

Síntesis de carbón activado obtenido a partir de sargazo (*Sargassum spp*) para la decoloración de agua contaminada

Gustavo Espinosa-Eufrazio, José Enrique Valdez-Cerda, Margarita Loredo-Cansino, Ricardo Briones-Martínez y José Martín Rosas-Castor *

Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), Facultad de Ciencias Químicas, Cd. Universitaria, C.P. 64570. San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

*e-mail: jose.rosascs@uanl.edu.mx

Margarita Loredo-Cansino <https://orcid.org/0000-0001-5186-5168>

Ricardo Briones-Martínez <https://orcid.org/0000-0002-8514-8535>

José Martín Rosas-Castor <https://orcid.org/0000-0001-9860-2269>

José Enrique Valdez-Cerda <https://orcid.org/0000-0002-8384-8285>

Recibido 01 de Octubre de 2024, Aceptado 17 de Diciembre de 2024

Resumen

La presencia de colorantes en los cuerpos de agua derivados principalmente de la industria textil representa un grave problema de contaminación medioambiental y a la salud humana por lo que es necesario el desarrollo de nuevas tecnologías de factibles económicamente que permitan reducir su concentración. El objetivo del estudio es sintetizar un carbón activado derivado del tratamiento térmico de *Sargassum spp.*, biomasa residual y altamente disponible, para su aplicación en sistemas de adsorción. El carbón activado fue elaborado en horno tubular con flujo de argón, usando K_2CO_3 como agente activador y carboximetil celulosa como aglomerante. Los experimentos se realizaron en medio acuoso en sistemas batch por espectroscopía UV-Vis a temperaturas de 15 a 25 °C y pH de 4 a 8, aplicando isoterms de adsorción, cinéticas de adsorción y pruebas de reutilización mediante ciclos de adsorción-desorción. El carbón activado presentó una capacidad de adsorción de verde de malaquita de $Q_{max} = 154.857 \text{ mg g}^{-1}$ a 25°C. El modelo de pseudo segundo orden es el que mejor describe la dinámica de adsorción.

Palabras clave: Remoción, horno tubular, adsorción, colorante

Abstract

The presence of dyes in water bodies derived mainly from the textile industry represents a serious problem of environmental pollution and human health, so it is necessary to develop low-cost technologies to reduce their concentration. The aim of the study is to synthesize an activated carbon derived from the heat treatment of *Sargassum spp.*, residual and highly available biomass, for application in adsorption systems. The activated carbon was made in a tubular furnace with argon flow, using K_2CO_3 as an activating agent and carboxymethyl cellulose as a binder. The experiments were carried out in aqueous medium in batch systems by UV-Vis spectroscopy at temperatures of 15 to 25 °C and pH of 4 to 8, applying adsorption isotherms, adsorption kinetics and reuse tests by adsorption-desorption cycles. The activated charcoal had a malachite green adsorption capacity of $Q_{max} = 154.857 \text{ mg g}^{-1}$ at 25°C. The pseudo-second-order model is the one that best describes the adsorption dynamics.

Keywords: Removal, tube furnace, adsorption, dye

1. Introducción

Actualmente la aplicación de colorantes es muy común en la industria textil, estampados, caucho, plásticos, cosméticos e incluso en la industria de materias primas.

[1]

En el 2018, la producción de colorantes fue de 90 millones de kilogramos al año, cifra alta principalmente atribuida a la liberación de grandes cantidades de agua contaminada por actividad de industria textil la cual usa una gran variedad de agentes químicos tóxicos para vida acuática. Además, los colorantes actualmente son diseñados para ser altamente resistentes por lo que es complicado eliminarlos en plantas de tratamiento convencionales. [2]

Los colorantes son contaminantes de creciente preocupación debido a su alta toxicidad ligado a su presencia en el ambiente. Debido a su propiedad de captar la energía solar, los colorantes pueden reducir la cantidad de luz que puede llegar a los organismos fotosintéticos, y con ello, reducir los niveles de oxígeno de los cuerpos de agua. Los niveles de oxígeno adecuados son necesarios para mantener la vida acuática, principalmente para organismos superiores. La materia orgánica debido al incremento de organismos muertos produce a su vez, el incremento de bacterias y una mayor demanda de oxígeno. [3]

