

Síntesis y caracterización de carbón activado a partir del fruto seco de la *Jacaranda mimosifolia*: Estudio comparativo entre activación química y física

Resumen

*Se sintetizó carbón activado a partir del fruto seco de *Jacaranda mimosifolia* mediante activación química con H_3PO_4 ($R=2$) y activación física con vapor de agua. Los materiales obtenidos fueron caracterizados mediante SEM-EDS, pH, número de yodo, área superficial BET e isothermas de adsorción de azul de metileno. El carbón activado químico presentó una mayor área superficial ($678\text{ m}^2/\text{g}$), mayor volumen de poro y una estructura predominantemente mesoporosa, alcanzando una capacidad máxima de adsorción de aproximadamente 227 mg/g para azul de metileno. En contraste, el carbón activado físico mostró una menor área superficial ($311\text{ m}^2/\text{g}$) y capacidad de adsorción ($\sim 10\text{ mg/g}$), asociadas a una estructura predominantemente microporosa y mayor grado de carbonización. Ambos materiales presentaron números de yodo superiores a 1200 mg/g , lo que indica un adecuado desarrollo de microporosidad. Los datos de adsorción se ajustaron mejor al modelo de Freundlich para el carbón activado químico, sugiriendo una superficie heterogénea, mientras que el carbón activado físico mostró un mejor ajuste al modelo de Langmuir, indicando un comportamiento más homogéneo. Los resultados demuestran que *Jacaranda mimosifolia* es un precursor viable y sustentable para la producción de carbón activado. Aunque la activación química ofrece un mayor desempeño adsorbente, la activación física representa una alternativa con ventajas en simplicidad operativa, ausencia de reactivos químicos y potencial de aplicación en contextos descentralizados o de bajos recursos para el tratamiento de agua.*

Palabras clave: Carbón activado, *Jacaranda mimosifolia*; activación química; activación física; adsorción; azul de metileno; biomasa lignocelulósica; tratamiento de agua; sostenibilidad.

Abstract

Activated carbon was synthesized from *Jacaranda mimosifolia* dry fruit using both chemical activation with H_3PO_4 ($R=2$) and physical activation with steam. The materials were characterized by SEM-EDS, pH, iodine number, BET surface area and methylene blue adsorption isotherms. The chemically activated carbon exhibited a higher surface area ($678\text{ m}^2/\text{g}$), greater pore volume and a mesoporous structure, resulting in a maximum adsorption capacity of approximately 227 mg/g for methylene blue. In contrast, the physically activated carbon showed a lower surface area ($311\text{ m}^2/\text{g}$) and adsorption capacity ($\sim 10\text{ mg/g}$), associated with a predominantly microporous structure and higher carbon content. Both materials presented iodine numbers above 1200 mg/g , indicating a well-developed microporosity. Adsorption data were better described by the Freundlich model for the chemically activated carbon, suggesting a heterogeneous surface, while the physically activated carbon followed Langmuir behavior, indicating a more homogeneous adsorption process. The results demonstrate that *Jacaranda mimosifolia* is a viable and sustainable precursor for activated carbon production. While chemical activation enhances adsorption performance, physical activation offers advantages in terms of simplicity, absence of chemical reagents and potential application in decentralized or low-resource settings for water treatment.

Keywords: Activated Carbon, *Jacaranda mimosifolia*; chemical activation; physical activation; adsorption; methylene blue; lignocellulosic biomass; water treatment; sustainability

Introducción

El carbón activado (CA) es uno de los materiales adsorbentes más utilizados en la ingeniería ambiental debido a su elevada área superficial, su estructura porosa bien desarrollada y su fuerte capacidad de adsorción para una amplia gama de contaminantes, incluyendo colorantes, metales pesados y compuestos orgánicos ^[1,2]. Su aplicación en el tratamiento de agua ha cobrado especial relevancia en las últimas décadas, especialmente para la eliminación de contaminantes recalcitrantes presentes en efluentes industriales, como los de las industrias textil y química ^[3].

A pesar de su uso extensivo, el carbón activado convencional se produce típicamente a partir de precursores no renovables como el carbón mineral o la madera, lo que genera altos costos de producción y un impacto ambiental significativo ^[4]. En consecuencia, se ha dirigido una atención creciente hacia el uso de precursores alternativos, particularmente residuos de biomasa lignocelulósica, debido a su abundancia, bajo costo y alto contenido de carbono. Estos materiales han demostrado el potencial para producir carbones activados con propiedades fisicoquímicas comparables a las de los productos comerciales, promoviendo al mismo tiempo la valorización de residuos y estrategias de economía circular ^[5,6].

