción de tequila y el proceso se repite hasta que el jugo alcanza la concentración máxima en el extremo de alimentación del difusor. El agave desgarrado y agotado (pobre en azúcares) se retira del proceso y recibe el nombre de “bagazo”, siendo considerado un residuo del proceso de producción de tequila. El material biosorbente se obtuvo a partir de este bagazo de agave. Su procesamiento consistió en un secado al aire libre durante 72 horas. Posteriormente, para homogeneizar la fibra de agave obtenida se realizó un proceso de limpieza mecánica con un cepillo de fibra de aluminio No. 64. La caracterización fisicoquímica del biosorbente ha sido previamente reportada por Gómez-Navarro y col., (2022).

2.2 Diseño, construcción y automatización del proceso de adsorción en flujo continuo

Para esta etapa del proyecto se optó por recabar información bibliográfica de procesos de adsorción utilizados a nivel laboratorio. Con base a esta revisión se definieron las dimensiones de la columna de adsorción y se trabajó en los diseños para construir el equipo. Para proporcionar el flujo preciso a la columna de adsorción se utilizó una bomba peristáltica marca Masterflex easy-load 3, modelo 77800-60, la cual se complementa con tubos flexibles de L/S de 13, 14, 15, 16, 25, 17, 18 pulgadas, de los cuales para este trabajo se utilizó la de 15 pulgadas modelo 96410-15.

Para el diseño de los diagramas se empleó el software Microsoft VISIO 2010. Se realizaron los diseños de cada una de las piezas que conforman la columna de adsorción en sus diferentes perspectivas. Para su construcción se eligió material polimetilmetacrilato (comúnmente llamado acrílico) ya que era necesario un plástico transparente resistente a la intemperie. Así también es un excelente aislante térmico, de dureza similar a la del aluminio y de gran facilidad de mecanización y moldeo.

El diseño del auto muestreador consistió en la elaboración de un carrusel de 24 tubos de 5 mL cada uno. Se construyó a partir de fibro panel de densidad media o MDF, por sus siglas en inglés Medium Density Fibreboard. Su elección se basó en que presenta una estructura uniforme y homogénea de textura fina lo cual permite un acabado perfecto en una cortadora laser.

Para el control del auto muestreador se optó por utilizar un motor paso a paso NEMA 17 bipolar, el cual tiene un ángulo de paso de 1.8° (200 pasos por vuelta) y cada bobinado es de 1.2 a 4V, capaz de cargar con 3.2 kg cm^{-1} . La elección de este motor se basó en que es robusto y recomendado para garantizar la mejor fiabilidad en el torque. Las características del motor son: 42.3x48 mm de tamaño (sin incluir el eje), 350 de peso, 5 mm de diámetro del eje y 25 mm de longitud del eje.

La toma de muestras de la columna de adsorción se realizó por la parte superior de la columna, para lo cual se instaló una válvula de 3 vías, las partes que la integran son: una pieza móvil de plástico

semirrígido ensamblado en la parte central de la base llave de 3 ramales, con orificios que comunican u obturan los ramales del sistema. Para accionar automáticamente la válvula esta se acopló a un motor paso a paso de 4 líneas de control, debido a que este motor a pasos tiene tamaño compacto, ideal para desarrollo de proyectos de automatización, su ángulo de giro por paso es de 5.625° (54 pasos para un giro completo).

Finalmente, para realizar la automatización completa del proceso se optó por el uso de una tarjeta electrónica programable marca Arduino la cual es una plataforma electrónica de libre acceso, basada en hardware y software de fácil uso. El software se encuentra de libre acceso en Internet y puede ser descargado por cualquier individuo, mientras que el hardware son placas electrónicas disponibles comercialmente en forma de placas ensambladas. Estas placas hacen uso de microcontroladores, microprocesadores y luces LED. Su lenguaje de programación es C++ y depende de la manera en la que es conectado por medio de cables Dupont para hacerlo funcionar. Arduino tiene diversas funciones, de las cuales, para fines de esta investigación, solo es necesaria la función para controlar motores paso a paso, los cuales servirán para mover el auto muestreador para tomar muestras, y girar la válvula que dará el paso al flujo hacia el auto muestreador o hacia el tanque de recuperación.

