

Carbón activado a partir de residuos de cáñamo modificado químicamente para remover azul de metileno

Tanya Carchi-Tandazo¹

tacarchi@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-6310-4446>

Universidad Técnica de Machala
Grupo de investigación BIOeng,
Ecuador, Machala

María Elena Yáñez-Romero

myanez@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-0276-4421>,

Universidad Técnica de Machala,
Grupo de investigación BIOeng,
Ecuador, Machala

Carolina Beltrán-Balarezo

cbeltran@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-0806-9240>

Universidad Técnica de Machala
Grupo de investigación BIOeng,
Ecuador, Machala

Ehilerth Elizalde-Reyes

eelizalde2@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0005-7111-2979>

Universidad Técnica de Machala
Grupo de investigación BIOeng, Ecuador
Ecuador, Machala

Alberto Vega-Loaiza

avega5@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0009-3828-4073>

Universidad Técnica de Machala
Grupo de investigación BIOeng
Ecuador, Machala

RESUMEN

El azul de metileno es un colorante que provoca efectos nocivos sobre la salud humana, por lo que el tratamiento en los efluentes contaminados por este colorante debe ser atendido. En la presente investigación se evaluó la capacidad de adsorción del carbón activado (CC) y carbón activado modificado con H_3PO_4 (CAC) a partir de los residuos del cáñamo para la remoción de azul de metileno en soluciones acuosas. Para la preparación de los carbones activados se empleó un horno tubular tipo mufla horizontal, cuyas condiciones de operación fueron 450 °C, 1 hora, flujo de N_2 de 50 mL.min⁻¹ y velocidad de calentamiento de 5 a 10 °C/min, las lecturas de azul de metileno se lo realizó a $\lambda = 664$ nm. Los resultados arrojaron que el pH óptimo para la adsorción fue de 7 y 3 para los materiales CAC y CC, respectivamente; así mismo, se obtuvo una Q_{max} de 486,828 mg.g⁻¹ y 142,384 mg.g⁻¹ para CAC y CC, respectivamente. Se concluyó que el mejor material fue el CAC, en la que al usar el carbón activado modificado con el H_3PO_4 , probablemente se dio debido al incremento del volumen de los poros y gran área superficial.

Palabras claves: azul de metileno; adsorción; carbón activado; ácido fosfórico.

¹ Autor principal.

Correspondencia: tacarchi@utmachala.edu.ec

Activated carbon obtained from hemp waste chemically modified for methylene blue removal

ABSTRACT

Methylene blue is a dye that has harmful effects on human health, so the treatment of effluents contaminated by this dye must be addressed. This research evaluated the adsorption capacity of activated carbon (CC) and H₃PO₄-modified activated carbon (CAC) from hemp waste for the removal of methylene blue in aqueous solutions. The preparation of activated carbons was carried out using a horizontal muffle furnace at operating conditions of 450 °C, 1 hour, N₂ flow rate of 50 mL.min⁻¹, and heating rate of 5 to 10 °C/min. Methylene blue readings were taken at $\lambda = 664$ nm. The results showed that the optimal pH for adsorption was 7 and 3 for the MAC and AC materials, respectively. Additionally, Q_{max} values of 486.828 mg.g⁻¹ and 142.384 mg.g⁻¹ were obtained for MAC and AC, respectively. It was concluded that the best material was MAC, which was likely due to the increased pore volume and surface area achieved by modifying the activated carbon with H₃PO₄.

Keywords: *methylene blue; adsorption; activated carbon; phosphoric acid.*

Artículo recibido 20 junio 2023

Aceptado para publicación: 20 julio 2023

1. INTRODUCCIÓN

Por actividades de las industrias textil, cuero, papel, plásticos, entre otras, que emplean una serie de colorantes para teñir sus productos (Rafatullah et al., 2010); han generado una serie de desechos contaminantes, por ejemplo, la presencia de colorantes en los efluentes, ya que estos productos generan efectos tóxicos y cancerígenos para las diferentes formas de vida, ocasionando una preocupación a nivel de la comunidad científica (Alver et al., 2020; Faur-brasquet & Cloirec, 2003). Además, la mayoría de los colorantes son poco biodegradables o resistentes a las condiciones ambientales, generando serios impactos sobre la naturaleza (Belkhiri et al., 2018).

El azul de metileno es un colorante catiónico tóxico muy utilizado en las industrias textiles, pesticidas y papeleras. Por ende, el tratamiento a los efluentes que presenten este colorante debe ser tratado cuidadosamente, debido a las graves afecciones que puede provocar, siendo estas principalmente las mutagénicas, cancerígenas, teratogénicas y no biodegradables (Hassan et al., 2023; Mittal & Sinha, 2016).

Se presentan diferentes alternativas para el tratamiento de efluentes contaminados con colorantes, por ejemplo: la separación por membranas, ozonización, coagulación – floculación, oxidación electroquímica, intercambio iónico y la adsorción (Alver et al., 2020; Belkhiri et al., 2018; Lapo et al., 2019; Shaltout et al., 2022). Estos procesos son ampliamente usados, sin embargo, tienen algunas deficiencias, por ejemplo: son costosos, se requiere de reactivos contaminantes, procesos complejos y se requiere de mucho tiempo para su operación (Buthlezi et al., 2012). A excepción de la adsorción, que se presenta como una de los métodos más empleado para el tratamiento de aguas residuales, debido a sus sostenibilidad ambiental y económica (Ngulube et al., 2017).