Entre estos precursores, la *Jacaranda mimosifolia* ha surgido como un material lignocelulósico prometedor. Esta especie está ampliamente distribuida en zonas urbanas, particularmente en México, donde su fruto seco se genera estacionalmente en grandes cantidades y suele considerarse un residuo de bajo valor. Su composición lignocelulósica, consistente principalmente en celulosa, hemicelulosa y lignina, la hace adecuada para procesos de carbonización y activación, permitiendo el desarrollo de estructuras porosas con capacidad de adsorción ^[7].

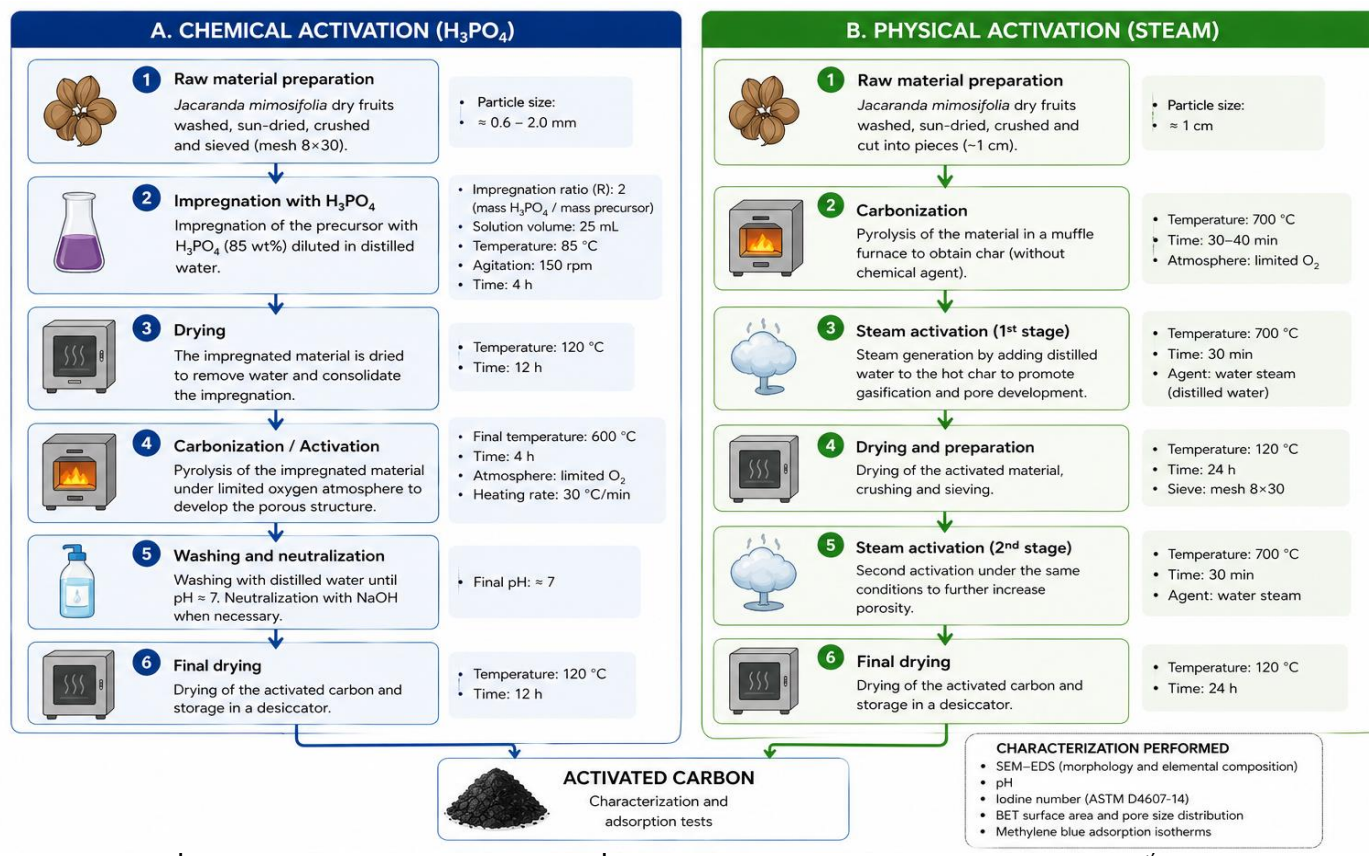
La producción de carbón activado se lleva a cabo comúnmente mediante dos métodos principales: activación química y activación física. La activación química implica la impregnación del precursor con agentes activantes como el ácido fosfórico (H_3PO_4), el cual promueve reacciones de deshidratación y reordenamiento estructural, conduciendo a la formación de una estructura altamente porosa a temperaturas relativamente bajas ^[8]. En contraste, la activación física consiste en la gasificación parcial del material carbonizado utilizando agentes oxidantes como vapor de agua o CO_2 a altas temperaturas (700-1000 °C), favoreciendo el desarrollo de microporosidad a través de la eliminación controlada de carbono ^[9,10].