2.3 Estudios de adsorción de azul lanasol en flujo continuo

Los estudios de adsorción en flujo continuo se realizaron empleando el sistema experimental anteriormente descrito en conjunto con una bomba peristáltica, un recipiente de 2 litros que contiene la solución a tratar y el auto muestreador automático en la salida de la columna. Las especificaciones de las columnas de acrílico fueron una altura de 11 cm y un diámetro interno de 12 mm, respectivamente empaquetadas con una cantidad fija de biosorbente ($0.4 \text{ g} = 1 \text{ cm}$ de altura) y el resto se llenó con esferas de vidrio inerte. Las soluciones de alimentación correspondieron a soluciones acuosas con concentraciones iniciales de colorante (azul lanasol) de 5 a 50 mg L^{-1} las cuales se bombearon a la columna mediante una bomba peristáltica con un caudal de 2.5 mL min^{-1} .

Se recogieron muestras de los efluentes tratados en intervalos de tiempo definidos y se determinó su concentración mediante espectroscopía ultravioleta-visible (UV-1800, Shimadzu) a 628 nm. Los datos obtenidos se graficaron a fin de generar las curvas de ruptura y se determinaron el tiempo de ruptura (t_b), el tiempo de saturación (t_s), la altura de la zona de transferencia de masa (HMTZ), la capacidad de adsorción de la columna en el punto de ruptura (q_b) y el tiempo de saturación (q_s) (Reynel-Avila et al., 2015). Además, se estudiaron los modelos cinéticos de Adams-Bohart y Thomas para el análisis de las curvas de ruptura de adsorción de colorante. Los modelos de adsorción se analizaron empleando el software STATISTICA 10.0 mediante el ajuste de las ecuaciones no lineales empleando como método de estimación del algoritmo de Levenberg-Marquardt (criterio de convergencia: 1.0×10^{-6}).

3. Resultados y discusión

3.1 Diseño, construcción y puesta en marcha de un proceso de adsorción en flujo continuo

La columna de adsorción propuesta consiste en tres piezas ensamblables de polimetilmetacrilato, los diseños se muestran en la Figura 1. La parte central es una columna de 11 cm de longitud y un diámetro interno de 1.2 cm (Fig. 1b), la cual se ensambla por ambos extremos a piezas de polimetilmetacrilato que cuentan con un orificio central de 1.4 cm de diámetro. Para evitar fugas en estas uniones se emplean empaques de hule (Fig. 1c) y adicionalmente se coloca cinta teflón para mayor seguridad. Los 4 orificios en las esquinas de las piezas cuadradas (diámetro 0.5 cm) sirven para completar el ensamble de las 3 piezas de acrílico que conforman la columna, las cuales son unidas por tornillos de 16 cm de largo los cuales llevan su respectiva tuerca y arandela de acero.

