

DOI: 10.24850/j-tyca-2022-01-04

Artículos

Tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando carbón activado preparado de bagazo de caña de azúcar

Treatment of domestic wastewater using activated carbon prepared from sugarcane bagasse

Ebelia Del Angel¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6567-4263>

Mayra Agustina Pantoja², ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7116-7500>

Rosendo López³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6850-8973>

Alida Elizabeth Cruz⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7216-2699>

¹Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Posgrado en Ciencias en Ingeniería, Cunduacán, Tabasco, México, ebelia.delangel@ujat.mx

²Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Posgrado en Ciencias en Ingeniería, Cunduacán, Tabasco, México, mayra.pantoja@ujat.mx

³Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Posgrado en Ciencias en Ingeniería, Cunduacán, Tabasco, México, rosendo.lopez@ujat.mx

⁴Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Posgrado en Ciencias en Ingeniería, Cunduacán, Tabasco, México, alida.cruz@ujat.mx

Autora para correspondencia: Ebelia del Angel-Meraz, ebelia.delangel@ujat.mx

Resumen

Los residuos de la industria de la caña de azúcar representan uno de los principales agro-residuos. A menudo se consideran como basura y se pueden utilizar como materia prima barata para obtener carbón activado (CA). Por otra parte, el agua residual doméstica contiene residuos de grasas y aceites causantes del taponamiento de las tuberías; se puede lograr la adsorción de estas sustancias con carbón activado. En este trabajo se obtuvo CA a partir de residuos de bagazo de caña de azúcar mediante un método simplificado de dos pasos: activación química con H_3PO_4 y pirólisis a 973 K. La caracterización textural y estructural fue por fisisorción N_2 , microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X (RDX). El carbono obtenido (S_{BET} de $914 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$) mostró una estructura análoga al grafito y una superficie microporosa característica de los carbonos activados. El carbono sintetizado se evaluó en la adsorción de grasas y aceites de aguas residuales domésticas. Los

resultados mostraron el valor agregado que se obtiene del bagazo de caña para eliminar eficientemente grasas y aceites de aguas residuales, ya que después de ocho horas se encontró que su CA adsorbió el 94 % de las grasas y aceites contenidas en las aguas residuales, lo cual es similar a la adsorción de un CA comercial (96 %). También se evaluó la cinética de adsorción con las ecuaciones de pseudo primer orden, pseudo segundo orden e intrapartícula; los datos experimentales mostraron un mejor ajuste con el modelo de pseudo segundo orden.

Palabras clave: carbón activado, grasas y aceites, bagazo de caña de azúcar, agua residual.

Abstract

Solid residues of sugar cane industry represent one of the major agro-residues. They are often considered as waste; however, they can be used as an inexpensive raw material for different applications, including production of activated carbon (CA) to be used as adsorbent in sustainable processes. On the other hand, domestic wastewater contains grease and oil residues, which causes pipe plugging. Adsorption of these compounds is possible with activated carbon. In this work, CA was obtained from sugarcane bagasse residues through a simplified two steps method: chemical activation with H_3PO_4 and pyrolysis at 973 K. Textural and structural characterizations were performed by N_2 physisorption, scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD). Carbon samples ($S_{\text{BET}} = 914 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$) showed a structure analogous to graphite and microporous surface characteristics of activated carbon. The adsorption

of oils from domestic wastewater was evaluated with the synthesized carbon. Results showed that after eight hours, the sugarcane bagasse activated carbon adsorbed 94 % of the oils contained in wastewater. These data are similar to the adsorption process carried out in a commercial activated carbon (96 %). In this work also adsorption kinetics were evaluated with pseudo first-order, pseudo second order, and intraparticle equations, the experimental data showed a better fit with the pseudo second order model and to the Langmuir isotherm. These results prove the fact we can add value to sugarcane bagasse residues to efficiently remove greases and oils from wastewater.

Keywords: Activated carbon, grease and oils, sugarcane bagasse, wastewater.

Recibido: 11/03/2020

Aceptado: 01/01/2021

Introducción

Los adsorbentes procedentes de fuentes naturales han recibido una atención especial en los últimos cincuenta años; ello, desde que los

materiales utilizados se consideran que deben ser amigables con el medio ambiente. Así, muestran una alta actividad en la descontaminación de aguas residuales con un bajo consumo de reactivos químicos para su preparación. Entre los adsorbentes, los carbones activados son los materiales más prometedores debido a la disponibilidad de la biomasa para su obtención. Se han reportado varios precursores, como cáscara de coco, cáscara de arroz, hoja de palma, corteza de madera, cáscara de cacahuate, u otros materiales que contienen lignina, celulosa y hemicelulosa.

La naturaleza de adsorción del carbón activado es diferente no sólo por la fuente de biomasa, sino también por el procedimiento químico utilizado para su obtención (Garg, Amita, Kumar, & Gupta, 2004; Velázquez-Trujillo, Bolaños-Reynoso, & Pliego-Bravo, 2010; Hajira, Muhammad, Nasir, Uzma, & Tahreem, 2016; Corral-Escárcega *et al.*, 2017; Ramírez-Rodríguez, Reyes-Ledezma, Chávez-Camarillo, Cristian Urbina, & Morales-Barrera, 2018; Almeida *et al.*, 2019). A diferencia de las prácticas comunes de purificación, como la destilación, cristalización y extracción de disolventes, la adsorción permite eliminar trazas de contaminantes debido a su naturaleza polar, lo que habilita una fuerte unión con moléculas polares y orgánicas en su superficie.

Las propiedades texturales y estructurales del carbón activado son útiles en el tratamiento del agua residual. Para muchas aplicaciones de adsorción, como la eliminación de iones metálicos (Garoma & Badriyha, 2010; Izzeldin, Bice, Ngilaa, & Nyamoria, 2013; Kuncoro, Dwi, Handoko, Oktiani, & Septya, 2018a; Kuncoro, Mitha-Isnadina, Darmokoesoemo, Dzembrahmatiny, & Kusuma, 2018b) o purificación de proteínas, la

pureza de los carbonos activados es relevante (Cruz, Ainassaari, Gómez, Solís, & Keiski, 2018; Andrade *et al.*, 2018).

La naturaleza polar de los carbonos permite que las moléculas orgánicas y polares se unan fuertemente a su superficie. Debido a esta propiedad, se puede considerar como un adsorbente casi universal. En el caso del tratamiento del agua, el carbón activado actúa como un adsorbente eficaz y económico con múltiples efectos, al mejorar el sabor y olor del agua, y eliminar contaminantes (Leyva-Ramos, Díaz-Flores, Guerrero-Coronado, Mendoza-Barrón, & Aragón-Piña, 2004; Ramavandi, Asgari, Faradmal, Sahebi, & Roshani, 2014; Leyva-Ramos, Rivera-Utrilla, Medellín-Castillo, & Sánchez-Polob, 2010; Goswami & Phukan 2017; Ghani, Yusoff, Zaman, Zamri, & Andas, 2017; Islam, Ahmed, Khanday, Asif, & Hameed, 2017).

En la Industria azucarera se obtiene una tonelada de bagazo de caña de azúcar por tonelada de azúcar refinada. Una parte de este bagazo se utiliza como combustible para las calderas o se vende a la industria del papel (Meza, Lomascolo, & Laurence, 2006). Sin embargo, la eliminación y el confinamiento de los residuos restantes se convierten en un grave problema de control ambiental. Algunas investigaciones se han centrado en el uso del bagazo de caña de azúcar para eliminar grasas y aceites, e hidrocarburos. Almeida *et al.* (2019) realizó la adsorción de petróleo emulsionado, con bagazo de caña, logrando eliminar el 90 %. La mayoría de los estudios se centra en la eliminación de hidrocarburos de petróleo utilizando como biosorbente el bagazo de caña de azúcar sin transformarlo a carbón activado (Leiva-Mass, Martínez-Nodal, Esperanza-Pérez, Rodríguez-Rico, & Gordiz-García, 2012; Acosta, 2013; Rincones-

Poyer, Valladares, Danglad-Flores, & Salazar-Palencia, 2015). En la presente investigación se sintetizó y caracterizó carbón activado elaborado a partir del bagazo de caña de azúcar para evaluar su eficiencia en la eliminación de grasas y aceites de aguas residuales domésticas con respecto a un carbón vegetal comercial.