Estudios previos han reportado que la activación química generalmente produce carbones activados con mayor área superficial y una capacidad de adsorción mejorada, mientras que la activación física ofrece ventajas en términos de simplicidad operativa, menor consumo de químicos y un impacto ambiental reducido [9]. Por lo tanto, una evaluación comparativa de ambos métodos es esencial para determinar el enfoque más adecuado dependiendo de la aplicación prevista y los recursos disponibles.

En este contexto, el objetivo de este estudio es sintetizar y caracterizar carbones activados derivados del fruto seco de *Jacaranda mimosifolia* utilizando métodos de activación química y física, y evaluar sus propiedades fisicoquímicas y su rendimiento de adsorción. Este trabajo contribuye al desarrollo de materiales adsorbentes sostenibles a partir de residuos de biomasa urbana y explora el potencial de estrategias de producción de bajo costo para aplicaciones descentralizadas de tratamiento de agua.

1. Materiales y Métodos

El procedimiento experimental global para producir carbón activado tanto por vías químicas como físicas de activación se resume en la Figura 1. La metodología incluye la preparación de materia prima, los procesos de activación y los pasos posteriores al tratamiento previo a la caracterización.



2.1. Materia prima

Los frutos secos de *Jacaranda mimosifolia* se recogieron en zonas urbanas de Puebla, México. El material se secó naturalmente bajo la luz solar para reducir el contenido de humedad y posteriormente se trituró. La biomasa se tamizó para obtener un tamaño de partícula uniforme (malla 8×30) para la activación química, mientras que se seleccionaron fragmentos más grandes (~1 cm) para su activación física con el fin de preservar la integridad estructural durante el tratamiento térmico.

2.2 Activación química

La activación química se realizó utilizando ácido fosfórico (H_3PO_4 , 85 wt%) como agente activador con una proporción de impregnación ($R=2$) (masa de ácido/masa de precursor). Una masa fija de 4.5 g de precursor se impregnó con la solución ácida diluida en 25 mL de agua destilada. La mezcla se agitó a 85 °C y 150 rpm durante 4 horas para promover la penetración del ácido en la matriz lignocelulósica.

Tras la impregnación, las muestras se secaron a 120 °C durante 12 horas y posteriormente se carbonizaron en una mufla a 600 °C durante 4 horas bajo condiciones de oxígeno limitado, con una velocidad de calentamiento de 30 °C/min. El material resultante se lavó con agua destilada hasta alcanzar un pH casi neutro. Cuando era necesario, la neutralización se realizaba usando NaOH. Finalmente, las muestras se secaron a 120 °C durante 12 horas y se almacenaron en un desecador.

2.3 Activación física

La activación física se realizó en dos etapas. Primero, la carbonización se realizó colocando la biomasa en un recipiente de acero inoxidable dentro de un horno de amortiguación precalentado a 700 °C. El material se introdujo gradualmente para asegurar una descomposición térmica uniforme y se mantuvo durante 30-40 minutos tras la adición completa.

Posteriormente, se logró la activación introduciendo agua destilada en el material carbonizado caliente para generar vapor in situ, promoviendo la gasificación parcial. El material se secó luego a 120 °C durante 24 horas, se trituró, se tamizó (malla 8×30) y se lavó con agua destilada.

Se aplicó un segundo paso de activación bajo las mismas condiciones térmicas (700 °C durante 30 minutos), seguido de la generación de vapor. El producto final se secó a 120 °C durante 24 horas y se almacenó para un análisis posterior.