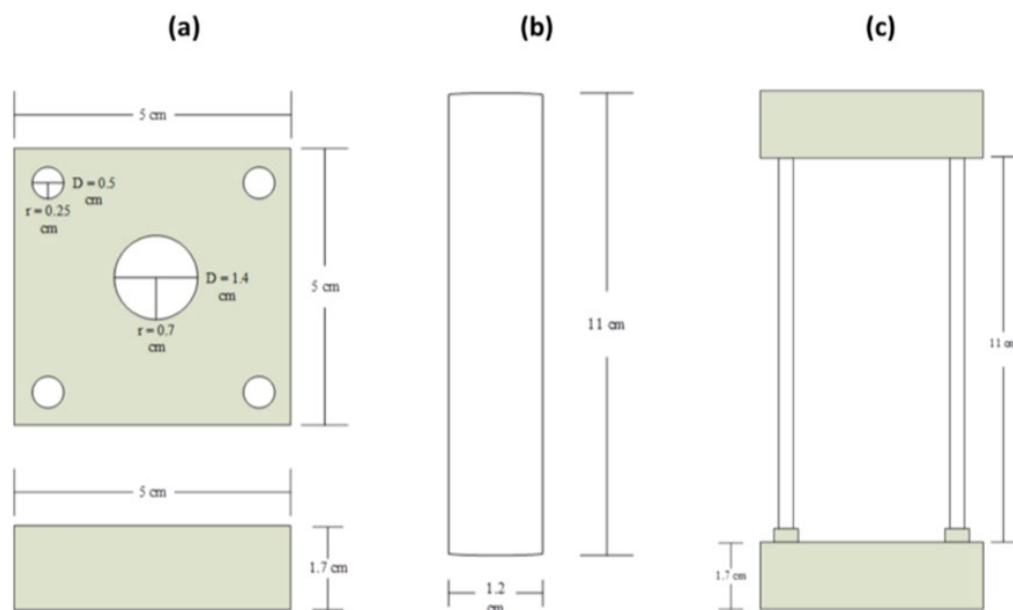


Figura 1. a) Diseño de las bases acrílicas inferior y superior para la columna, b) diseño de la columna, c) ensamble completo para la columna con sus respectivos soportes.

Para empacar el material adsorbente dentro de la columna (Fig. 1b) primeramente se introduce un cedazo (Fig. 2b) en la parte inferior, posteriormente se coloca el material adsorbente, seguido de un segundo cedazo. Estas piezas tienen como objetivo evitar que partículas de adsorbente salgan de la columna, finalmente la columna termina de rellenarse con perlas de vidrio inertes para lograr un lecho fijo.

La parte inferior de la columna está conectada por medio de una manguera hacia el recipiente con la solución a tratar. La alimentación a la columna se realizó de manera ascendente para evitar la posible formación de caminos preferencias del flujo dentro del lecho fijo. El flujo en la bomba peristáltica fijo en 1 mL min^{-1} , el cuál fue determinado a partir de pruebas preliminares. Finalmente, por la parte superior de la columna, se condujo el flujo a través de una manguera a la cual se acopló una válvula de tres vías automatizada, que sirvió para desviar el flujo al auto muestreador o al recipiente de agua tratada, según fuera el caso.

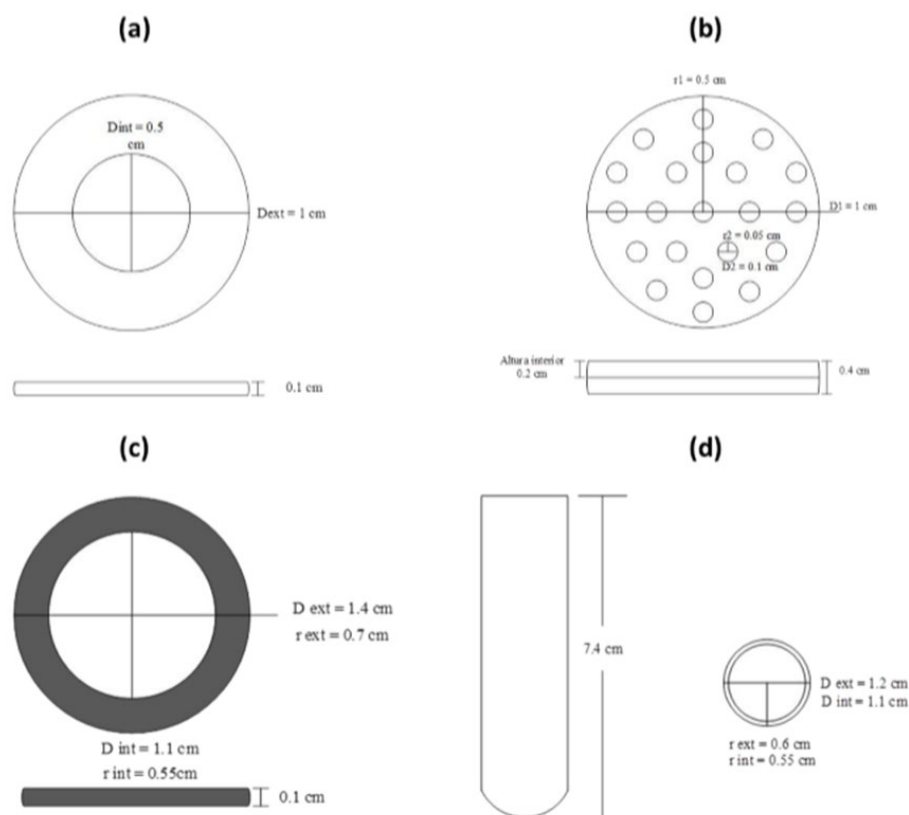


Figura 2. Accesorios de la columna: a) Dimensiones de las arandelas utilizadas para fijar los soportes, b) Diseño de los cedazos utilizados en la parte superior e inferior de la columna, c) Dimensiones de los empaques de hule utilizados en los extremos de la columna, d) Dimensiones de los tubos de plástico empleados en el auto muestreador.