Materiales y métodos

Síntesis de carbón activado

El bagazo de caña de azúcar se obtuvo del Ingenio Presidente Benito Juárez, localizado en Cárdenas, Tabasco, México. La materia prima se lava para remover sustancias inorgánicas residuales, posteriormente se seca al sol durante tres días. Se pesan las muestras y se activan en medio ácido (H_3PO_4 1.8 M) durante 48 h (Mateo-Sánchez, 2011); se someten a un proceso de carbonización a 973 K durante 1 h en una mufla. El carbón resultante se lava con agua destilada, a una temperatura de 70 °C y una solución NaOH (0.1M), hasta ajustar el pH-6; se seca en una mufla a 373 K durante 8 h (Figura 1).

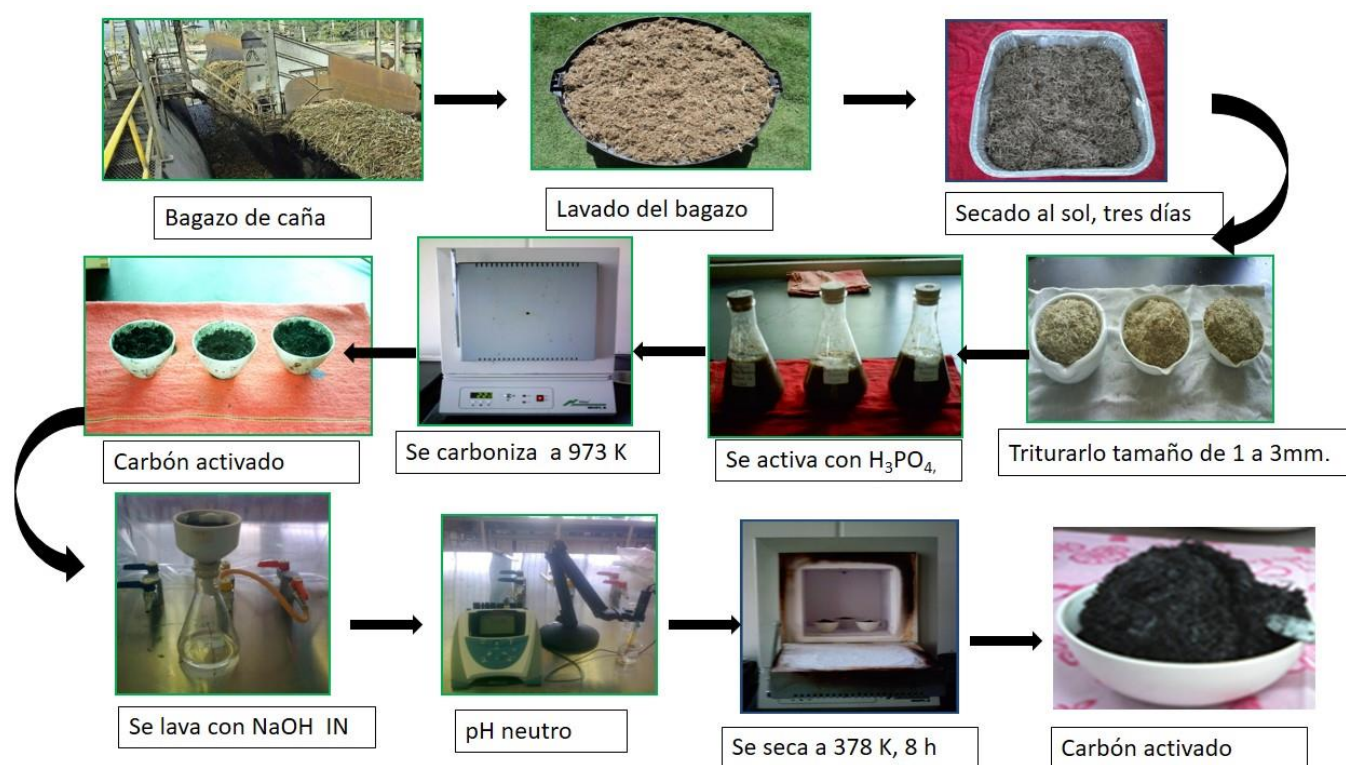


Figura 1. Síntesis del carbón activado a partir de bagazo de caña de azúcar.

Caracterización del carbón activado

Los patrones de difracciones del carbón en polvo se realizaron en un equipo de rayos X (RDX), en el rango $20^\circ \leq 2\theta \leq 80^\circ$ en un difractómetro

Phillips X'Pert, usando radiación CuK ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), a una velocidad de goniómetro de $1^\circ (2 \text{ min}^{-1})$. Las micrografías del carbón activado se obtuvieron en un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6010LA con detector EDS (SEM-EDS).

Para la medición del punto isoelectrico (potencial Z vs pH) se preparó una solución de 0.05 mg de carbón activado en 10 ml de agua desionizada. Posteriormente se dispersó en un procesador ultrasónico; se analizó en el equipo Zetasizer Nano ZS, equipado con un autotitulado utilizando una solución HCl de 0.5 M y 0.25 M de NaOH.

La superficie específica, el volumen de los poros y la distribución del tamaño de los poros de los carbones activados se obtuvieron a partir de fisisorción de N_2 utilizando los métodos BET convencionales en un equipo Micromeritics TriStar II. Las medidas se realizaron a la temperatura normal de ebullición del N_2 a temperatura de 77 K y a presión atmosférica.

Determinación de grasas y aceites

Las muestras de agua residual se colectaron de la red de desagüe del Edificio de Comedores, ubicado en la División Académica de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Las condiciones experimentales se realizaron por lotes en frascos Erlenmeyer de 1 l, en el cual se agregó un gramo de carbón activado, que se dispersó

en 1 l de aguas residuales. Las muestras se recogieron por triplicado a diferentes tiempos de 0.5, 1, 8, 24 y 48 h. Se utilizó la Norma NMX-AA-005-SCFI-2000, para determinar el contenido de grasas y aceites. La capacidad de adsorción del carbón activo de bagazo de caña de azúcar (BAC) se comparó con un carbón activado comercial (CAC- marca Repsol), en las mismas condiciones de reacción descritas anteriormente. La capacidad de adsorción (q_t) del CAC y BAC en mg/g se calculó de acuerdo con la Ecuación (1):

$$q_t = (C_o - C_t)v/w \quad (1)$$

Donde:

C_o = concentración inicial de la grasa y aceite en la mezcla de agua residual (mg/l).

C_t = concentración de la grasa y el aceite final en la fase líquida (mg/l).

v = volumen utilizado de agua residual utilizada (l).

w = masa del adsorbente (g).

Los modelos evaluados en la cinética de adsorción fueron (Tabla 1) de pseudo primer orden, pseudo segundo orden y modelo de difusión intrapartícula (Almeida *et al.*, 2019; Kuncoro *et al.*, 2018a; Kuncoro *et al.*, 2018b; Corral-Escárcega *et al.*, 2017; Andrade *et al.*, 2018; Ramírez-Rodríguez *et al.*, 2018; Saad, Isa, & Bahari, 2010; Izzeldin *et al.*, 2013).

Tabla 1. Modelos cinéticos e isotermas para evaluar el CAC y el BAC.

Modelo	Ecuación	Graficar	Núm. ecuación	Referencia
Pseudo primer orden	$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 t$	$\ln(q_e - q_t) \text{ vs } t$	(2)	Lagergren (1898)
Pseudo segundo orden	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e t}$	$\frac{t}{q_t} \text{ vs } t$	(3)	Ho y McMay (1998)
Difusión intrapartícula	$q_t = K_{int} t^{0.5} + C$	$q_t \text{ vs } t^{0.5}$	(4)	Weber y Morris (1963)
Isoterma de Langmuir	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{1}{q_m C_e}$	$\frac{C_e}{q_e} \text{ vs } C_e$	(5)	Langmuir (1918)
Isoterma de Freundlich	$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n \log C_e}$	$\log q_e \text{ vs } \log C_e$	(6)	Freundlich (1906)

Resultados y discusión

Caracterización del carbón activado

Difracción de rayos X

El difractograma de las Figura 2a y Figura 2b corresponde al BAC y CAC. Se observa la presencia de un carbón amorfo típico a 2θ a 28° , 34° , 38° y 50° . El difractograma también muestra dos picos asimétricos correspondientes en 2θ a 15° y 55° , que se asignan al grafito (Contreras *et al.*, 2008; Adinaveen, Kennedy, Vijaya, & Sekaran, 2013). Los picos de grafito se muestran bien definidos, identificando que el carbón activado tiene dos tipos de estructuras porosas características de estos materiales. El primer tipo es una estructura microcristalina similar al grafito, que consiste en capas paralelas de átomos de carbono dispuestos hexagonalmente. El segundo tipo de estructura se describe como una celosía tridimensional de hexágonos de carbono desordenados debido a la formación de estructuras de benceno formadas durante el proceso de

carbonización (Almeida *et al.*, 2019). En el caso de la Figura 2b, corresponde al carbón comercial (CAC), se puede observar la identificación de un solo pico muy definido y el cual corresponde al fullereno. Los fullerenos son la tercera forma más estable del carbono, después del diamante y el grafito.