El proceso de adsorción se basa en la atracción a la superficie sólida (adsorbente) del analito (adsorbato) que se encuentra en fase acuosa por lo enlaces físicos o químicos (Al-ghouti & Da, 2020). El adsorbente debe ser poroso, ya que esto va a permitir que las moléculas del adsorbato puedan incrustarse en los poros, por lo que el proceso de adsorción va a depender del adsorbente, este deber tener una buena capacidad y cinética de adsorción (Al-ghouti & Da, 2020). Los adsorbentes más empleados para la eliminación de contaminantes y colorantes son la sílice, alúmina, arcilla, óxidos metálicos, bioadsorbentes, carbón activado, etc. (Foroutan et al., 2019; Rashid et al., 2021; Siong et al., 2021).

Los carbones activados son materiales no tóxicos y de bajo costo con alta eficiencia debido a su estructura porosa y gran superficie (Rashid et al., 2021; Ugwu & Agunwamba, 2020). Poseen propiedades físicas y químicas, que van a depender de diversos factores como son: el proceso de activación o modificación, parámetros del proceso de adsorción y la materia prima empleada (Medhat et al., 2021). Para incrementar el tamaño de los poros de los carbones activados, existen varios compuestos activadores químicos, que pueden ser el uso de ácidos (por ejemplo, H_2SO_4 , H_3PO_4 , HCl), bases ($NaOH$, KOH) y sales ($ZnCl$, $CaCl_2$, $FeCl_3$) (Balajii & Niju, 2019; Bedin et al., 2016; Qu et al., 2021; R.A. Canales-Flores, 2020), esto hará que el material sea resistente a la abrasión, posea alta resistencia térmica y diámetros de poro pequeños, lo que dará como resultado un incremento en la superficie del adsorbente y, por ende, se aumenta significativamente la capacidad de adsorción (Balajii & Niju, 2019; Heidarinejad et al., 2020).

Por lo anterior expuesto, el objetivo de esta investigación es aplicar carbón activado modificado con ácido fosfórico (H_3PO_4) para eliminar azul de metileno en soluciones acuosas, para ello se aplicó el proceso de adsorción en la que se realizaron estudios de pH, isothermas de adsorción y estudios cinéticos.

2. METODOLOGÍA

2.1. Materiales y reactivos

Todos los reactivos empleados en la investigación fueron de grado analítico: ácido fosfórico (H_3PO_4 , 85%, Fisher Chemical), hidróxido de sodio ($NaOH$, 98%, Isolab Chemicals,), ácido nítrico (HNO_3 , 69 – 70% Fisher Chemical), azul de metileno ($C_{16}H_{18}ClN_3S$). Se empleó agua tipo I para la preparación de todos los reactivos.

2.2. Equipos

Para la preparación de las espumas de carbón a base de los residuos de cáñamo, se utilizó un horno tubular tipo mufla horizontal y, para la medición de azul de metileno se empleó un espectrofotómetro UV mini – 1240 (SHIMADZU).

2.3. Análisis proximal al residuo de cáñamo

2.3.1. % de Humedad (%H)

Para determinar el porcentaje de humedad en el residuo de cáñamo se utilizó la norma ASTM D2867 – 14, la cual consistió en colocar 10 gramos de la muestra en una cápsula de porcelana a peso constante por un tiempo de 1 hora a 110 °C. Transcurrido ese tiempo, la muestra fue retirada para ser pesada, este proceso se llevó a cabo por triplicado. Se aplicó la ecuación 1 para determinar el % de humedad, en la que mA representa la masa inicial del residuo de cáñamo y mB es la masa del residuo de cáñamo después del secado:

$$\% H = \frac{mA - mB}{mA} * 100 \quad \text{Ec. 1}$$

2.3.2. % de compuestos volátiles (% CV)

Se empleó la norma ASTM 5832-08 para determinar el % de compuestos volátiles en los residuos de cáñamo. Las muestras obtenidas del apartado 2.3.1 fueron introducidas en una mufla a 500 °C por 15 minutos, pasado ese tiempo, las muestras fueron retiradas y colocadas en un desecador para finalmente pesarlas. La ecuación 2 fue usada para determinar el % de compuestos volátiles, en la que mB es la masa inicial y mC es la masa que sale de la mufla.

$$\% CV = \frac{mB - mC}{mB} * 100 \quad \text{Ec. 2}$$

2.3.3. Contenido de cenizas (% CC)

En lo que respecta al contenido de cenizas, se empleó la norma ASTM D2866-11, la cual consistió en tomar las muestras del apartado 2.3.2, las mismas que fueron sometidas a un proceso de calcinación a 500 °C por 3 horas. Transcurrido ese tiempo, se llevó las muestras a un desecador para enfriarlas, la ecuación 3 fue empleada para calcular el contenido de cenizas, donde mC es la masa antes de la calcinación y mD es la masa después de la calcinación.

$$\% CC = \frac{mC}{mD} * 100 \quad \text{Ec. 3}$$

2.4. Obtención de carbón activado a partir del residuo de cañamo

Se recolectaron muestras de residuos de cañamo, los cuales fueron deshojados, cortados en pedazos de ~ 1cm, lavados con abundante agua destilada y secadas a 110 °C por 12 horas. Seguidamente, las muestras fueron sometidas a una activación química con H₃PO₄ al 85%, estas estuvieron en agitación por 1 hora, luego se las filtró y se las secó a 105 °C por un tiempo de 12 horas. Posteriormente, para la obtención del carbón activado, estas muestras fueron introducidas en un horno tubular tipo mufla horizontal a 450 °C por 1 hora, se controló el flujo del gas de nitrógeno (N₂) a 50 mL/min y una rampa de calentamiento de 5 a 10 °C/min. Bajo estas condiciones se obtuvieron 2 materiales adsorbentes, el primero es carbón activado modificado con H₃PO₄ al 85% (CAC) y, el segundo material es carbón activado sin modificación química (CC).