El verde de malaquita (VM), es un colorante trifenilmetano tóxico (presenta un DL_{50} para ratas, por vía oral, de 275 mg kg^{-1} , presenta un EC_{50} para invertebrados

acuáticos, de 0.1 mg L^{-1}) y cancerígeno (de acuerdo con la FDA, concentraciones menores a 1 % se prohibió su utilización en la acuicultura), es utilizado ampliamente en industrias para controlar enfermedades, además para pintar lana, nailon, algodón, papel, cuero y seda. Sin embargo, este colorante ingresa en medios acuosos y tiene un gran impacto ambiental ya que afecta la calidad del agua [4]. El VM es un tóxico reconocido porque no se biodegrada con facilidad quedando en el ambiente de forma residual por tiempo prolongado en los alimentos acuáticos. Esto afecta a la vida de ciertos tipos de peces, como crustáceos y microorganismos acuáticos. Por ello se han usado diferentes estrategias para remover colorantes como la ozonización y técnicas electroquímicas por medio de hidrólisis. La desventaja es que presentan un alto consumo de energía y generan compuestos secundarios, además en el caso de la ozonólisis, el corto tiempo de la vida media del ozono, alrededor de 20 min, influye en el coste del proceso.[5] Por otro lado, los procesos de adsorción tienen diferentes ventajas como el bajo costo de operación y buena efectividad, presentan una gran eficiencia en cuanto a eliminación de contaminantes, se puede reutilizar el material adsorbido.

La adsorción es un proceso fisicoquímico en el cual un compuesto entra en contacto con un sólido adsorbente y se adhiere a la superficie como por ejemplo el carbón activado (CA), que para su producción se parte en la mayoría de los casos de biomasa como, por ejemplo, algas pardas o verdes como el *Sargassum spp.*, cáscara de nuez, huesos de algunas frutas como el coco y las olivas, entre otros. Además, el (CA) debe tener algunas características como abundancia, estructura inherente de poros, alto contenido de carbono, alto rendimiento en masa y dureza también es comúnmente empleado para la recuperación de solventes (tolueno, etilo y acetato), decoloración de líquidos, eliminación de olores, como soportes catalíticos y su más importante aplicación en descontaminación de aguas.

Los grupos funcionales se forman por la activación e interacción de los radicales libres de la superficie del carbón con otros átomos, como por ejemplo nitrógeno y oxígeno. La interacción produce que la superficie del carbón se haga lo suficientemente reactiva y afecte sus propiedades como adsorbente al generar sitios de adsorción.

La presencia de la red de carbono (planos hexagonales que carecen de orden cristalográfico tridimensional). En la superficie del carbón confiere un carácter hidrofóbico, mientras que la oxidación del carbón, proceso que se relaciona con la fabricación del carbón activado, da un resultado en la formación de grupos funcionales como carbonilo, hidroxilo, carboxilo, éter, etc., que confieren un carácter hidrofílico al material.

En 2023, Zhao W. *et al.* [6] prepararon carbón activado a partir de paja de girasoles mediante ácido fosfórico como activador para su aplicación en la adsorción del colorante fucsina ácida en agua, usaron diferentes relaciones de impregnaciones de 1:1, 1:2, 1:3 y 1:5, obteniendo una capacidad de adsorción de $2,763.36 \text{ mg g}^{-1}$.

En 2020, Ali F. *et al.* [7] estudiaron la remoción de VM en soluciones acuosas mediante el empleo carbón activado (CA) aglomerado con sílica como adsorbente. Se

investigaron sistemáticamente la capacidad, la influencia del pH, el tiempo de equilibrio y la concentración inicial de tinte. Los resultados experimentales indicaron que la adsorción máxima del tinte en el solvente fue de 27 mg g^{-1} y el equilibrio fue alcanzado en unos 45 min. La absorción de VM por parte del CA se ve fuertemente favorecida en un ambiente ácido. El aglomerante de sílica ayudó en la eficiencia de la capacidad de adsorción. Además, para la optimización de experimentos utilizaron un aglomerante de Sílica modificada a un pH de 1 a 7 esto aumentó la absorción del tinte a 3 mg L^{-1} . [7]

En 2022, Francoeur M. *et al.* [8]determinaron las condiciones óptimas para sintetizar carbón activado derivado del *Sargassum spp.* para la adsorción eficiente de microcontaminantes emergentes como cafeína, tetraciclina, penicilina V y azul de metileno en aguas residuales. Utilizando una metodología de pirólisis con un intervalo de temperatura de 600 a 800 °C, un pH de 7, el uso de H_3PO_4 como agente activante y una relación masa ácido/precursor 2.4. La adsorción fue realizada con 15 mg mL^{-1} de carbón activado durante un tiempo de 65 min y la isoterma de adsorción por lotes en el carbón activado mostró una remoción de 39.9 %, 48.9 %, 39.7 % y 70.8 % (capacidades de adsorción de 329, 580, 150 y 222 mg g^{-1}) para cafeína, tetraciclina, penicilina V y azul de metileno respectivamente.