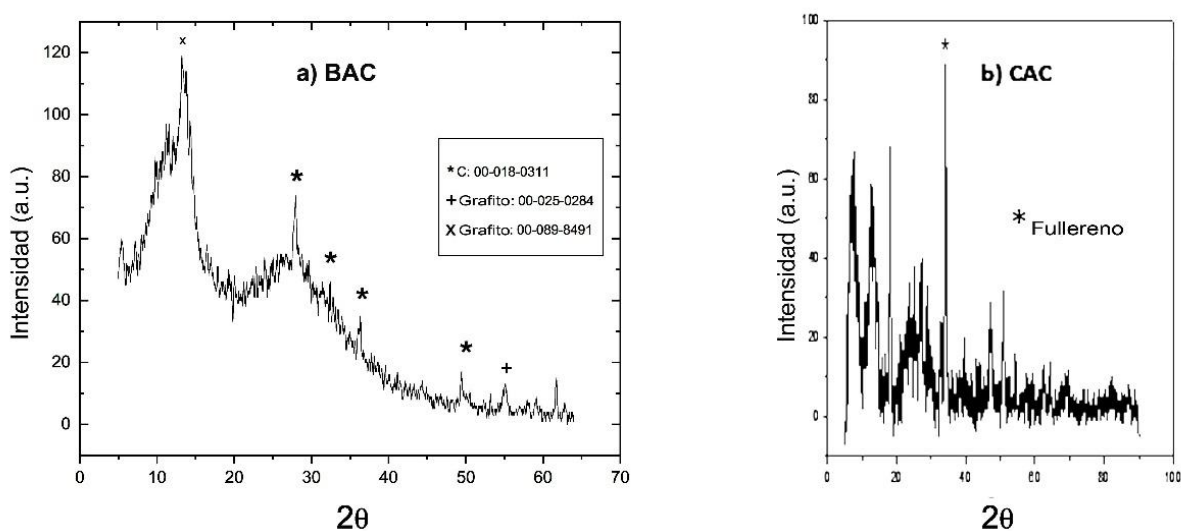


Figura 2. Análisis por difracción de rayos X de carbones activados: a) BAC; b) carbón CAC.

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

En la Figura 3a se muestra la morfología del BAC antes de ser utilizado para el tratamiento de aguas residuales. Se observa la disposición amorfa de las placas de carbono con microporos formados en los espacios entre ellas. La presencia de fibras alargadas en la muestra de bagazo de la caña de azúcar garantiza que puede participar en los procesos de adsorción. Yun, Liu y Zhang (2010) coinciden en que la estructura se debe a la presencia de fibras unidas, probablemente debido a la presencia de hemicelulosa y lignina. El análisis de espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS) se muestra a continuación en orden de mayor a menor en relación con los elementos que constituyen la muestra en % en masa; C (64.53 %) > O (26.29%) > P (4.64 %) > Si (2.96%) > Na (1.88%). La presencia del P se debe al uso del ácido fosfórico para la activación del material. La presencia del sodio se debe al empleo de hidróxido de sodio para la neutralización del carbón activado. La Figura 3b muestra al BAC después del tratamiento de ocho horas; se observa que la superficie del material es porosa y presentan distintos tamaños; los poros del material pueden ayudar en la difusión interna, y adsorción de las grasas y aceites. El análisis de espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS) muestra en orden de mayor a menor los elementos que constituyen la muestra en % en masa; C (78.46 %) > O (18.28 %) > P (1.45 %) > Si (0.83 %) > Ca (0.27 %), S (0.18 %) > Cu (0.53 %).

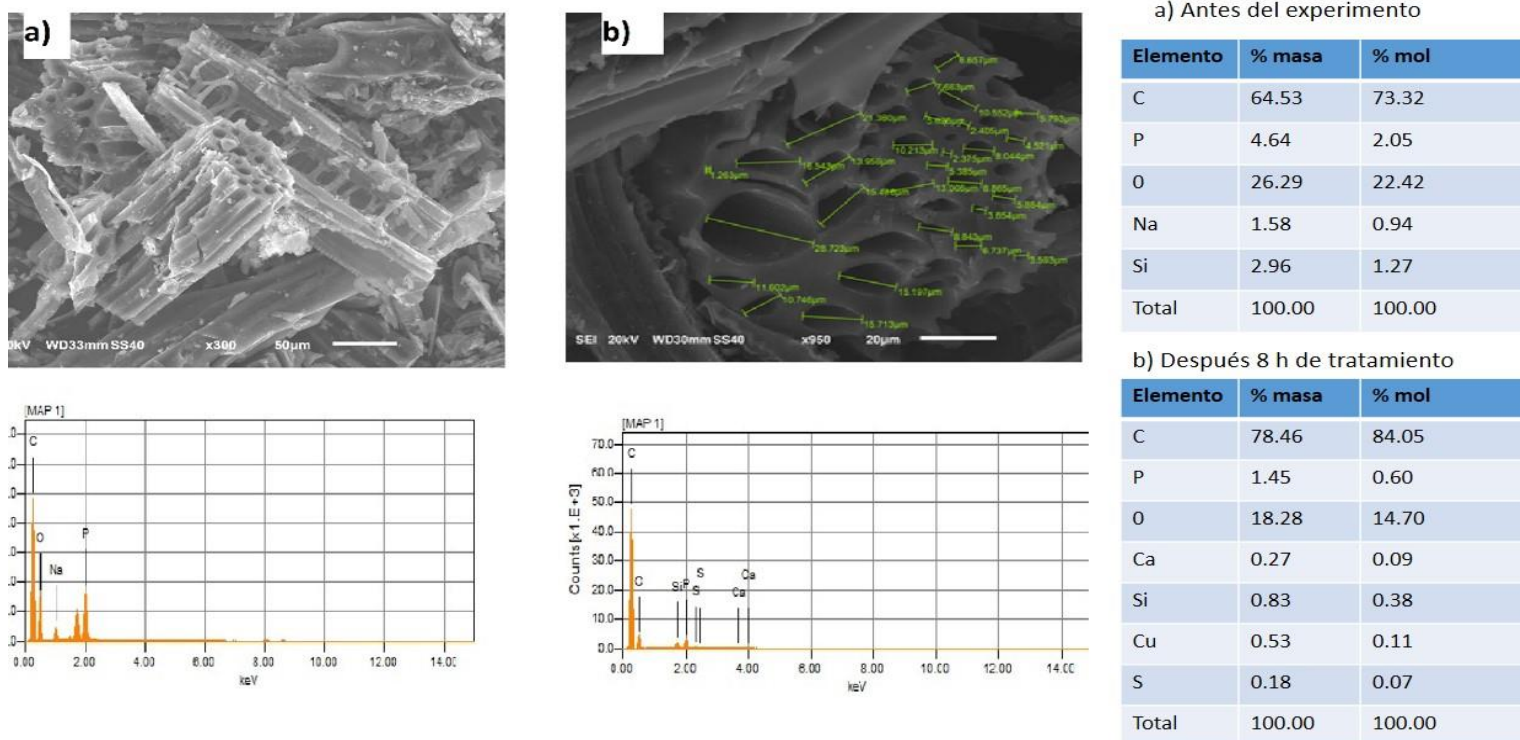


Figura 3. Micrografías de SEM del bagazo de caña de azúcar del BAC:
a) antes del tratamiento del agua residual; b) a las ocho horas del tratamiento del agua residual.