2.5. Aplicación del carbón activado para la remoción de azul de metileno

Se pretende aplicar los 2 materiales adsorbentes obtenidos en el apartado 2.4 para la remoción de azul de metileno en soluciones acuosas.

2.5.1. Preparación de azul de metileno

Se preparó una solución patrón de 1000 mg.L⁻¹ a partir de la sal de cloruro de metiltionina (azul de metileno), en la cual se pesaron 0.5 gramos en 500 mL de agua destilada.

2.5.2. Curva de calibración de azul de metileno

Se prepararon soluciones de azul de metileno de 1, 2, 4, 6, 8, y 10 mg.L⁻¹ a partir la solución patrón de 1000 mg.L⁻¹ a una longitud de onda de 664 nm, las muestras fueron leídas en un espectrofotómetro UV mini – 1240.

2.5.3. Estudio de pH

Para determinar el pH óptimo de adsorción de azul de metileno empleando el carbón activado de residuos de cañamo se realizó un estudio de pH, para ello se empleó 1 g/L de adsorbente, es decir, se pesó 0.025 gr de adsorbente y se agregó en 25 mL de solución de 100 mg.L⁻¹ de azul de metileno, los valores de pH fueron 3, 5, 7 y 9, en agitación por un tiempo de 24 horas, todos los ensayos se realizaron por duplicado.

2.5.4. Isotermas de adsorción

La isoterma de adsorción permite determinar la capacidad máxima de adsorción del adsorbente, para ello se pesó 0.025 g del material adsorbente en 25 mL de solución de azul de metileno a diferentes concentraciones de 300, 400, 500, 750 y 1000 mg.L⁻¹, el pH utilizado fue el pH óptimo que se obtuvo del apartado 2.5.3, las muestras se sometieron a agitación por 3 horas, se trabajó por duplicado. Los resultados fueron ajustados a los modelos de las isotermas de Langmuir y Freundlich, las cuales se reflejan en la ecuación 4 y 5, respectivamente.

$$q_e = \frac{Q_{max} \cdot b \cdot C_e}{1 + (b \cdot C_e)} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

q_e es la cantidad de azul de metileno adsorbido (mg.g⁻¹), Q_{max} es la capacidad máxima de adsorción (mg.g⁻¹), b es la constante de Langmuir (L.mg⁻¹) y C_e es la concentración en equilibrio (mg.L⁻¹).

$$q_e = k_f \cdot C_e^{1/n} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

q_e es la cantidad de azul de metileno adsorbido (mg.g⁻¹), k_f es la constante de Freundlich (mg.g⁻¹), C_e es la concentración en equilibrio (mg.L⁻¹), n es la intensidad de adsorción.

2.5.5. Cinética de adsorción

Para determinar la cinética de adsorción los resultados fueron ajustados a los modelos cinéticos de pseudo primer (PSO) y pseudo segundo orden (PSS). Se pesó 0.5 g del adsorbente y se agregó en 500 mL de solución de 100 mg.L⁻¹ de azul de metileno, la muestra fue sometida a agitación por 4 horas, posteriormente, se tomaron alícuotas cada 10 minutos en las primeras 2 horas y luego cada 20 minutos, el pH fue el que se encontró del apartado 2.5.3, se trabajó por duplicado. En las ecuaciones 6 y 7 se representan las fórmulas de los modelos cinéticos PSO y PSS.

$$qt = q(1 - e^{-k_1 t}) \quad \text{Ec. 6}$$

Donde: qt es q con respecto al tiempo (mg.g⁻¹), q es la cantidad adsorbida de analito por cada gramos de adsorbente (mg.g⁻¹), k_1 es la constante de la velocidad de adsorción del modelo PSO (g.(mg.min)⁻¹) y t es el tiempo (min).

$$qt = \frac{q^2 \cdot k_2 \cdot t}{1 + (q \cdot k_2 \cdot t)} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

qt es q con respecto al tiempo ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$), q es la cantidad adsorbida de analito por cada gramos de adsorbente ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$), k_2 es la constante de la velocidad de adsorción del modelo PSS ($\text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{min})^{-1}$) y t es el tiempo (min).

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Análisis proximal del residuo de cáñamo

En la tabla 1 se muestran los resultados del % humedad (% H), % de compuestos volátiles (% CV) y contenido de cenizas (% CC).

Tabla 1. Análisis proximal

Muestras	Parámetros		
	% H	% CV	% CC
M1	7,57	76,3	1,21
M2	7,78	74,08	1,97
Promedio	7,675	75,19	1,59

De acuerdo a la tabla 1, se puede observar que el contenido de humedad es de 7,675 %, el contenido de volátiles de 75,19% y, el contenido de cenizas fue de 1,59%. Estos resultados se pueden contrastar con la investigación de análisis proximal de residuos de *Cannabis sativa L.* para la producción de biogás, en la que obtuvieron un % de humedad de 7,71, % CV = 81,37 y % CC de 2,50 (Asquer et al., 2019); estos parámetros son claves en la producción de carbones activados.