En la actualidad, el sargazo constituye una de las biomásas altamente disponibles. El crecimiento desmedido de *Sargassum spp.* en mares y zonas costeras es producido por temperaturas atípicas en la región y representa un grave problema de contaminación ambiental debido a que puede causar la acidificación del agua, con ello perjudicando el desarrollo de los corales, las zonas costeras por erosión y la actividad turística. El *Sargassum spp.* es una macroalga café flotante del mar que llega a las playas de manera masiva y cubre diversas extensiones, su desplazamiento es en relación con las corrientes oceánicas. Considerando lo anterior, es importante el desarrollo de tecnologías para el tratamiento de aguas como las tecnologías de adsorción, que permitan remover el VM en los cuerpos de agua y evitar el daño al medio ambiente y la salud del ser humano. El desarrollo de adsorbentes como carbón activado derivado de un material lignocelulósico de bajo costo como el *Sargassum spp.* representa una alternativa viable para el tratamiento de los cuerpos de agua. [9]

2. Parte experimental

2.1 Muestreo

El *Sargassum spp.* fue obtenido de la zona costera de Cancún en las coordenadas 1) 20.846243 -86.876617, 2) 21.104697 -86.763736 y 3) 21.085937, -86.771081 (**Figura 1**) durante el mes de enero del 2024.

Una vez obtenido, el *Sargassum spp.* fue lavado 5 veces con agua destilada para quitar el exceso de sales y arena y secado en horno de secado (Felisa FE-291AD) a 70 °C durante 3 días. Posteriormente. El alga seca fue triturada en mortero y almacenadas para su uso posterior en un recipiente de polietileno a temperatura ambiente.

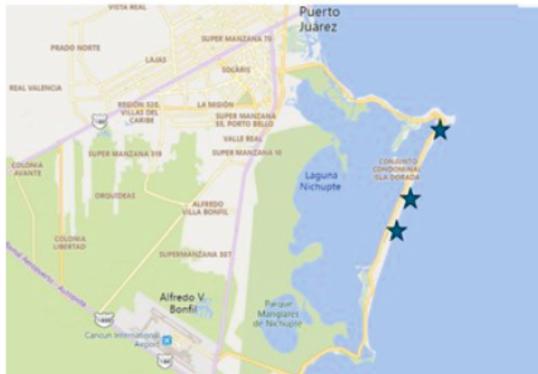


Figura 1. Sitio de muestreo y mapa territorial de la zona costera de Cancún Quintana Roo

2.2 Carbonización del carbón activado

El *Sargassum spp.* triturado fue carbonizado usando como agente activante el K_2CO_3 . La carbonización fue realizada en un horno tubular (ThermoLyne 21100) con atmósfera de gas inerte (argón). En la etapa de carbonización se evaluó el efecto de factores como la relación de agente activante y la temperatura mediante un Diseño factorial 2^2 con dos replicas. La biomasa usada fue 1 g en todos los casos empleando relaciones de masa g K_2CO_3 / g biomasa de 1:1 2:1 y 1:2 y temperaturas de 350 °C a 450 °C.

Posteriormente el carbón activado con mejores capacidades de remoción fue seleccionado para la elaboración de pellets utilizando carboximetilcelulosa (CMC) como agente aglomerante en concentraciones de 1 % $m\ m^{-1}$, 3 % $m\ m^{-1}$ y 5 % $m\ m^{-1}$. Para la elaboración de los pellets, una masa de carbón activado de 0.3 g, junto con la respectiva cantidad de CMC y se agregó un volumen de 0.1 mL de H_2O desionizada se mezclaron y secaron en un horno por 24 horas para eliminar el exceso de H_2O .

2.3 Caracterización

Los materiales fueron analizados por espectrofotometría de infrarrojo con transformada de Fourier (650 a 4,000 cm^{-1}) para el estudio de los grupos funcionales predominantes. El análisis del carbón activado fue realizado con y sin el material adsorbido. Las condiciones del proceso de adsorción fueron 1 g L^{-1} ; 25 °C, pH 6 y 250 min^{-1} durante 2 h.

La cantidad de ácidos y básicos fue determinada por medio de una titulación por retroceso. Una biomasa de 0.2 g fue agregado a un vaso de precipitado de 50 mL y posteriormente una solución de NaOH 0.01 N o de HCl 0.01 N fue agregada para la determinación de sitios ácidos o básicos totales respectivamente. La mezcla se mantuvo en agitación a 30 °C por 24 horas. El sólido resultante se removió de la suspensión por centrifugación a 3000 min^{-1} durante 4 min. Después de la valoración, los mEq de los sitios activos ácidos o básicos fueron cuantificados midiendo el volumen remanente de NaOH o HCl 0.1 M.