Finalmente, se diseñó un auto muestreador para recolectar muestras del efluente tratado a distintos intervalos de tiempo. Este consistió en una estructura circular con diámetro de 20 cm y 1.2 cm de altura construida en MDF a la cual se le hicieron orificios de diámetro de 1.2 cm con una separación de 1 cm entre ellos para colocar 24 tubos de plásticos que sirvieron para la toma de muestra (Fig. 3). Esta pieza se ensambló al motor a pasos Nema 17 mediante un cople fabricado en plástico cuyas dimensiones fueron: un diámetro de 3.9 cm y 4 orificios de 0.5 cm para atornillar la estructura circular (Fig. 3b). El funcionamiento del auto muestreador es similar al de un carrusel eléctrico en el cual se programa el tiempo y la velocidad de giro para ir colocando cada tubo debajo de la válvula automatizada para realizar la toma de la muestra al tiempo asignado.

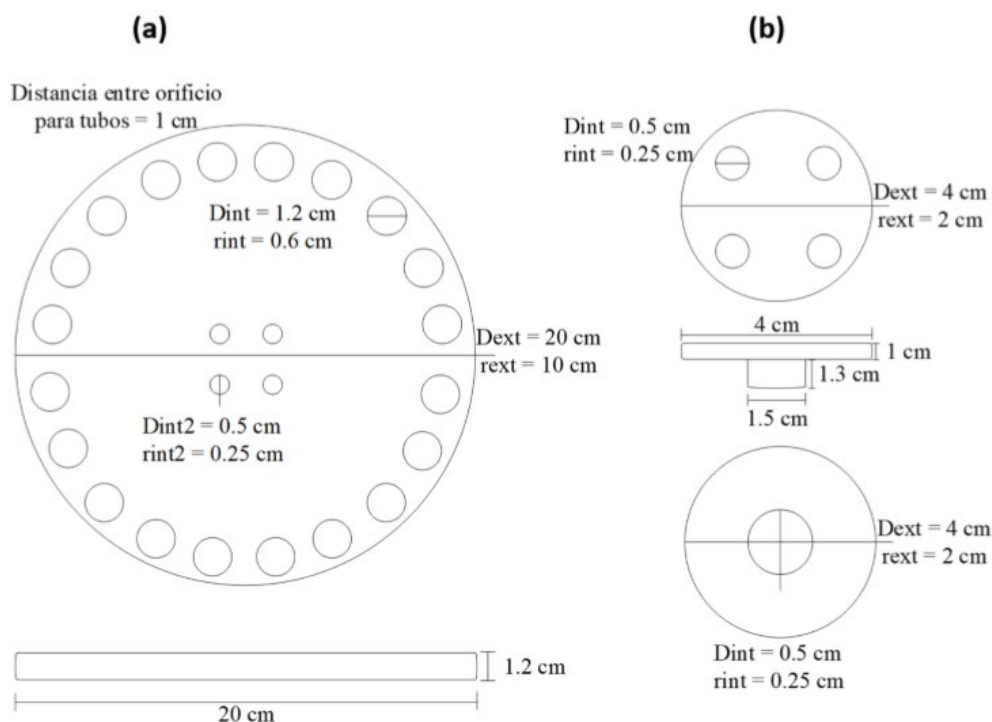


Figura 3. a) Diseño del carrusel con material MDF, b) cople de plástico.

Una vez que se fabricaron los diseños anteriores se procedió a su ensamble. Las figuras 4a y 4b muestran las imágenes de los diseños construidos y ensamblados listos para su uso en el laboratorio 313 de la Universidad Autónoma de Guadalajara.



Figura 4. (a) Fotografía de las partes que componen a la columna acrílica de adsorción, desarmada (izquierda) y armada (derecha). (b) Fotografía del diseño experimental construido y ensamblado utilizado para los estudios de adsorción en flujo continuo.