Punto isoelectrico del carbón activado BAC

El punto de carga cero (ZCP) y el punto isoelectrico (IEP) del adsorbente permiten determinar la distribución global de la carga en su superficie y,

por lo tanto, la capacidad de retener contaminantes. El punto de carga cero indica el rango más adecuado de valor de pH para lograr la eliminación eficiente de un determinado contaminante aniónico o catiónico. Por otro lado, el potencial zeta (ZP) está determinado por la naturaleza de la superficie de la partícula y el medio de dispersión. La Figura 4 muestra el potencial Z de BAC en función del pH. El punto de carga cero intercepta el punto isoeléctrico a pH 2.50.

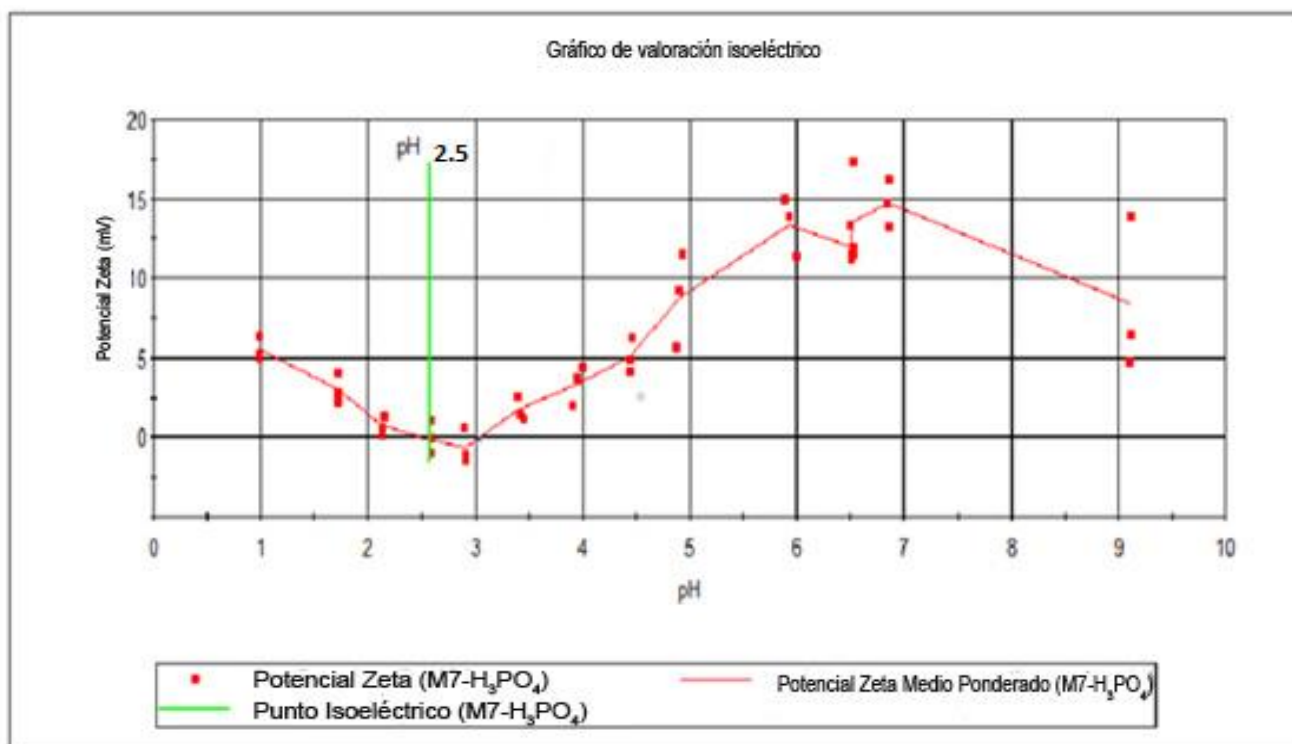


Figura 4. Potencial Z de BAC en función del pH.

En el IEP, las partículas no experimentan repulsión, puede haber alguna atracción entre las partículas cerca de este valor. Dado que el ZP corresponde a un punto de equilibrio de cargas en el material absorbente, los valores de pH superiores a PZ generan una superficie cargada negativamente; mientras que un pH inferior al PZ, una superficie cargada positivamente. La capacidad de adsorción de un carbón activado está determinada por su composición química y la distribución de las cargas en su superficie (Menéndez, Illán-Gómez, & Radovic, 1995; Appel, Ma, Dean, & Kennelly, 2003; Izzeldin *et al.*, 2013; Amaringo & Hormanza, 2013; Andrade *et al.*, 2018).

Así, este parámetro es muy importante para establecer las condiciones favorables en términos del valor de pH para la eliminación eficiente de un determinado contaminante. Existen pocas referencias de estudios de potencial zeta para el carbón activado fabricado de bagazo de caña, por lo que se utilizará la referencia del trabajo de Izzeldin *et al.* (2013), en donde reportaron que la adsorción de Pb^{2+} sobre nanotubos fabricados con bagazo de caña de azúcar se favoreció un $pH = 2$; este efecto se atribuyó al aumento del número de grupos cargados negativamente en la superficie del adsorbente, que llevó a una alta adsorción de Pb^{2+} ; por el contrario, a valores de pH inferiores de ZPC, la adsorción fue menor debido al hecho de que los iones metálicos compiten con los iones de hidrógeno para los sitios de adsorción.

Análisis textual del carbón activado

La Tabla 2 muestra los resultados texturales de BAC y CAC. El BAC tiene una superficie específica más baja (S_{BET}) que el CAC, con una diferencia del 32 %; también mostró un volumen de poro (V_T) más bajo que el CAC. Según el resultado del diámetro medio de los poros (D_P), ambos carbonos están en el rango de mesoporos (2-50 nm), cerca de los microporos. Se sabe que los poros pequeños son los principales responsables de la capacidad de adsorción de los carbonos. Sobre la base de estos resultados se espera que el uso de carbón activado de bagazo de caña de azúcar podría actuar como un adsorbente eficiente al compararlo con el carbón activado comercial.

Tabla 2. Parámetros textuales de BAC y CAC.

Carbón activado	S_{BET}	V_T	D_P
	m^2g^{-1}	(cm^3g^{-1})	nm
BAC	914	0.5	3.6
CAC	1 353	0.9	3.9

La Figura 5 a y Figura 5b muestran las isothermas de adsorción-desorción del BAC, CAC. De acuerdo con IUPAC son isothermas de adsorción tipo I, característica de los sólidos microporosos. A partir de la determinación del diámetro de los poros hay una combinación de mesoporos y microporos. El proceso de adsorción primario se lleva a cabo

en los microporos estrechos y el proceso de adsorción secundario se efectúa en los poros más anchos. Además, tiene un lazo de histéresis tipo H_4 , que indica la presencia de poros situados entre placas, con un tamaño y forma uniformes, característicos de los carbonos activados (Leofanti, Padovan, Tozzola, & Venturelli, 1998; Adinaveen *et al.*, 2013; Andrade *et al.*, 2018).