2.4 Estudios de adsorción

Una biomasa de 20 mg de carbón activado con aglomerante (concentración final de 1 g L^{-1}) fue añadida a tubos eppendorf de 4 mL con 2 mL de verde de malaquita (1, 3, 5, 10, 20, 40, 70 y 100 mg L^{-1}). Los tubos fueron agitados en agitación de 60 min^{-1} por 40 min y las condiciones de pH de 6 y a una temperatura de 25 °C. Los tubos se centrifugaron a 1000 min^{-1} por 2 min. La concentración al equilibrio se determinó mediante un espectrofotómetro UV-Vis a λ 620 nm y con ello, la capacidad de adsorción, todos los experimentos se realizarán por triplicado. La **ecuación (1)** que describe el cálculo de la capacidad de absorción es la siguiente:

$$q = \frac{(C_0 - C_t)}{m} \quad (1)$$

Donde, q (mg g^{-1}) es la capacidad de adsorción, C_t (mg L^{-1}) y C_0 (mg L^{-1}) son la concentración del adsorbato en el bulk, inicial y a tiempo t, respectivamente; y m (g) es la masa añadida del adsorbente.[10, 11]

Los datos experimentales de la capacidad de adsorción fueron utilizados para construir las isotermas de adsorción a través de los modelos de Langmuir y Freundlich.

El modelo de Langmuir se utiliza en sistemas de tipo sólido-líquido, sólido-vapor, sólido-gas, líquido-vapor y líquido-líquido. Se produce la adsorción en la superficie sólida, se construye a partir del balance de materia entre la fase fluida y sólida que se tiene en contacto. Además, la velocidad de adsorción depende de la presión y también de la cantidad de los sitios libres para que sean ocupados. [10, 11] La **ecuación (2)** que representa la capacidad de adsorción se describe como:

$$q = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2)$$

La “q” representa la capacidad de adsorción en el equilibrio (mg g^{-1}), la C_e la concentración de la solución en el equilibrio (mg L^{-1}), q_m la constante relacionada con la capacidad de adsorción (mg g^{-1}) y finalmente, la K_L es el Parámetro relacionado con la fuerza de unión del contaminante a la biomasa (L mg^{-1}).

En el modelo de Freundlich se toma en cuenta el comportamiento no lineal entre la cantidad adsorbida y la presión o concentración. Además, relaciona la concentración del soluto en la superficie del adsorbente junto con la concentración del soluto en el líquido que se está en contacto. [10, 11] La ecuación que describe este modelo es la siguiente:

$$q = K_F C_e^{1/n} \quad (3)$$

Donde la “q” es la capacidad de adsorción en el equilibrio (mg g^{-1}), K_F es el indicador de la capacidad de adsorción (mg g^{-1} (L mg^{-1}) $^{1/n}$) y C_e la concentración de la solución en el equilibrio (mg L^{-1}).

3. Resultados y discusión

3.1 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier

La espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) permite la evaluación de los grupos funcionales del *Sargassum spp.* CA con el activante (K_2CO_3) y si se presenta un cambio con el CA con CMC 1 % $m\ m^{-1}$, 3 % $m\ m^{-1}$ y 5 % $m\ m^{-1}$. En la **Figura 2**, el gráfico del CA sólido presenta 3 picos a resaltar, el primero a $1124\ cm^{-1}$. Considerando la estructura del CA, la banda se relaciona con vibraciones de estiramiento del grupo -C-O (que corresponden a aldehídos, cetonas y ácidos carboxílicos). Otra banda $1628\ cm^{-1}$ se relaciona con vibración de alargamiento del grupo C=C. La última banda a $701\ cm^{-1}$, se relaciona con movimientos de flexión fuera del plano -C-H, en anillos de benceno sustituidos. Para el CMC 1 y 3 % $m\ m^{-1}$ se presentan 3 picos de interés, en el primero a $1374\ cm^{-1}$ que corresponde a vibraciones de flexión de enlaces C-H (intervalo $1200-1400\ cm^{-1}$), el otro pico es de $1622\ cm^{-1}$ que corresponde a vibración de alargamiento del grupo C=C ($1610-1680\ cm^{-1}$), el último pico es de $831\ cm^{-1}$ que corresponde a movimientos de flexión fuera del plano -C-H, en anillos de benceno sustituidos ($500-900\ cm^{-1}$). En la **Figura 1** CMC 5 % $m\ m^{-1}$ se presenta adicionalmente una banda el primer pico es de $1374\ cm^{-1}$ que presenta vibraciones de estiramiento del grupo -C-O (Alcoholes). Además, Ho. *et al* [12], realizaron un estudio de remoción de fenol empleando como adsorbente CA derivado de la cáscara de coco, en el cual se realizó un análisis por espectroscopia de infrarrojo, y se presentó un pico similar al CA sólido de la **Figura 2**, en el rango de número de onda de $1632\ cm^{-1}$ asociado a grupos carbonilos C=O.