3.2. Carbones activados como materiales adsorbentes

Se obtuvieron dos materiales adsorbentes CAC y CC. En la figura 1 se puede visualizar los carbones activados obtenidos en el horno tubular tipo mufla horizontal a una temperatura de 400 °C.

Figura 1. Carbones activados como materiales adsorbentes

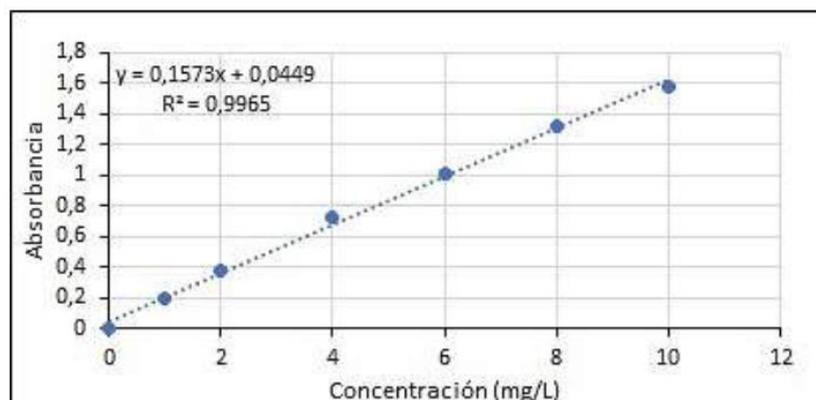


De acuerdo a la figura 1, se detalla que A) es el residuo de cáñamo; B) residuo de cáñamo activado con H₃PO₄ al 85%; C) carbón activado sin activación química; D) carbón activado activado con H₃PO₄ al 85%.

3.3. Curva de calibración de azul de metileno

Para la elaboración de la curva de calibración del azul de metileno se emplearon soluciones diluidas de 1, 2, 4, 6, 8 y 10 mg.L⁻¹ a una longitud de onda $\lambda = 664$ nm, la cual se observa en la figura 2.

Figura 2. Curva de calibración de azul de metileno. $\lambda = 664$

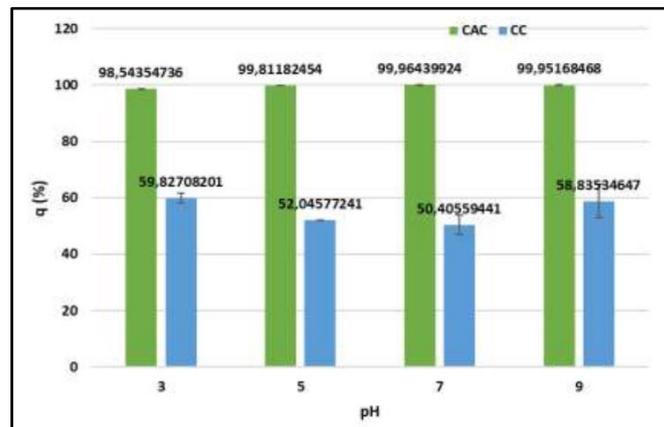


Se obtuvo una ecuación de carácter lineal $y = 0,1573x + 0,0449$, en la que la variable y representa la absorbancia en unidades de nm y la variable x es la concentración de azul de metileno, además, se obtuvo un coeficiente de correlación de $R^2 = 0,9965$.

3.4. Estudio de pH

Este estudio permitió determinar el pH óptimo de adsorción de azul de metileno empleando los dos materiales adsorbentes CAC y CC. De acuerdo a la figura 3, se puede observar que para el material CAC su pH óptimo está en 7, con un porcentaje de adsorción de 99,964%; mientras que, para el material CC el pH óptimo es de 3 y un % de adsorción de 59,827%. Estos valores fueron utilizados para el estudio de las isothermas de adsorción y cinética.

Figura 3. Estudio de pH de los materiales CAC y CC



Estos resultados se pueden comparar con una investigación en la que se eliminó azul de metileno empleando carbón activado a partir de *ficus carica bast*, en la que obtuvo un mejor pH de adsorción de pH = 8 (Pathania et al., 2017). Cuando el pH aumenta, la superficie del adsorbente adquiere carga negativa, lo que es beneficioso para una adsorción de azul de metileno, esto se debe al incremento en la atracción electrostática entre el colorante que tiene iones positivos, por la acción del ácido fosfórico, y el material adsorbente que está cargado de forma negativa.

Por otra parte, en la adsorción de azul de metileno sobre carbón activado mediante modificación surfactante (Kuang et al., 2020) su pH óptimo fue elevado de 12, en este estudio obtuvieron una mayor capacidad de adsorción de 220,49 mg.g⁻¹, por lo que se demuestra que a valores de pH superiores, es beneficioso para la recuperación del colorante azul de metileno.

3.5. Isotherma de adsorción

Las isothermas de adsorción se emplean para evaluar la relación que existe entre la capacidad de adsorción en equilibrio y la concentración en equilibrio de los analitos, en este caso es azul de metileno, bajo condiciones de pH y temperatura (Kuang et al., 2020), además, estos modelos facilitan información

con respecto a la naturaleza del proceso de adsorción (Bedin et al., 2016). En las figuras 4 y 5 se observan los resultados de las isothermas de adsorción del material CAC y CC, los cuales los datos experimentales se ajustaron a los modelos de las Isothermas de Langmuir y Freundlich.