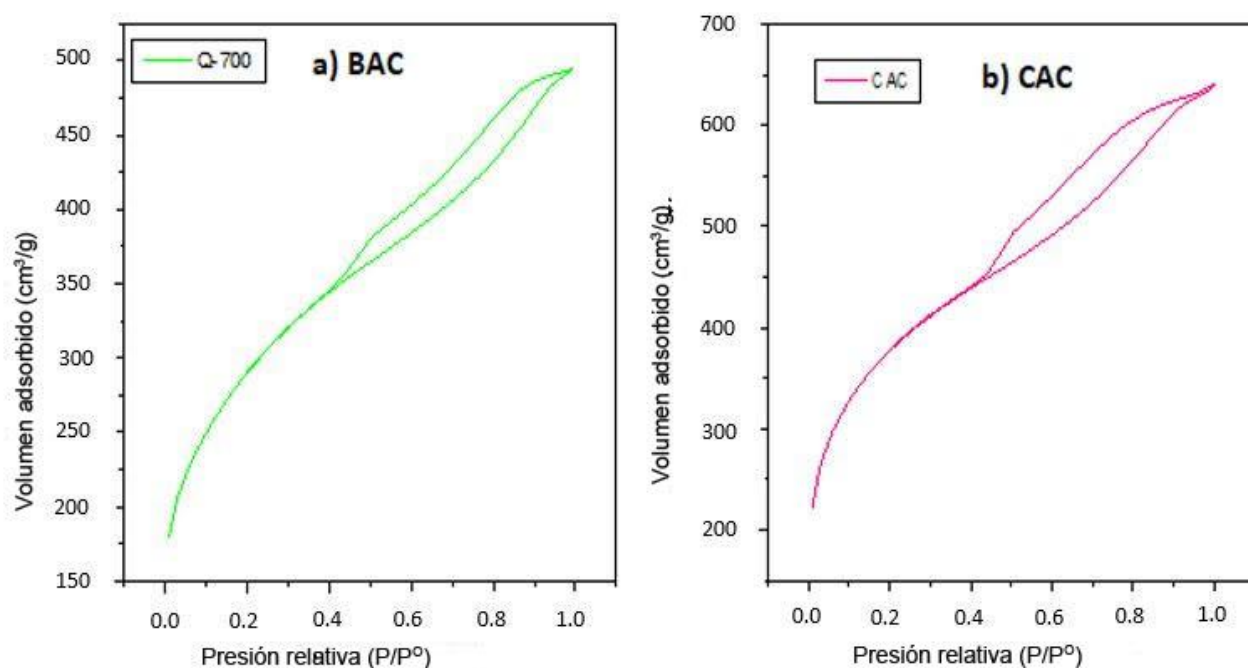


Figura 5. Isotherma de adsorción-desorción de carbón activado del a) BAC y b) CAC.

Determinación de grasas y aceites

Las aguas residuales domésticas utilizadas para la evaluación del carbón activado mostraron un contenido de 5 293 mg/l de grasas y aceites en promedio. Con base en las directrices anteriores, el cuerpo de agua bajo análisis muestra un alto contenido de grasas y aceites, dentro del rango de 5 350, 5 260 y 5 270 mg/l (de las tres repeticiones realizadas). De acuerdo con las Normas Oficiales Mexicanas (NOM-001-ECOL-1996; NOM-002-ECOL-1996; NOM-003-ECOL-1997), el rango límite aceptable para descargas de aguas residuales en México es de 15 a 100 mg/l.

Las concentraciones de grasas y aceites en diferentes momentos durante el proceso de adsorción utilizando carbón activado se muestran en la Figura 6. El aumento de la capacidad de adsorción es después de 8 h de tratamiento para carbonos (BAC y CAC), disminuyendo la concentración de grasa y aceite a 240 mg/L para CAC y 320 mg/L para BAC. En tiempos de residencia de 8 h, el contenido de grasa y aceite se redujo en un 96 % (CAC) y un 94 % (BAC), respectivamente (Xue *et al.*, 2014).

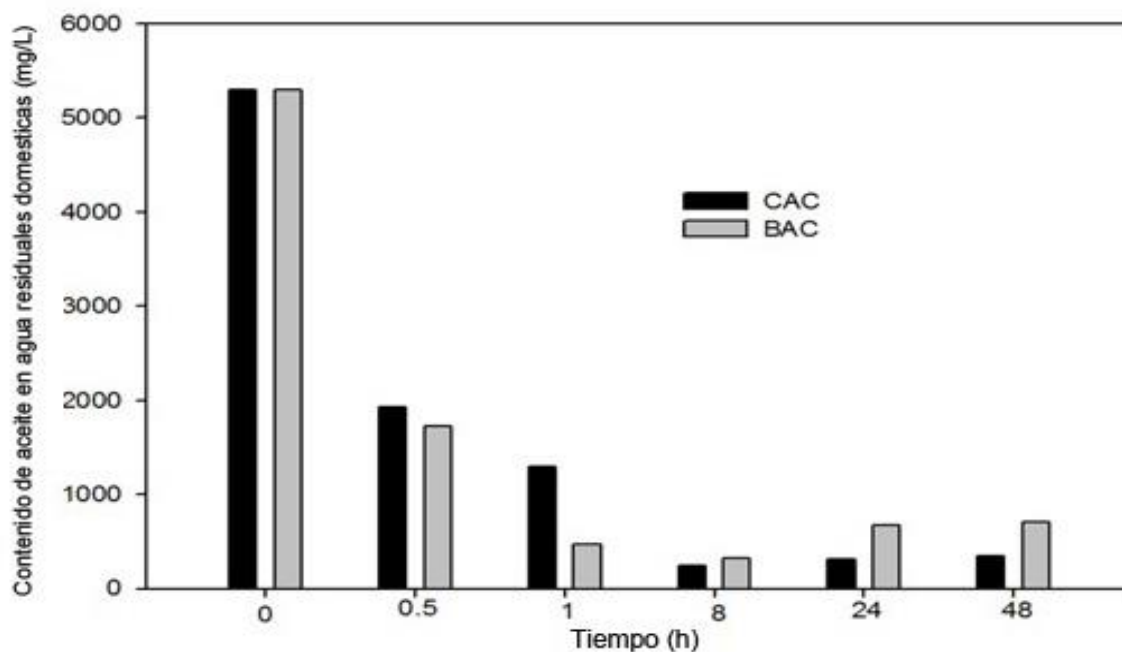


Figura 6. Contenido de grasas y aceites en aguas residuales domésticas durante el proceso de adsorción con BAC y CAC.

La disminución de la capacidad de adsorción después de 8 h se puede atribuir a la posible saturación de poros en ambos carbones; como se puede ver en 24 y 48 h, el carbón se agota debido a la quimisorción de grasas y aceites en el carbón activado; este proceso no es reversible, por lo que las moléculas retenidas no se separarán fácilmente. El mecanismo de adsorción depende de las características físicas y/o químicas del adsorbente, así como del proceso de transporte de masa (Xue *et al.*, 2014).

El estudio de la cinética implica la determinación de la velocidad de reacción, así como el mecanismo del proceso de adsorción. Uno de los

objetivos de este trabajo es entender la interacción entre el carbón activado, y las grasas y aceites.

El proceso de adsorción se muestra en la Figura 7, con tres etapas principales: 1) primera etapa, el agua residual (grasas y aceites) se difunde desde la fase líquida hasta la superficie del adsorbente (etapa de difusión de la película); 2) en la segunda etapa, las grasas y los aceites del agua residual entran en los poros internos del adsorbente desde la superficie del adsorbente (etapa de difusión intrapartícula); 3) en la tercera etapa, el proceso de adsorción de la grasa y el aceite entran en el sitio de adsorción (quimisorción). En estas tres etapas, la resistencia a la transferencia de masa del adsorbato es diferente; la máxima resistencia a la transferencia de masa, así como el paso más lento, determina el proceso de adsorción. El equilibrio de adsorción establece con rapidez los sitios de adsorción (Xiaohong *et al.*, 2018; Kuncoro *et al.*, 2018a).