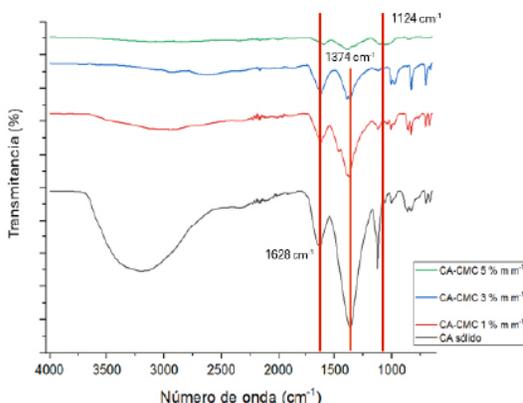


Figura 2. Espectros de infrarrojo de carbón activado de sargazo aglomerado con carboximetilcelulosa: CMC 1 % $m\ m^{-1}$, CMC 3 % $m\ m^{-1}$ y CMC 5 % $m\ m^{-1}$

3.2 Sitios ácidos y básicos totales

La determinación de los sitios ácidos de adsorción puede ser un parámetro que indica la calidad del material adsorbente si el mecanismo que gobierna el proceso de adsorción es la atracción electrostática. La cantidad de sitios ácidos en el carbón activado se relaciona con la

capacidad adsorción de material para compuestos cargados positivamente como lo es el caso de los colorantes catiónicos. En este proyecto la cantidad de sitios ácidos del CA-CMC presentó una estrecha relación con la capacidad máxima a adsorción a pH superiores a 4, esto debido al calcular la capacidad de adsorción a partir de los mEq, para calcular los mEq se utiliza la **ecuación (4)**, para conocer la capacidad de adsorción se aplica la **ecuación (5)**. La **Figura 3** presenta los sitios ácidos y básicos totales reportados como $mEq\ g^{-1}$ a una temperatura de $30\ ^\circ C$. En la misma figura se puede apreciar que predominan los sitios ácidos totales sobre los sitios básicos totales, lo que sugiere que el material presenta una mayor eficiencia para la remoción de especies cargas positivamente, como los colorantes catiónicos. El resultado empleado en la titulación por retroceso dio una q de $154.857\ mg\ g^{-1}$ peso molecular de VM: $364.9, 0.42\ Eq\ g^{-1}$.

$$mEq = (N)(L) \times 1000 \quad (4)$$

$$q = (PM)(mEq) \quad (5)$$

Donde q es la capacidad de adsorción ($mg\ g^{-1}$), PM es el peso molecular del sargazo ($g\ mol^{-1}$), mEq son los miliequivalentes, N es la normalidad (N) y L es el volumen (L).[10]

Estos resultados contrastan con otros estudios de elaboración de carbón activado, principalmente debido a que el mecanismo de adsorción predominante no es el electrostático. También Zaho. *et al.* realizaron los sitios de CA proveniente de semillas de eucalipto usando como activante el H_3PO_4 para la remoción de fenol, se encontró que el CA presentaron baja concentración de sitios ácidos. [6]

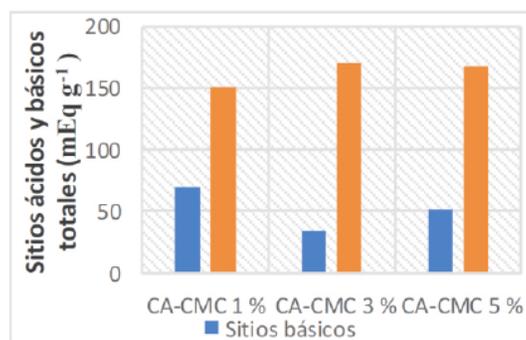


Figura 3. Sitios ácidos y básicos totales del carbón activado de *Sargassum spp.* a $30\ ^\circ C$

3.3 Estudio de la temperatura y relación de agente activante en la carbonización de sargazo.

La Temperatura y la relación del agente activador son parámetros en la elaboración del carbón activado estrechamente relacionados con la elaboración a bajo costo y eficiencia del agente adsorbente. Mediante un diseño factorial 2^2 con dos replicas, se estudió el proceso de síntesis del CA derivado del sargazo en el horno tubular

usando como factores el efecto de la temperatura (350 a 450 °C) y la relación agente activante (relación activante/biomasa de 1 a 0.5) sobre la capacidad de adsorción de VM. La **Tabla 1** muestra los valores decodificados de los factores evaluados. Un total de 8 experimentos fueron ejecutados para la obtención del carbón activado. La **Figura 4** muestra los datos experimentales de las isothermas de adsorción de VM en los 8 CA sintetizados usando un proceso de adsorción con una temperatura de 25 °C y pH 6 en agitación por un tiempo de 40 minutos. Las gráficas muestran un incremento de la capacidad pronunciado hasta los 20 mg L⁻¹ y posteriormente una estabilidad. Los datos experimentales fueron utilizados para construir los modelos de isothermas de adsorción siendo los modelos matemáticos de Langmuir y Freundlich los usados. En la **Tabla 1** se muestran también los parámetros de Isotherma de los modelos matemáticos. El modelo de Langmuir fue el que mejor representó los datos experimentales al presentar una R² más alta (0.948-0.977). Esto sugiere que el proceso de adsorción se realiza en una sola capa en la superficie del adsorbente y concuerda, de acuerdo con la estructura del adsorbato, con un mecanismo de adsorción de atracción electrostática. Los valores de la capacidad máxima de adsorción (Q_{max}) para este modelo variaron de 47.6 a 98 g/kg⁻¹. Los mayores valores fueron reportados con una mayor temperatura, 450 °C, y una mayor relación del agente activador, 1. Además, Prakoso T. *et al.* [13] sintetizaron CA derivado del *Sargassum spp.* y el modelo que mejor se ajustaba a los datos experimentales fue al modelo de Langmuir (Q_{max} de 95.85).