Para la automatización del auto muestreador y la válvula de recolección de flujo, se utilizó el hardware y software Arduino, que funcionó para la programación de la automatización. Se implementaron dos motores de pasos: i) Un motor paso a paso de 4 líneas de control para la manipulación de la válvula de 3 vías y ii) Un motor paso a paso NEMA 17 bipolar para el control de la estructura circular que soporta los tubos de plástico empleados para el muestreo (Carrusel). Se programaron los tiempos de espera y apertura de la válvula, y los tiempos de espera y giro del muestreador, para que el proceso de adsorción se realizará de forma continua y automatizada, de tal forma que se pudieran tomar muestras sin la necesidad de operación manual.

3.2 Estudios de adsorción en flujo continuo

Con el objetivo de mostrar el potencial del sistema experimental propuesto en procesos de tratamiento de agua, se llevaron a cabo estudios de adsorción en flujo continuo. Las curvas de ruptura obtenidas a diferentes concentraciones iniciales se muestran en la Figura 5. Para considerar que la columna estaba saturada se consideró un criterio de $C/C_0 > 0.9$. Una vez construidas las curvas de ruptura, se determinó:

La capacidad de adsorción del lecho fijo (q_{total}) (Ahmed & Hameed, 2018):

$$q_{total} = \frac{Q}{1000} \int_{t=t}^{t=t_{total}} C_R dt$$

Donde C_R es la concentración del contaminante removido (mg L^{-1}) y Q es el caudal de alimentación (mL min^{-1}).

El tiempo de ruptura (T_b) considerando la condición $C/C_0 > 0.1$

La altura de la zona de transferencia de masa (H_{MTZ}) (Calero, 2009) para las condiciones experimentales probadas (Tabla 1)

$$H_{MTZ} = \left[1 - \frac{\int_{t_0}^{t_s} \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) dt}{\int_{t_0}^{t_b} \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) dt} \right] \times H$$

Donde H es la altura del lecho, t_s el tiempo de saturación del lecho y t_b el tiempo de ruptura.

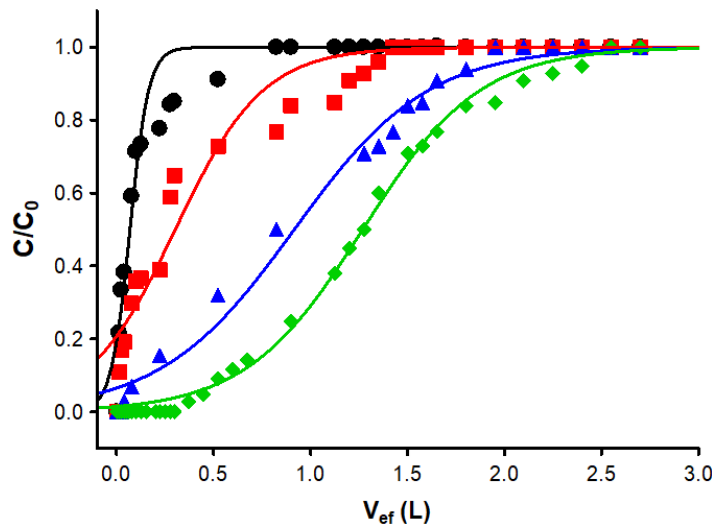


Figura 5. Curvas de ruptura obtenidas de pruebas de adsorción en flujo continuo utilizando 0,4 g de adsorbente. ($Z = 1$ cm), 2.5 mL min^{-1} y $C_0 = \bullet 50 \text{ mg g}^{-1}$, $\blacksquare 25 \text{ mg g}^{-1}$, $\blacktriangle 10 \text{ mg g}^{-1}$ y $\blacklozenge 5 \text{ mg g}^{-1}$.

Se observa que la capacidad máxima de adsorción en las condiciones ensayadas es de 23.18 mg g^{-1} debido a que el mecanismo de adsorción predominante en el proceso es una interacción física entre adsorbente y adsorbato. Teniendo en cuenta que el material adsorbente es no poroso ($S_{BET} = 1.0 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$), se concluye que la adsorción se produce en los sitios activos del material. Cuando las fibras se

empacan dentro de la columna, el área de contacto aumenta. En este sentido, el área superficial del adsorbente con relación al volumen en la solución aumenta, proporcionando un mayor contacto entre el colorante presente en la solución acuosa y el material adsorbente (Auta et al., 2013).