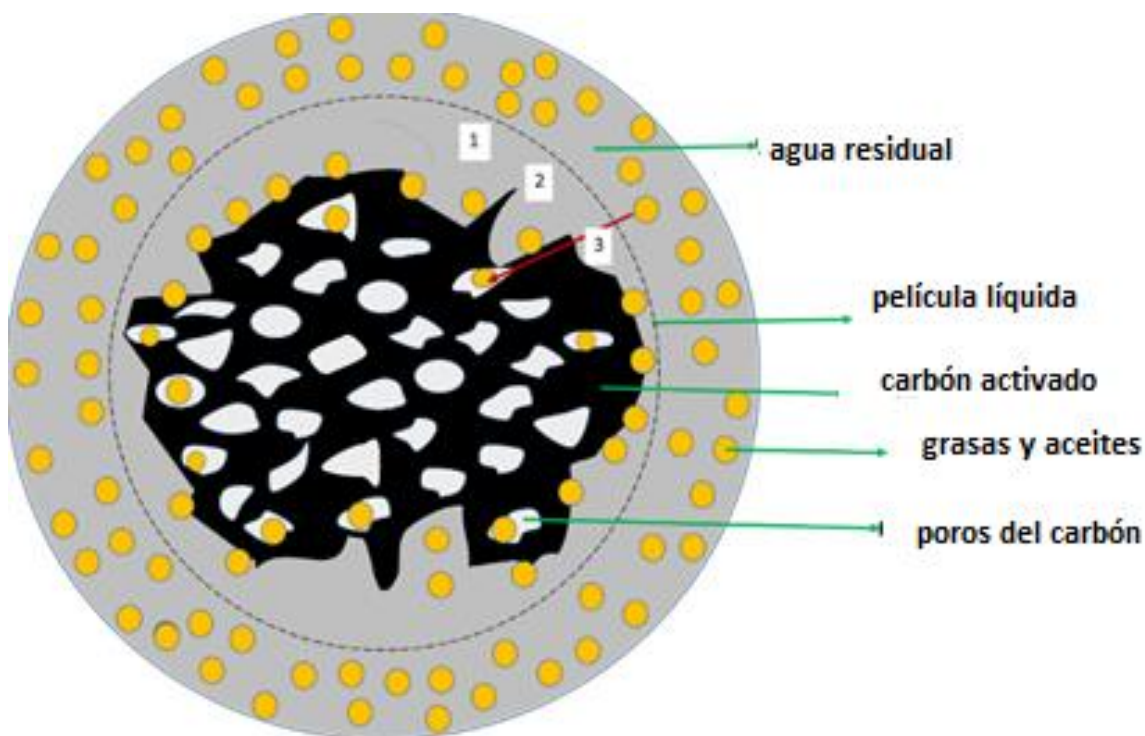


Figura 7. Esquema que representa el mecanismo físico de adsorción de grasa y aceites en carbón activado.

El modelo cinético del pseudo primer orden se basa en la teoría de la difusión de la membrana y considera que la velocidad de adsorción es proporcional a la diferencia de la capacidad de la adsorción del equilibrio y la cantidad de adsorción (Ecuación (2)). El modelo de pseudo segundo orden supone que el proceso de adsorción incluye la quimisorción, la adsorción en la superficie y la difusión en las partículas (Ecuación (3)). El modelo intrapartícula propone que la eliminación del adsorbato varíe con la raíz cuadrada; por lo tanto, el coeficiente de difusión intrapartícula (k_{int}) puede calcularse con la Ecuación (4) (Tabla 1).

En la Tabla 3 se resumen los resultados de los modelos cinéticos. Se observan los datos experimentales de CAC y BAC. En la ecuación de pseudo primer orden no se ajustan los datos experimentales; el valor de correlación (R^2) en ambos casos son 0.41 y 0.11 para CAC y BAC, respectivamente. La Tabla 3 muestran el modelo cinético de pseudo segundo orden para el CAC y el BAC (t/qt vs. t) muestra que los datos experimentales de ambos carbonos activados tienen un buen ajuste con el modelo cinético (R^2 a 0.99 y K_2 a 0.0002 g/ mg.min) logrando a las ocho horas una disminución de las grasas y aceites de 240 y 320 mg/g para CAC y BAC, respectivamente. Se puede deducir que este modelo representa la adsorción de grasas y aceites en BAC y CAC.

Tabla 3. Los parámetros de los modelos cinéticos para la adsorción de grasas y aceites en carbón activado.

Modelo	Parámetros	BAC	CAC
Experimental	q_e (mg/g)	320	240
Pseudo primer orden	K_1/min^{-1}	0.0002	0.0005
	R^2	0.1171	0.4086
Pseudo segundo orden	K_2 (g/mg.min)	0.0002	0.0002
	R^2	0.9998	0.9999
Difusión intrapartícula	$K_{\text{int}}(\text{mg/g.min}^{0.5})$	3.68	3.94
	R^2	0.792	0.671

Las investigaciones de Yun *et al.* (2010) indican que el modelo de pseudo segundo orden representa mejor el proceso de adsorción utilizando como adsorbente el bagazo de caña; esto confirma que la velocidad de adsorción es controlada por un proceso de quimisorción. El mecanismo de adsorción depende de las características físicas y/o químicas del adsorbente, así como del proceso de transporte masa (Xue *et al.*, 2014).

La Tabla 3 muestra que los datos experimentales no se ajustan a una línea recta en el modelo cinético de difusión intraparticular; la adsorción de ambos carbones tiene más afinidad con un modelo parabólico; sin embargo, las correlaciones para el BAC ($R^2 = 0.792$) y CAC ($R^2 = 0.671$) son bajas. Otros estudios utilizando como adsorbente el carbón activado de bagazo de caña indican que este modelo sí está involucrado en el proceso de adsorción (Almeida *et al.*, 2019).

De los resultados obtenidos del estudio cinético de adsorción se puede concluir que la adsorción de grasas y aceites en ambos carbones activados sigue una cinética de pseudo segundo orden. Este modelo predice que el proceso de adsorción ocurre en la quimisorción, y que hay un periodo transitorio controlado por modelo cinético de difusión intrapartícula.

Los datos experimentales se graficaron siguiendo la Ecuación (5) (Tabla 1) y se ajustaron a una línea recta ($y = mx + b$); se representó según el modelo Lineal Langmuir de la siguiente forma:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{q_m K_L}$$

Se obtiene del valor de pendiente de la línea ($1/q_m$) cuando la capacidad máxima de adsorción para el BAC es $y = 320x + 4 \times 10^{-13}$ y considerando la siguiente información:

$$y = \frac{C_e}{q_e}$$

$$x = C_e$$

$$\frac{1}{q_m} = 320$$

$$q_m = \frac{1}{320} = 0.003125$$

$$\frac{1}{q_m K_L} = 4 \times 10^{-13}$$

$$K_L = \frac{1}{(4 \times 10^{-13})(0.003125)} = 8.0 \times 10^{14}$$

El mismo procedimiento se realizó para el CAC utilizando la siguiente ecuación para representar el ajuste de los datos experimentales: $y = 240x + 1 \times 10^{-12}$; el resumen de resultados se muestra en la Tabla 4. El ajuste de los datos experimentales de la adsorción de grasas y aceites en BAC y CAC se ajustan al modelo de Langmuir con $R^2 = 1.0$.

Tabla 4. Adsorption isotherm parameters for BAC and CAC.

Isoterma	Parámetro	BAC	CAC
Langmuir	$qm(\text{mg/g})$	0.003125	0.004166
	$K_L(\text{l/mg})$	8×10^{14}	2×10^{14}
	R^2	1.0	1.0
Freundlich	n	3.92	4.69
	$K_f(\text{l/g})$	1.21	1.10
	R^2	0.76	0.85

El modelo Langmuir considera que la adsorción se efectúa de forma homogénea en la superficie formando una monocapa donde se produce la interacción con el material adsorbente.

La isoterma de Freundlich considera que la adsorción se lleva a cabo en multicapas, en la que la energía se distribuye en los sitios activos, y que se produce una interacción entre las moléculas adsorbidas (Hyung-Keun *et al.*, 2015).

La Tabla 4 muestra la correlación de los datos experimentales con el modelo lineal de Freundlich (Tabla 1, Ecuación (6)). La ecuación lineal es:

$$qe = \frac{1}{n} \log C e + \log Kf$$

El ajuste de la línea recta de los datos experimentales de BAC da la siguiente ecuación: $y = 0.2545x + 0.0838$. En el caso del CAC, se representan por la ecuación del modelo Freundlich: $y = 0.2128x + 0.0434$.

Los resultados de la constante Freundlich (K_f) se muestran en la Tabla 4. Los valores de R^2 son bajos para el carbón activado a pesar de que la adsorción en CAC se ajusta con un $R^2 = 0.85$ y BAC en $R^2 = 0.76$.

Analizando estudios similares que utilizaron bagazo de caña de azúcar para eliminar grasas y aceites/hidrocarburos, se puede observar la importancia del tamaño de partícula, la granulometría del carbón y el tiempo de contacto, el tipo de sistema, la velocidad de agitación y otros factores que influyen en la capacidad de adsorción del carbón activado a partir de bagazo de caña de azúcar o utilizando bagazo de caña natural sin ningún tratamiento (Tabla 5).

Tabla 5. Características de diferentes adsorbentes.