De acuerdo a la figura 4, para el material CAC, en el modelo de la isoterma de Langmuir, se obtuvo una capacidad máxima de adsorción $Q_{max} = 486,828 \text{ mg.g}^{-1}$ y un coeficiente de correlación $R^2 = 0,95062$; mientras que, para el modelo de la isoterma de Freundlich el valor de $k_f = 49,866 \text{ mg.g}^{-1}$ y un $R^2 = 0,96152$. Con estos resultados, se puede indicar que el material CAC se ajustó mejor al modelo de la isoterma de Freundlich, esto indica que el proceso de adsorción es en multicapa y ocurren en superficies heterogéneas.

Mientras que en la figura 5, para el material CC se obtuvieron los resultados para la isoterma de Langmuir de $Q_{max} = 142,384 \text{ mg.g}^{-1}$ y $R^2 = 0,97439$ y; para la isoterma de Freundlich el valor de $k_f = 2,742 \text{ mg.g}^{-1}$ y un $R^2 = 0,94898$. Esto quiere decir que, los datos experimentales se ajustaron mejor al modelo de la isoterma de Langmuir, por lo que, existe una distribución uniforme de la actividad en la superficie de los adsorbente y el proceso de adsorción se da en una superficie homogénea (Bedin et al., 2016).

Figura 4. Isothermas de Langmuir y Freundlich de material CAC

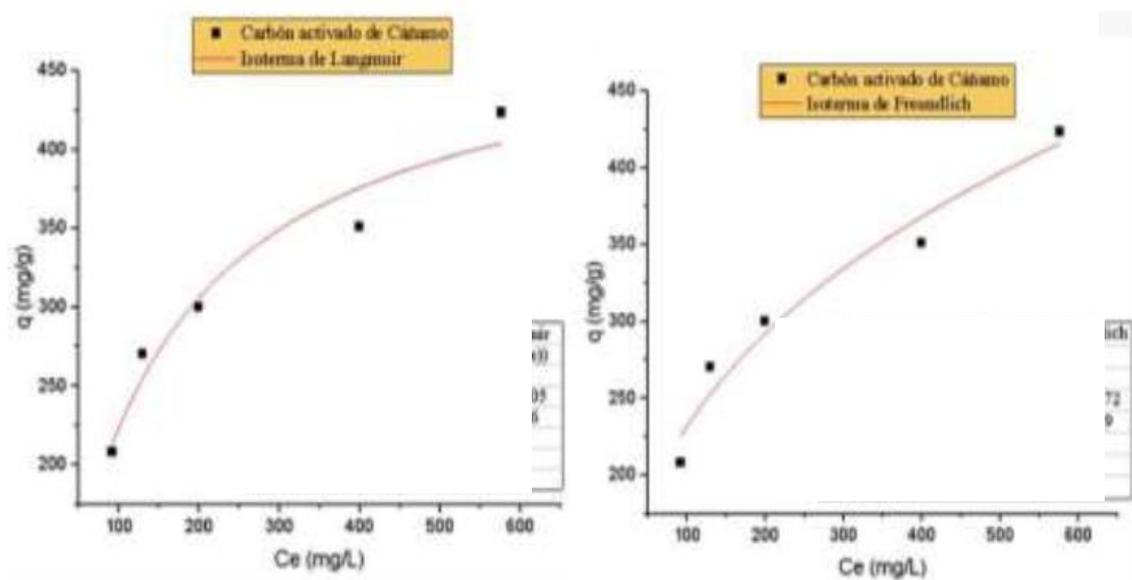
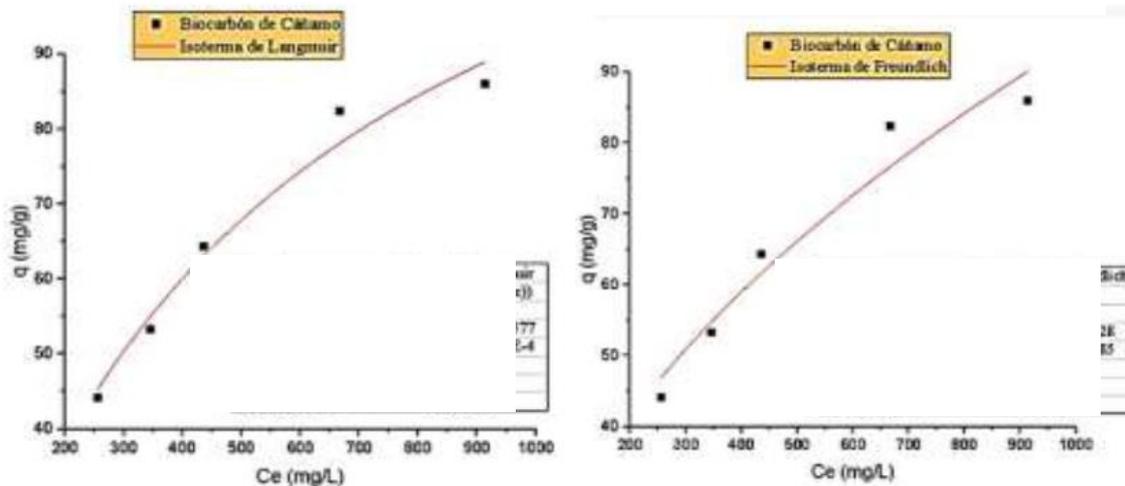


Figura 5. Isotermas de Langmuir y Freundlich de material CC



El resultado de la Q_{max} de la presente investigación se puede comparar con un estudio en el que aplicaron carbón activado funcionalizado con surfactante a partir de biomasa, obtuvo una capacidad máxima de adsorción superior a 400 mg.g^{-1} (Xue et al., 2022). Y, en el estudio de la adsorción de azul de metileno con carbón activado modificado con H_3PO_4 a partir de la hoja de coco obtuvieron una $Q_{max} = 370,37 \text{ mg.g}^{-1}$ (Jawad et al., 2017).