Finalmente, los datos experimentales de la columna se ajustaron bien a los modelos cinéticos de Thomas (Díaz-Blancas et al., 2020):

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{K_{Th}}{Q}(q_0 m - C_0 V_{ef})\right)}$$

Donde K_{Th} es la constante de velocidad de Thomas ($\text{mL min}^{-1} \text{mg}^{-1}$), q_0 es la máxima concentración de soluto en la fase sólida (mg g^{-1}).

Y Adams-Bohart (Benjedim et al., 2020):

$$\frac{C}{C_0} = e^{K_{AB} C_0 t - \frac{K_{AB} N_0 z}{v}}$$

Donde K_{AB} es la constante cinética de Adams-Bohart ($\text{L mg}^{-1} \text{min}^{-1}$), N_0 es la capacidad de sorción volumétrica (mg L^{-1}), z es la altura de relleno de la columna (cm) y v es la velocidad de flujo lineal (cm min^{-1}).

Se concluye que el modelo de Thomas ($R^2 > 0.99$) predice mejor el rendimiento de la columna de lecho fijo en comparación con el modelo de Adams-Bohart. Por lo tanto, se corroboran los mecanismos anteriormente expuestos, ya que el modelo de Thomas supone que la adsorción no está controlada por una reacción química entre adsorbente – adsorbato, sino por transferencia de masa en la interfaz (Romero-Cano et al., 2017).

Tabla 1. Parámetros de los modelos estudiados para la descripción de las curvas de ruptura obtenidas en la adsorción de azul lanasol sobre fibras de agave en flujo continuo.

C_0	q_s	q_b	T_b	H_{MZT}	Adams-Bohart			Thomas		
					K_{AB}	N_0	R	K_{th}	q_0	R
mg L^{-1}	mg g^{-1}	mg g^{-1}	min	cm	$\text{L mg}^{-1} \text{min}^{-1}$	mg L^{-1}		$\text{mL mg}^{-1} \text{min}^{-1}$	mg g^{-1}	
5	13.58	0.00	---	1.00	1.15×10^{-5}	8.58×10^4	0.6653	1.03	8.64	0.9678
10	23.18	0.69	5	0.96	3.37×10^{-5}	4.58×10^4	0.8032	0.44	18.91	0.9736
25	18.99	4.96	125	0.73	1.44×10^{-4}	2.01×10^4	0.8842	0.72	22.90	0.9943
50	15.23	7.22	240	0.75	4.39×10^{-4}	1.06×10^4	0.9144	1.66	15.85	0.9980

4. Conclusiones

Es posible obtener un material adsorbente natural (biosorbente) a partir del bagazo de agave (residuo sólido de la industria del tequila) mediante un sistema que representa una alternativa accesible y sencilla para estudios de adsorción en flujo continuo. El sistema experimental propuesto como columna de adsorción se validó debido a que sus componentes y disposición han brindado resultados favorables a nivel laboratorio. Con base en los resultados obtenidos, se propone el aprovechamiento de residuos sólidos de la industria tequilera como materia prima para la elaboración de materiales adsorbentes naturales para promover acciones que lleven a la industria a migrar hacia una economía circular. Así también se ha evidenciado que el sistema experimental propuesto cuenta con potencial aplicación como filtro de agua.

Financiamiento y/o Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por la Dirección de Investigación—Universidad Autónoma de Guadalajara a través de la “Convocatoria Proyectos de Investigación para incidir en el entorno UAG 2022”.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Contribución de autores

Conceptualización: L.A.R.-C. Metodología: L.O.-Á., J.A.P.-R., A.I.Z.-G., L.A.R.-C. Investigación: M.E.G.-R. Validación: C.S.G.-N. Análisis formal: A.I.Z.-G., L.A.R.-C. Escritura (borrador original): Todos los autores. Escritura (revisión y edición): L.A.R.-C. Recursos: L.A.R.-C. Supervisión: L.O.-Á., J.A.P.-R., A.I.Z.-G., L.A.R.-C. Administración del proyecto: L.A.R.-C.