Adsorbente	Adsorbato	Tipo de sistema	Co (mg/l)	Tiempo	% A*	Ref.
------------	-----------	-----------------	-----------	--------	------	------

Bagazo de caña	Agua sintética (petróleo emulsionado)	Tanque agitado	20-212 mg/l	5-10 min	90 %	Almeida <i>et al.</i> 2019
Bagazo de caña natural	Grasas y aceites	Lecho fijo	992.00 mg/l	12 h	98.5 %	Martínez-Nodal <i>et al.</i> , 2014
Bagazo de caña natural	Grasas y aceites	Columna rellena	25.21 mg/l	12-32 h	83.58 %	Leiva-Mass <i>et al.</i> , 2012
Bagazo hidrofobado con surfactante	Hidrocarburos	Columna rellena, operación discontinua	300 mg/l	12 h	90 %	Rincones <i>et al.</i> , 2015
Carbón de bagazo de caña	Aguas residuales (grasas y aceites)	Por lotes con agitación constante	5 260–5 270 mg/l	8 h	94 %	Este trabajo

*% Adsorción.

En la Tabla 5 se puede observar el trabajo realizado por Martínez-Nodal *et al.* (2014), que utilizó como adsorbente bagazo de caña natural y como adsorbato agua residual que contenía grasas y aceites en una concentración 992.00 mg/l; la experimentación se realiza en un sistema de flujo continuo (1 l/h) a través de un lecho fijo (59 997 g de bagazo de caña); obtuvo una adsorción del 98.5 % en 12 horas. Almeida *et al.* (2019) utilizaron aguas sintéticas con petróleo emulsionado; encontraron que el equilibrio de fase se logra a los cinco minutos de contacto; obtuvieron tasas de eliminación superiores al 90 % utilizando

concentraciones de aceite de hasta 212.0 mg/l; la capacidad máxima de adsorción fue de 207.3 mg/g, a pH 4 y 110 rpm a 30 ° C. En los trabajos de Rincones *et al.* (2015), utilizando el bagazo de caña de azúcar hidrofobado con surfactante para la remoción de hidrocarburos de petróleo en aguas aceitosas, se obtuvieron eficiencias de remoción de hidrocarburos superiores al 90 % hasta el punto de saturación del lecho en la columna de adsorción, que demuestran la aplicabilidad. La capacidad de adsorción del lecho y el tiempo de operación aumentaron a bajos caudales de alimentación del afluente y a mayor altura del lecho en el rango estudiado. Por lo que se puede observar de este estudio experimental, es que es factible el tratamiento de grasas y aceites con carbón activado de bagazo de caña o bagazo de caña natural.

De acuerdo con las normas oficiales mexicanas (NOM-001-ECOL-1996, NOM-002-ECOL-1996, NOM-003-ECOL-1997), el rango aceptable de límites para descargas de aguas residuales es de 15 a 100 mg/l, por lo que esta investigación se puede continuar en un futuro, acoplando el Sistema Batch a otro sistema continuo de lecho fijo con bagazo de caña natural para disminuir las concentraciones de las grasas y aceites en aguas residuales.

En el caso de la producción de caña de azúcar en Tabasco, es un problema grave. La caña de azúcar se quema antes de la cosecha con el propósito de disminuir la cantidad de hoja (sin uso) y facilitar así la zafra y el transporte del producto al ingenio azucarero. La quema de residuos de bagazo de caña genera emisiones atmosféricas muy contaminantes, como dioxinas, que pueden afectar la salud de los pobladores. Este

estudio pretende darle un valor agregado a un material considerado residuo.

Conclusiones

El bagazo de caña de azúcar como materia prima en la producción de carbón activado da como resultado un material que permite eliminar el 94 % de grasas y aceites contenidos en las aguas residuales domésticas, que se pueden comparar con el de un carbón comercial (96%). La capacidad de absorción está directamente relacionada con el tamaño de los poros; una combinación de micro y mesoporos permite la interacción con las grasas y aceites. El área específica indica el alto número de poros disponibles para interactuar con los contaminantes de las aguas residuales.

El punto isoeléctrico el BAC tiende a aglomerarse a pH cerca de 2.5, lo cual significa que un valor cercano a la neutralidad tiende a ser dispersado; la cinética de adsorción sigue un modelo de pseudo segundo orden; ello supone que el proceso de adsorción ocurre en las fases descritas en la Figura 6, y es controlado por la adsorción en la superficie, la difusión en las partículas del carbón activado y la quimisorción. Desde este punto de vista, su uso como adsorbente puede aportar un valor

añadido a un residuo industrial, como el bagazo de caña de azúcar, que presenta dificultades para su confinamiento final.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por el apoyo financiero para el desarrollo de esta investigación (PFI 10-DAIA-IB- 2016); a Fabiana del Carmen Hernández Sánchez por su apoyo en el análisis de laboratorio; a Anabel González Díaz por su apoyo en el análisis SEM, y a Richart Falconi Calderón para el análisis de rayos X.

Referencias

- Acosta, G. E. (2013). Partículas hidrofobadas de bagazo de caña de azúcar para el tratamiento de hidrocarburos en agua. *Saber*, 25(1), 97-103. Recuperado de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-01622013000100011&lng=es&tlng=es
- Adinaveen, T., Kennedy, L., Vijaya, J., & Sekaran, G. (2013). Studies on structural, morphological, electrical and electrochemical properties of activated carbon prepared from sugarcane bagasse. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19, 1470-1476. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2013.01.010>
- Almeida, F., Meili, L., Soletti, J., Esquerre, K., Ribeiro, L., & De-Farias-Silva, C. (2019). Oil produced water treatment using sugarcane solid residue as biosorbent. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 18(1), 27-38. Recuperado de

<https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim/2019v18n1/AImeida>

Amaringo, V. F. A., & Hormaza, A. A. (2013). Determination of the point of zero charge and isoelectric point of two agricultural wastes and their application in the removal of colorants. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 4(2), 27-36. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.22490/21456453.982>

Andrade, S., Veloso, C., Fontan, R., Bonomo, R., Santos, L., Brito, M., & Diniz, G. (2018). Chemical-activated carbon from coconut (*Cocos nucifera*) endocarp waste and its application in the adsorption of β -lactoglobulin protein. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 17, 2, 463-475. Recuperado de DOI: <https://doi.org/10.24275/10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim/2018v17n2/Andrade>

Appel, C., Ma, L., Dean, R., & Kennelly, E. (2003). Point of zero charge determination in soils and minerals via traditional methods and detection of electroacoustic mobility. *Geoderma*, 113(1-2), 77-93. Recuperado de [http://dx.doi:10.1016/S0016-7061\(02\)00316-6](http://dx.doi:10.1016/S0016-7061(02)00316-6)

Contreras, J., Fuenmayor, H., Colina, M., Díaz, A., Fernández, N., Pérez, M. J., & Colin, G. (2008). Capacity adsorptive activated carbon prepared from sugar cane bagasse for adsorption of phenol, 2-chlorophenol, 2-nitrafenol, 2, 4-dimethylphenol. *Science*, 16(1), 111-121. Recuperado de <http://www.produccioncientifica.luz.edu.ve/index.php/ciencia/article/view/9835/9822>

- Corral-Escárcega, M., Ruiz-Gutiérrez, M., Quintero-Ramos, A., Meléndez-Pizarro, C., Lardizabal-Gutiérrez, D., & Campos-Venegas, K. (2017). Use of biomass-derived from pecan nut husks (*Carya illinoensis*) for chromium removal from aqueous solutions. Column modeling and adsorption kinetics studies. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(3), 939-953. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62053304021>
- Cruz, G., Ainassaari, K., Gómez, M., Solís, J., & Keiski, R. (2018). Microporous activation carbon made of sawdust from two forestry species for adsorption of methylene blue and heavy metals in aqueous system – case of real polluted water. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 17(3), 847-861. Recuperado de <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim/2018v17n3>.
- Freundlich, H.M.F. (1906). Über die adsorption in losungen. *Zeitschrift fur Physikalische Chemie* 57, 385–471. URL: https://openlibrary.org/books/OL15094118M/Über_die_Adsorption_in_Lösungen.
- Garg, V. K., Amita, M., Kumar, R., & Gupta, R. (2004). Basic dye (Methylene Blue) removal from simulated wastewater by adsorption using Indian rosewood sawdust. *Dyes Pigments*, 63, 243-250. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2004.03.005>
- Garoma, T. S., & Badriyha, B. (2010). Removal of cadmium, copper and zinc from solution by active carbon impregnated with 8-hydroxyquinoline. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 4(5), 14-21.