La alta capacidad de adsorción del azul de metileno sobre el carbón activado se debe a que la superficie de adsorción es elevada y su estructura es mesoporosa (Djilani et al., 2015), cuanto mayor sea el área superficial, mayor será la capacidad de adsorción y esto se consigue con los carbones activados (Rao et al., 2009). Además, una modificación química con ácido fosfórico, en este estudio se empleó el H_3PO_4 , hace que estos materiales sean más recomendados para la adsorción de colorantes, debido a su gran tamaño de macromoléculas y gran tamaño de volumen de poro (Mbarki et al., 2022).

3.6. Cinética de adsorción

En las figuras 6 y 7 se observan los resultados de los modelos cinéticos pseudo primer orden (PSO) y pseudo segundo orden (PSS) para los materiales adsorbentes CAC y CC. De acuerdo a la figura 6, se observa que el material CAC se ajustó al modelo cinético pseudo primer orden, en la cual se obtuvo una $q_e = 99,402 \text{ mg.g}^{-1}$ y $R^2 = 0,99851$; y, el mismo modelo cinético se ajustó a los datos experimentales del material CC, donde se obtuvo una $q_e = 41,261 \text{ mg.g}^{-1}$ y $R^2 = 0,99294$ (figura 7). Esto quiere decir que la adsorción del azul de metileno ocurrió predominantemente por la fisisorción, puesto que el modelo

de pseudo primer orden se indica que la suposición en la superficie del adsorbente es homogénea (Agboola & Benson, 2021; Heidarinejad et al., 2018; Schlumberger & Thommes, 2021).

Figura 6. Modelos cinéticos de PSO y PSS para el material CAC

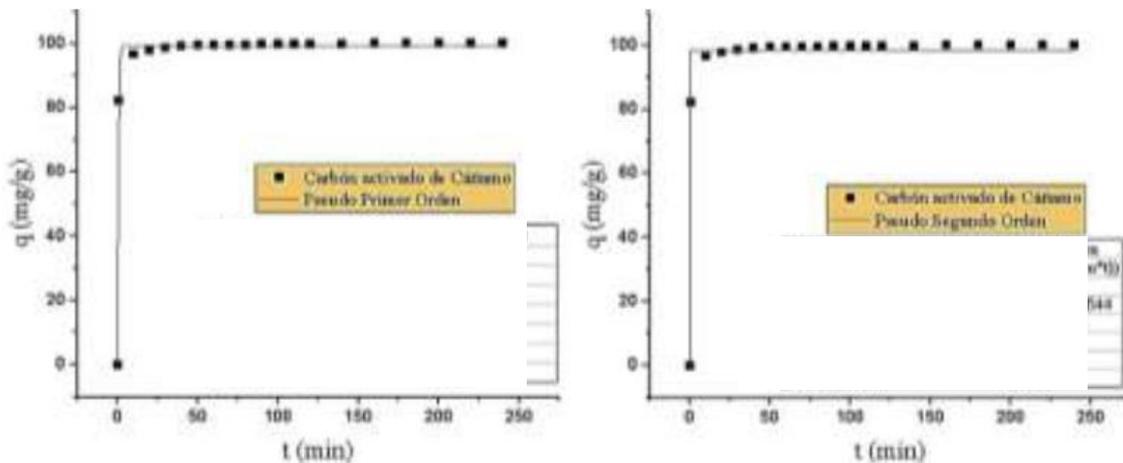
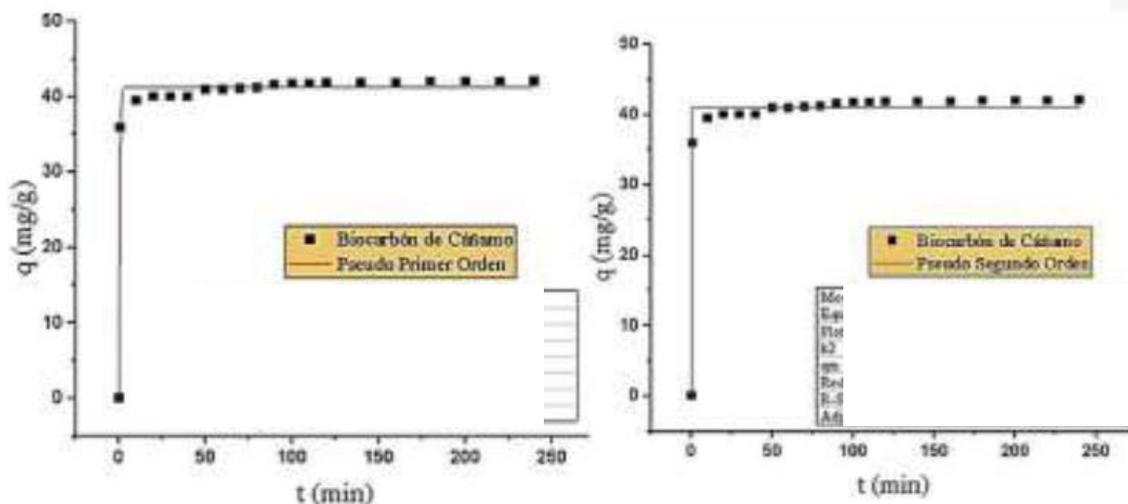