La **Figura 5** muestra el diagrama de Pareto para los factores evaluados en la etapa de pirólisis. El factor temperatura mostró un efecto significativo ($p < 0.05$) sobre la variable de respuesta (q_{max}) mientras que la relación de activante no. Es conocido que el incremento del agente activante aumenta el área superficial y con ello los sitios activos disponibles y la capacidad de adsorción por consecuencia. Es posible que el intervalo de la relación de biomasa/ activante este situada en la región máxima generación de sitios de adsorción. A mayor cantidad de agente activante se genera el colapso de poros generados lo que limita el incremento de la disponibilidad de los sitios activos. Los datos de la prueba ANOVA se pueden observar en la **Tabla 2** donde la temperatura presentó valores de p inferiores a 0.05. Los valores de p de 0.002 indican que el efecto es significativo lo cual corresponde a los altos valores de F superiores a los valores críticos del estadístico. Lo anterior sugiere que la relación directa de la generación de los sitios de adsorción con la temperatura de carbonización. A temperaturas superiores 700 °C el sargazo se puede convertir en biocarbón o incluso en ceniza por lo que la estabilidad del sargazo disminuye a partir de los 540 °C por lo que la temperatura de pirólisis no se puede estudiar en intervalos superiores. [14] Una temperatura de 450 °C y relación de activante/ biomasa de 1 fueron seleccionadas para los experimentos de adsorción posteriores.

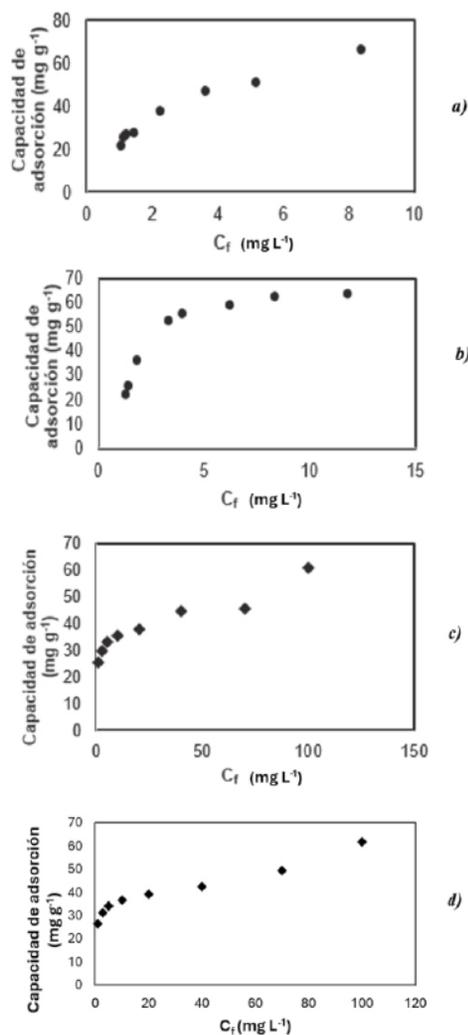


Figura 4. Isothermas de adsorción (25 °C, pH 6) de diseño de experimentos 2² para evaluación de condiciones de pirólisis (temperatura y relación activante/ biomasa): a) 450 °C, 1 b) 450 °C, 0.5, c) 350 °C, 1, y d) 350 °C, 0.5

Tabla 1. Datos decodificados de diseño de experimentos 2^2 para evaluación de condiciones de pirólisis. Estudios de adsorción de carbón activado de *Sargassum spp.* (Temperatura 25 °C, pH 6)