- Ghani, Z. A., Yusoff, M. S., Zaman, N. Q., Zamri, M. F., & Andas, J. (2017). Optimization of preparation conditions for activated carbon from banana pseudo-stem using response surface methodology on removal of color and COD from landfill leachate. *Waste Management*, 62, 177-187, DOI: 10.1016/j.wasman.2017.02.026
- Goswami, M., & Phukan, P. (2017). Enhanced adsorption of cationic dyes using sulfonic acid modified activated Carbon. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5, 3508-3517. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.07.016>
- Hajira, T., Muhammad, S., Nasir, A., Uzma, H., & Tahreem, A. (2016). Application of natural and modified sugar cane bagasse for the removal of dye from aqueous solution. *Journal of Saudi Chemical Society*, 20, S115-S121. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.jscs.2012.09.007>
- Ho, Y. S., & McKay, G. (1998). Kinetic models for adsorption of dye from aqueous solution by wood. *Process Safety and Environmental Protection*, 76, part B. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.02.021>
- Hyung-Keun, C., Woon-Hoe, K., Jeongwon, P., Jinwoo, C., Tae-Young, J. and Pyung-Kyu Park. (2015). Application of Langmuir and Freundlich isotherms to predict adsorbate removal efficiency or required amount of adsorbent. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 28, 241-246. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.201502.021>.
- Islam, M. A., Ahmed, M. J., Khanday, W. A., Asif, M., & Hameed, B. H. (2017). Mesoporous activated coconut shell-derived hydrochar

prepared via hydrothermal carbonization-NaOH activation for methylene blue adsorption. *Journal of Environmental Management*, 203, 237-244. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.07.029

Izzeldin, A. A. H., Bice, S. M., Ngilaa, J. C., & Nyamoria, V. O. (2013). Adsorption studies of aqueous Pb(II) onto a sugarcane bagasse/multi-walled carbon nanotube composite. *Physics and Chemistry of the Earth*, 66, 157-166. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2013.08.006>

Kuncoro, E. P., Dwi, R. M. I., Handoko, D., Oktiani, R. F., & Septya, K. H. (2018a). Characterization, kinetic, and isotherm data for adsorption of Pb²⁺ from aqueous solution by adsorbent from mixture of bagasse-bentonite. *Data in Brief*, 16, 622-629. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.11.098>

Kuncoro, E. P., Mitha-Isnadina, D. R., Darmokoesoemo, H., Dzembarahmatiny, F., & Kusuma, H. S. (2018b). Characterization and isotherm data for adsorption of Cd²⁺ from aqueous solution by adsorbent from mixture of bagasse-bentonite. *Data Brief*, 16, 354-360. DOI: 10.1016/j.dib.2017.11.060

Lagergren, S. (1898). About the theory of so-called adsorption of soluble substances. *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens*, 24, 1-39.

Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surface of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society* 40, 1361-1403. DOI: 10.1021/ja02242a004.

Leiva-Mas, J., Martínez-Nodal, P. C., Esperanza-Pérez, G., Rodríguez-Rico, I. L., & Gordiz-García, C. E. (2012). Absorción de hidrocarburos

en columnas rellenas con bagazo: una solución sostenible. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 46(3), 36-44. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=2231/223124988005>.

Leofanti, G., Padovan, M., Tozzola, G., & Venturelli, B. (1998). Surface area and pore texture of catalysts. *Catalisys Today*, 41, 207-219. DOI: 10.1016/S0920-5861(98)00050-9

Leyva-Ramos, R., Díaz-Flores, P. E., Guerrero-Coronado, R. M., Mendoza-Barrón, J., & Aragón-Piña, A. (2004). Adsorption of Cd (II) in aqueous solution on different types of activated carbon fibers. *Journal of the Chemical Society of Mexico*, 48, 196-202. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rsqm/v48n3/v48n3a3.pdf>

Leyva-Ramos, R., Rivera-Utrilla, J., Medellín-Castillo, M. A., & Sánchez-Polob, M. (2010). Kinetic modeling of fluoride adsorption from aqueous solution onto bone char. *Chemical Engineering Journal*, 158(3), 458-467. DOI: 10.1016/j.cej.2010.01.019

Martínez-Nodal, P., Rodríguez, R. I., Esperanza-Pérez, G., & Leiva-Mas, J. (2014). Caracterización y evaluación del bagazo de caña de azúcar como biosorbente de hidrocarburos, *Revista Afinidad*, 71, 565.

Mateo-Sánchez, J. (2011). *Preparation of activated charcoal from sugar cane bagasse* (Bachelor's Thesis in Chemical Engineering). Academic Division of Engineering and Architecture, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Tabasco, México.

Menéndez, J., Illán-Gómez, C., & Radovic, R. (1995). On the difference between the isoelectric point and the point of zero charge of carbons. *Carbon*, 33(11), 1655-1659. Recuperado de <https://ac.els-cdn.com>

- Meza, J. C., Lomascolo, A., & Laurence, C. (2006). Assessment of the bagasse of sugar cane. *Biotechnologies at the Service of the Paper Industry Mexico*, Recuperado de <https://es.scribd.com/document/47887927/valorizacion-del-bagazo-de-cana-de-azucar-industria-papelera>
- Norma Oficial Mexicana, NOM-001-ECOL-1996. Diario Oficial de la Nación, México. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-15-13.pdf>
- Norma Oficial Mexicana, NOM-002-ECOL-1996. Diario Oficial de la Nación, México. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-15-13.pdf>
- Norma Oficial Mexicana, NOM-003-ECOL-1997. Diario Oficial de la Nación, México. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-15-13.pdf>
- Ramavandi, B., Asgari, G., Faradmal, J., Sahebi, S., & Roshani, B. (2014). Abatement of Cr (VI) from wastewater using a new adsorbent, cantaloupe peel: Taguchi L16 orthogonal array optimization. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 31(12), 2207-2214. DOI: 10.1007/s11814-014-0172-6
- Ramírez-Rodríguez, A., Reyes-Ledezma, J., Chávez-Camarillo, G., Cristiani-Urbina, E., & Morales-Barrera, L. (2018). Cyclic biosorption and desorption of acid red 27 onto *Eichhornia crassipes* leaves. *Revista*

Mexicana de Ingeniería Química, 17(3), 1121-1134. Recuperado de [https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim/2018v17n3/](https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim/2018v17n3/Ramirez) Ramirez

Rincones-Poyer, F., Valladares, S. M., Danglad-Flores, J. A., & Salazar-Palencia, V. (2015). Adsorción de hidrocarburos de petróleo en agua mediante una columna empacada con bagazo de caña de azúcar. *Saber*, 27(3), 441-453. Recuperado de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-01622015000300010&lng=es&tlng=es

Saad, S. A., Isa, K. Md., & Bahari, R. (2010). Chemically modified sugarcane bagasse as a potentially low-cost bisorbent for dye removal. *Journal of Desalination*, 264(1-2), 123-128. DOI: 10.1016/j.desal.2010.07.015

Velázquez-Trujillo, A., Bolaños-Reynoso, E., & Pliego-Bravo, Y. S. (2010). Optimización de la producción de carbón activado a partir de bambú. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 9(3), 359-366. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382010000300010&lng=es&tlng=es

Weber, W. J., & Morris, J. C. (1963). Kinetics of adsorption on carbon from solutions. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 98, 31-60. Recuperado de <https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockkey=0013042>

Xiaohong, W., Chenglong, J., Bingxia, H., Yingying W., Chen, H., & Jingbo, W. (2018). Carbon composite lignin-based adsorbents for the

adsorption of dyes. *Journal of Chemosphere*, 206, 587-596.
Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.183>.

Xue, T., Gao, Y., Zhang, Z., Umar, A., Yan, X., Zhan, X., Guo, Z., & Wang, Q. (2014). Adsorption of acid red from dye wastewater by $\text{Zn}_2\text{Al-NO}_3$ LDHs and the resource of adsorbent sludge as nanofiller for polypropylene. *Journal of Alloys and Compounds*, 587, 99-104.
Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.10.158>

Yun, X., Liu, D., & Zhang, L. (2010). Enhanced adsorption of methylene blue by EDTAD modified sugarcane bagasse and photocatalytic regeneration of the adsorbent. *Desalination*, 259, 187-191. DOI: 10.1016/j.desal.2010.04.008