Referencias

- Ahmed, M. J. & Hameed, B. H. (2018). Removal of emerging pharmaceutical contaminants by adsorption in a fixed-bed column: A review. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 149, 257–266. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.12.012>
- Aksu, Z. (2005). Application of biosorption for the removal of organic pollutants: a review. *Process biochemistry*, 40(3-4), 997-1026. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.04.008>
- Anastas, P., & Eghbali, N. (2010). Green chemistry: principles and practice. *Chemical Society Reviews*, 39(1), 301-312. <https://doi.org/10.1039/B918763B>
- Auta, M.; Hameed, B.H. (2013). Coalesced Chitosan Activated Carbon Composite for Batch and Fixed-Bed Adsorption of Cationic and Anionic Dyes. *Colloids Surf. B Biointerfaces*, 105, 199–206. [10.1016/j.colsurfb.2012.12.021](https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2012.12.021)
- Benjedim, S., Romero-Cano, L. A., Pérez-Cadenas, A. F., Bautista-Toledo, M. I., & Carrasco-Marín, F. (2020). Removal of emerging pollutants present in water using an E-coli biofilm supported onto activated carbons prepared from argan wastes: Adsorption studies in batch and fixed bed. *Science of The Total Environment*, 720, 137491. [10.1016/j.scitotenv.2020.137491](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137491)
- Calero, M., Hernáinz, F., Blázquez, G., Tenorio, G. & Martín-Lara, M. A. (2009) Study of Cr (III) biosorption in a fixed-bed column. *J. Hazard. Mater.* 171, 886–893. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.082>
- Dąbrowski, A. (2001). Adsorption—from theory to practice. *Advances in colloid and interface science*, 93(1-3), 135-224. [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(00\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(00)00082-8)
- Díaz-Blancas, V.; Aguilar-Madera, C.G.; Flores-Cano, J.V.; Leyva-Ramos, R.; Padilla-Ortega, E.; Ocampo-Pérez, R. (2020) Evaluation of Mass Transfer Mechanisms Involved during the Adsorption of Metronidazole on Granular Activated Carbon in Fixed Bed Column. *J. Water Process. Eng.* 36, 101303. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101303>
- Grosseck, G., Țîru, L. G., & Bran, R. A. (2019). Education for sustainable development: Evolution

- and perspectives: A bibliometric review of research, 1992–2018. *Sustainability*, 11(21), 6136. <https://doi.org/10.3390/su11216136>
- Gómez-Navarro, C. S., Warren-Vega, W. M., Serna-Carrizales, J. C., Zárate-Guzmán, A. I., Ocampo-Pérez, R., Carrasco-Marín, F., ... & Romero-Cano, L. A. (2022). Evaluation of the Environmental Performance of Adsorbent Materials Prepared from Agave Bagasse for Water Remediation: Solid Waste Management Proposal of the Tequila Industry. *Materials*, 16(1), 8. <https://doi.org/10.3390/ma16010008>
- Heidarinejad, Z., Dehghani, M. H., Heidari, M., Javedan, G., Ali, I., & Sillanpää, M. (2020). Methods for preparation and activation of activated carbon: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18, 393–415. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00955-0>
- Jjagwe, J., Olupot, P. W., Menya, E., & Kalibbala, H. M. (2021). Synthesis and application of Granular activated carbon from biomass waste materials for water treatment: A review. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 6(4), 292–322. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2021.03.003>
- Reynel-Avila, H. E., Mendoza-Castillo, D. I., Bonilla-Petriciolet, A. & Silvestre-Albero, J. (2015). Assessment of naproxen adsorption on bone char in aqueous solutions using batch and fixedbed processes. *J. Mol. Liq.*, 187–195. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.05.013>
- Romero-Cano, L.A.; González-Gutiérrez, L.V.; Baldenegro-Pérez, L.A.; Carrasco-Marín, F. (2017) Grapefruit Peels as Biosorbent: Characterization and Use in Batch and Fixed Bed Column for Cu(II) Uptake from Wastewater. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 92, 1650–1658. <https://doi.org/10.1002/jctb.5161>
- Yin, C. Y., Aroua, M. K., & Daud, W. M. A. W. (2007). Review of modifications of activated carbon for enhancing contaminant uptakes from aqueous solutions. *Separation and purification technology*, 52(3), 403–415. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2006.06.009>