T (°C)	A/B	Langmuir			Freundlich		
		Q_{max}	b	R^2	n	K_f	R^2
450	1	98.0	0.21	0.965	1.80	12.1	0.928
450	0.5	79.3	0.43	0.976	2.17	14.6	0.847
350	1	65.3	1.42	0.965	4.56	20.5	0.856
350	0.5	58.8	0.90	0.977	7.75	19.4	0.933
450	1	88.5	0.15	0.948	1.55	8.3	0.895
450	0.5	86.2	0.37	0.983	2.093	14.6	0.981
350	1	60.6	0.58	0.960	3.823	15.8	0.909
350	0.5	47.6	0.71	0.977	6.398	15.8	0.835

t, Temperatura; A/B, Relación Activante/Biomasa

Tabla 2. Prueba ANOVA de diseño de experimentos 2^2 con dos replicas

Factor	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	p
T	1791.3	1	1791.3	50.14	0.002
A/b	204.9	1	204.9	5.73	0.074
Interacción	0.256	1	0.256	0.007	0.93
Error	142.9	4	35.7	N/A	N/A
Totales	2139.39	7	N/A	N/A	N/A

T, Temperatura; A/B, Relación Activante/Biomasa, gl, grados de libertad

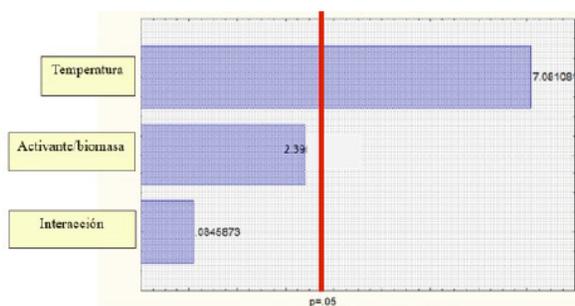


Figura 5. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados; Variables: Temperatura, activante/biomasa e Interacción

Las isothermas de adsorción representan la capacidad de adsorción como función de la concentración del adsorbato a una temperatura determinada. Con el objetivo de analizar la capacidad del agente aglomerante se realizaron las isothermas de adsorción de carbón activado (CA) obtenido a partir de *Sargassum spp.* a una temperatura de 25 °C, pH 6 y C_0 de 90 mg L⁻¹ con CMC a una concentración de a) 1 % m m⁻¹, b) 3 % m m⁻¹ y c) 5 % m m⁻¹. Los modelos de isoterma de Langmuir y Freundlich fueron utilizados para representar los datos experimentales mostrando que el modelo de Freundlich describe mejor los datos experimentales, lo que puede ser atribuido a la presencia del agente aglomerante, CMC, por efectos sobre el mecanismo de adsorción o por

incremento de la tortuosidad del sistema. Los valores de Q_{max} para 1%, 3% y 5% fueron de 34.5, 26.7 y 27.2 mg g⁻¹, respectivamente. Otros estudios muestran resultados comparables, Lamata-Bermejo et al. [15] usaron CA con un agente activante de KOH y HNO₃ encontrando que el factor temperatura de activación tiene un efecto significativo en la capacidad de remoción del carbón y que la mayor capacidad de adsorción no se debe a un mayor número de moléculas que un sitio receptor puede capturar, sino al aumento de sitios activos. La máxima capacidad de adsorción se encontró para el carbón activado con 20 mol % KNO₃ /80 mol % KOH ($x = 0,2$).

4. Conclusiones

Los sitios ácidos totales del CA presentaron una estrecha relación con la capacidad máxima de adsorción. El factor temperatura de 350 a 450 °C presentó un efecto significativo ($p = 0.05$) sobre la capacidad máxima de adsorción mientras que la relación de activante no en la relación 0.5 a 1. El carbón activado aglomerado con carboximetilcelulosa 1 % m m⁻¹ es el que presentó una capacidad de adsorción mayor sin perder la integridad estructural por lo que esta concentración es la recomendable para su aplicación en el tratamiento de aguas residuales.

En resumen, el carbón activado propuesto elaborado a partir de *Sargassum spp.* (activado con K₂CO₃ y aglomerado con carboximetilcelulosa) representa una alternativa viable, de bajo costo y de una capacidad de adsorción ($q > 650$ mg g⁻¹ de verde de malaquita) aceptable.

5. Agradecimiento

Los autores agradecen a la Facultad de Ciencias Químicas y a la Universidad Autónoma de Nuevo León por las facilidades otorgadas para la realización de este proyecto.

6. Referencias

- [1]. Aranda-Figueroa, M.G., Rodríguez-Torres, A., Rodríguez, A., Bolio-López, G.I., Salinas-Sánchez, D.O., Arias-Atayde, D.M., Romero, R.J., Valladares-Cisneros, M.G.: Removal of Azo Dyes from Water Using Natural *Luffa cylindrica* as a Non-Conventional Adsorbent. *MOLECULES* 29, (2024). <https://doi.org/10.3390/MOLECULES29091954>,
- [2]. Behera, A.K., Shadangi, K.P., Sarangi, P.K.: Efficient removal of Rhodamine B dye using biochar as an adsorbent: Study the performance, kinetics, thermodynamics, adsorption isotherms and its reusability. *Chemosphere*. 354, 141702 (2024). <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2024.141702>
- [3]. Abbas, A.M., Firas, I., Abdulrazzak, H., Sabbar, W.J., Abdul, R., Faraj, S.: Adsorption of dyes by activated carbon surfaces were prepared from plant residues: Review. *J. Mater. Environ. Sci.* 2020, 2007–2015 (2007)