Figura 7. Modelos cinéticos de PSO y PSS para el material CC



La cinética de adsorción sobre el azul de metileno fue rápida, antes de los 25 minutos para ambos materiales, este resultado se debe a la rápida difusión de las moléculas del colorante a los sitios de unión activos, debido a la disponibilidad de los poros y la gran área superficial del material adsorbente que fue empleado (Mbarki et al., 2022; P et al., 2019). El modelo PSO supone que la tasa de ocupación de los sitios activos de adsorción son proporcional al número de sitios desocupados, mientras que, el modelo PSS indica la tasa de ocupación de los sitios de adsorción es proporcional al cuadrado del número de sitios desocupados (Lapo et al., 2019; Moreno & Hormaza, 2015).

4. CONCLUSIONES

Se aplicaron el carbón activado (CC) y carbón activado modificado con H_3PO_4 (CAC) a partir de los residuos de cáñamo para adsorber azul de metileno en soluciones acuosas. Los resultados experimentales se ajustaron a los modelos de las isotermas de Langmuir y Freundlich, en la cual, se obtuvo una capacidad máxima de adsorción para el CAC de $486,828 \text{ mg.g}^{-1}$ y $142,384 \text{ mg.g}^{-1}$ para CC ajustados al modelo de la isoterma de Langmuir, implica que la adsorción se produjo en la monocapa en una superficie homogénea. La adsorción de CAC y CC se ajustaron al modelo cinético de pseudo primer orden (PSO), por lo que se supone que el proceso fue evolutivo y favorecedor para la adsorción del azul de metileno. Finalmente, los resultados demostraron que el material CAC fue mejor comparación al CC, por lo que realizar carbón activado y modificarlo con ácido permitió obtuvo una mayor capacidad de adsorción, además, este material permitió aprovechar un residuo lignocelulosico, haciendo que el proceso sea de bajo costo y amigable con el medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

- Agboola, O. D., & Benson, N. U. (2021). *Physisorption and Chemisorption Mechanisms Influencing Micro (Nano) Plastics-Organic Chemical Contaminants Interactions : A Review*. 9(May), 1–27. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.678574>
- Al-ghouti, M. A., & Da, D. A. (2020). *Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models : A review*. 393(February).
- Alver, E., Metin, A. Ü., & Brouers, F. (2020). Methylene blue adsorption on magnetic alginate/rice husk bio-composite. *International Journal of Biological Macromolecules*, 154, 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.330>
- Asquer, C., Melis, E., Scano, E. A., & Carboni, G. (2019). Opportunities for Green Energy through emerging crops: Biogas valorization of cannabis sativa l. residues. *Climate*, 7(12). <https://doi.org/10.3390/cli7120142>
- Balajii, M., & Niju, S. (2019). Biochar - derived heterogeneous catalysts for biodiesel production. *Environmental Chemistry Letters*, 17(4), 1447–1469. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00885-x>
- Bedin, K. C., Martins, A. C., Cazetta, A. L., Pezoti, O., & Almeida, V. C. (2016). *KOH-activated carbon*

prepared from sucrose spherical carbon : Adsorption equilibrium , kinetic and thermodynamic studies for Methylene Blue removal. 286, 476–484.

Belkhiri, L., Bollinger, J., Bouzaza, A., & Assadi, A. (2018). *Removal of Methylene Blue from aqueous solutions by adsorption on Kaolin : Kinetic and equilibrium studies.* 153(November 2017), 38–45.

Buthelezi, S. P., Olaniran, A. O., & Pillay, B. (2012). *Textile Dye Removal from Wastewater Effluents Using Biofloculants Produced by Indigenous Bacterial Isolates.* 14260–14274. <https://doi.org/10.3390/molecules171214260>

Djilani, C., Zaghoudi, R., Djazi, F., & Bouchekima, B. (2015). *Adsorption of dyes on activated carbon prepared from apricot stones and commercial activated carbon.* 53, 112–121.

Faur-brasquet, C., & Cloirec, P. Le. (2003). *Adsorption of dyes onto activated carbon cloths : approach of adsorption mechanisms and coupling of ACC with ultrafiltration to treat coloured wastewaters.* 31, 3–11.

Foroutan, R., Mohammadi, R., Farjadfard, S., Esmaili, H., Saberi, M., & Sahebi, S. (2019). *Characteristics and performance of Cd , Ni , and Pb bio-adsorption using Callinectes sapidus biomass : real wastewater treatment.* 6336–6347.

Hassan, A. F., El-naggar, G. A., Esmail, G., & Shaltout, W. A. (2023). *Applied Surface Science Advances Efficient adsorption of methylene blue on novel triple-nanocomposites of potassium Kappa-carrageenan , calcium alginate and nanohydroxyapatite obtained from sea scallop shells.* 13(February).

Heidarinejad, Z., Dehghani, M. H., Heidari, M., Javedan, G., & Ali, I. (2020). *Methods for preparation and activation of activated carbon : a review.* *Environmental Chemistry Letters*, 18(2), 393–415. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00955-0>

Heidarinejad, Z., Rahmanian, O., Fazlzadeh, M., & Heidari, M. (2018). *Enhancement of methylene blue adsorption onto activated carbon prepared from Date Press Cake by low frequency ultrasound.* 264, 591–599.

Jawad, A. H., Ramlah, A. R., Khudzir, I., & Sabar, S. (2017). *High surface area mesoporous activated carbon developed from coconut leaf by chemical activation with H₃PO₄ for adsorption of*

- methylene blue. *Desalination And Water Treatment*, 74, 326–335.
- Kuang, Y., Zhang, X., & Zhou, S. (2020). *Adsorption of Methylene Blue in Water onto Activated Carbon by Surfactant Modification*. 1–19.
- Lapo, B., Demey, H., Carchi, T., & Sastre, A. M. (2019). Antimony removal from water by a chitosan-iron(III)[ChiFer(III)] biocomposite. *Polymers*, 11(2), 1–14. <https://doi.org/10.3390/polym11020351>
- Mbarki, F., Selmi, T., Kesraoui, A., & Seffen, M. (2022). *Low-cost activated carbon preparation from Corn stigmata fibers chemically activated using H₃PO₄, ZnCl₂ and KOH: Study of methylene blue adsorption, stochastic isotherm and fractal kinetic*. 178(January).
- Medhat, A., El-maghrabi, H. H., Abdelghany, A., Abdel, N. M., Raynaud, P., Moustafa, Y. M., Elsayed, M. A., & Nada, A. A. (2021). *Applied Surface Science Advances Efficiently activated carbons from corn cob for methylene blue adsorption*. 3(December 2020).
- Mittal, H., & Sinha, S. (2016). *A study on the adsorption of methylene blue onto gum ghatti / TiO₂ nanoparticles-based hydrogel nanocomposite*. 88, 66–80.
- Moreno, A., & Hormaza, A. (2015). *Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos en la adsorción de Rojo 40 sobre tuza de maíz Equilibrium, thermodynamic and kinetic models for the adsorption of red 40 onto corn cob*. 14(26), 105–120.
- Ngulube, T., Ray, J., Masindi, V., & Maity, A. (2017). *An update on synthetic dyes adsorption onto clay based minerals: A state-of-art review*. 191.
- P, Z. P., Qco, I., C, J. J., & Inf, M. (2019). *Equilibrio, cinética y termodinámica de la adsorción del colorante DB-86 sobre carbón activado de la cáscara de yuca*. 24(2), 7231–7238.
- Pathania, D., Sharma, S., & Singh, P. (2017). Removal of methylene blue by adsorption onto activated carbon developed from Ficus carica bast. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S1445–S1451. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.04.021>
- Qu, J., Wang, Y., Tian, X., Jiang, Z., Deng, F., Tao, Y., & Jiang, Q. (2021). KOH-activated porous biochar with high specific surface area for adsorptive removal of chromium (VI) and naphthalene from water: Affecting factors, mechanisms and reusability exploration. *Hazardous Materials*, 401(May 2020).

- R.A. Canales-Flores, F. P.-G. (2020). *Taguchi optimization for production of activated carbon from phosphoric acid impregnated agricultural waste by microwave heating for the removal of methylene blue*. 109(July).
- Rafatullah, M., Sulaiman, O., Hashim, R., & Ahmad, A. (2010). *Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents : A review*. 177, 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.047>
- Rao, M. M., Ramana, D. K., Seshaiyah, K., Wang, M. C., & Chien, S. W. C. (2009). *Removal of some metal ions by activated carbon prepared from Phaseolus aureus hulls*. 166, 1006–1013. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.12.002>
- Rashid, R., Shafiq, I., Akhter, P., Iqbal, M. J., & Hussain, M. (2021). *A state-of-the-art review on wastewater treatment techniques : the effectiveness of adsorption method*. 9050–9066.
- Schlumberger, C., & Thommes, M. (2021). *Characterization of Hierarchically Ordered Porous Materials by Physisorption and Mercury Porosimetry — A Tutorial Review*. 2002181. <https://doi.org/10.1002/admi.202002181>
- Shaltout, W. A., El, G. A., Esmail, N. G., & Hassan, A. F. (2022). *Synthesis and characterization of ferric @ nanocellulose / nanohydroxyapatite bio - composite based on sea scallop shells and cotton stalks : adsorption of Safranin - O dye*. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02753-1>
- Siong, W., Ying, J., Kumar, P. S., Mubashir, M., Majeed, Z., Banat, F., Ho, S., & Loke, P. (2021). *A review on conventional and novel materials towards heavy metal adsorption in wastewater treatment application*. *Journal of Cleaner Production*, 296, 126589. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126589>
- Ugwu, E. I., & Agunwamba, J. C. (2020). *A review on the applicability of activated carbon derived from plant biomass in adsorption of chromium, copper, and zinc from industrial wastewater*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(4). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8162-0>
- Xue, H., Wang, X., Xu, Q., Dhauouadi, F., Sellaoui, L., Seliem, M. K., Ben, A., Belmabrouk, H., Bajahzar, A., Bonilla-petriciolet, A., Li, Z., & Li, Q. (2022). *Adsorption of methylene blue from aqueous solution on activated carbons and composite prepared from an agricultural waste biomass : A comparative study by experimental and advanced modeling analysis*. 430(August 2021).