- [4]. Nair, A., Kumawat, Y.K., Choudhary, S., Nath, J., Sharma, K., Rasool, T., Sharma, V., Kumar, V.: Malachite green dye adsorption from wastewater using pine gum-based hydrogel: Kinetic and thermodynamic studies. *J Mol Struct.* 1295, 136671 (2024). <https://doi.org/10.1016/J.MOLSTRUC.2023.136671>
- [5]. Oladoye, P.O., Ajiboye, T.O., Wanyonyi, W.C., Omotola, E.O., Oladipo, M.E.: Insights into remediation technology for malachite green wastewater treatment. *Water Science and Engineering.* 16, 261–270 (2023). <https://doi.org/10.1016/J.WSE.2023.03.002>
- [6]. Zhao, W. de, Chen, L. ping, Jiao, Y.: Preparation of activated carbon from sunflower straw through H3PO4 activation and its application for acid fuchsin dye adsorption. *Water Science and Engineering.* 16, 192–202 (2023). <https://doi.org/10.1016/J.WSE.2023.02.002>
- [7]. Ali, F., Bibi, S., Ali, N., Ali, Z., Said, A., Wahab, Z.U., Bilal, M., Iqbal, H.M.N.: Sorptive Removal of Malachite Green Dye by Activated Charcoal: Process Optimization, Kinetic, and Thermodynamic Evaluation. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering.* 2, (2020). <https://doi.org/10.1016/J.CSCEE.2020.100025>
- [8]. Francoeur, M., Yacou, C., Jean-Marius, C., Chérémont, Y., Jauregui-Haza, U., Gaspard, S.: Optimization of the synthesis of activated carbon prepared from *Sargassum* (sp.) and its use for tetracycline, penicillin, caffeine and methylene blue adsorption from contaminated water. *Environ Technol Innov.* 28, 102940 (2022). <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2022.102940>
- [9]. Husien, S., El-taweel, R.M., Mohamed, N., Abdel-Aziz, A.B., Alrefaey, K.A., Elshabrawey, S.O., Mostafa, N.G., Said, L.A., Fahim, I.S., Radwan, A.G.: Potentials of algae-based activated carbon for the treatment of M. orange in wastewater. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering.* 7, (2023). <https://doi.org/10.1016/J.CSCEE.2023.100330>
- [10]. Soo, X.Y.D., Lee, J.J.C., Wu, W.Y., Tao, L., Wang, C., Zhu, Q., Bu, J.: Advancements in CO2 capture by absorption and adsorption: A comprehensive review. *Journal of CO2 Utilization.* 81, 102727 (2024). <https://doi.org/10.1016/J.JCOU.2024.102727>
- [11]. Heryanto, H., Tahir, D., Abdullah, B., Kavgaci, M., Rinovian, A., Masrour, R., Prasad, V.S.R., Sayyed, M.I.: Carbon as a multifunctional material in supporting adsorption performance for water treatment: Science mapping and review. *Desalination Water Treat.* 320, 100758 (2024). <https://doi.org/10.1016/J.DWT.2024.100758>
- [12]. Ho, Z.H., Adnan, L.A.: Phenol Removal from Aqueous Solution by Adsorption Technique Using Coconut Shell Activated Carbon. *Tropical Aquatic and Soil Pollution.* 1, 98–107 (2021). <https://doi.org/10.53623/TASP.V1I2.21>
- [13]. Prakoso, T., Rustamaji, H., Yonathan, D., Devianto, H., Widiatmoko, P., Rizkiana, J., Guan, G.: The Study of Hydrothermal Carbonization and Activation Factors' Effect on Mesoporous Activated Carbon Production From *Sargassum* sp. Using a Multilevel Factorial Design. *Reaktor.* 22, 59–69 (2022). <https://doi.org/10.14710/REAKTOR.22.2.59-69>
- [14]. Tobío-Pérez, I., Alfonso-Cardero, A., Yosvany Díaz-Domínguez, P., Pohl, S., Ramón Piloto-Rodríguez, P., Lapuerta, J. Magín: Thermochemical Conversion of *Sargassum* for Energy Production: a Comprehensive Review. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10382-1>
- [15]. Lamata-Bermejo, I., Alba, M.D., Ramírez-Rico, J.: Influence of the chemical activation with KOH/KNO3 on the CO2 adsorption capacity of activated carbons from pyrolysis of cellulose. *J Environ Chem Eng.* 12, 114288 (2024). <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2024.114288>