2.4 Caracterización del carbón activado

2.4.1 Análisis morfológico y elemental (SEM-EDS)

La morfología superficial y la composición elemental de las muestras se analizaron mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) acoplada a espectroscopía de dispersión de energía (EDS). Esta técnica permitió identificar la textura superficial, el desarrollo de poros y la distribución elemental.

2.4.2 Determinación del pH

El pH del carbón activado se determinó según ASTM D3838-05. Se preparó y midió una suspensión de la muestra en agua destilada utilizando un medidor de pH digital calibrado.

2.4.3 Número de yodo

El número de yodo se determinó siguiendo la norma ASTM D4607-14 como indicador de microporosidad. El método consiste en adsorber yodo de una solución estándar y cuantificar la concentración residual mediante titulación. Los resultados se expresaron en mg de yodo adsorbido por gramo de carbono.

2.4.4 Área superficial y distribución de poros de la BET

Las propiedades texturales se determinaron mediante adsorción de nitrógeno a 77 K utilizando el método Brunauer-Emmett-Teller (BET). Antes del análisis, las muestras se desgasificaban al vacío. Se calcularon la superficie superficial, el volumen de poros y el diámetro medio de los poros a partir de las isothermas de adsorción-desorción.

2.4.5 Experimentos de adsorción

La capacidad de adsorción de los carbones activados se evaluó utilizando azul de metileno como adsorbato modelo. Se preparó una solución de stock (25 mg/L) y se realizaron experimentos de adsorción en lotes mezclando 100 mL de solución con diferentes masas de adsorbente.

Para carbón activado químicamente, se usaron masas entre 0,001 y 0,05 g, mientras que, para carbón activado físico, se emplearon masas entre 0,20 y 0,40 g. Las mezclas se agitaron a 150 rpm durante 72 horas a temperatura ambiente para asegurar el equilibrio.

Tras la adsorción, las muestras se analizaron mediante espectrofotometría UV-Vis para determinar la concentración residual. La capacidad de adsorción (q_e , mg/g) se calculó utilizando:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m}$$

donde C_0 y C_e son las concentraciones iniciales y de equilibrio (mg/L), V es el volumen de solución (L) y m es la masa del adsorbente (g).

2.4.6 Modelos de isoterma de adsorción

Los datos experimentales se ajustaron a los modelos isotérmicos de Langmuir y Freundlich para describir el mecanismo de adsorción. El modelo de Langmuir asume adsorción monocapa en una superficie homogénea, mientras que el modelo de Freundlich describe la adsorción en superficies heterogéneas con diferentes sitios de energía.

2.4.7 Determinación de isotermas de adsorción

Se preparó una solución de 25 mg/L de azul de metileno y se mezcló con diferentes masas de GAC (1, 10, 20, 30, 40 y 50 mg). Cada muestra se mezcló con 100 ml de la solución de previamente preparada en un matraz Erlenmeyer de 250 mL, que se cubrió y envolvió con aluminio para evitar la fotodegradación de la muestra. El equilibrio dinámico del proceso de adsorción para las concentraciones utilizadas se alcanzó a las 72 horas, como se estableció en otros experimentos realizados previamente [15]; los matraces estuvieron bajo agitación a 150 rpm durante este periodo. La absorción de cada matraz se tomó al inicio del experimento y tras 72 horas usando un espectrofotómetro Hach (modelo DR6000) a 660 nm de longitud de onda. Cada ejecución incluía una muestra de control de MB sin GAC. Para determinar la concentración residual, se realizó una curva de calibración absorbancia-concentración usando valores inferiores a 25 mg/L, para mantenerse dentro del rango lineal, según la Ley de Beer. Finalmente, los datos obtenidos se ajustaron a los modelos de isotermas de adsorción de Langmuir y Freundlich.

2. Resultados y discusión

Esta sección analiza las propiedades fisicoquímicas y de adsorción de carbones activos obtenidos de *Jacaranda mimosifolia* mediante activación química ($R=2$) y física. La discusión integra resultados morfológicos, texturales y de adsorción para establecer la influencia del método de activación en el rendimiento del material.

3.1 Rendimiento por pirólisis

Los rendimientos de pirólisis obtenidos para los carbones activos derivados de *Jacaranda mimosifolia* se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Rendimiento de pirólisis de carbones activados obtenidos de *Jacaranda mimosifolia*.

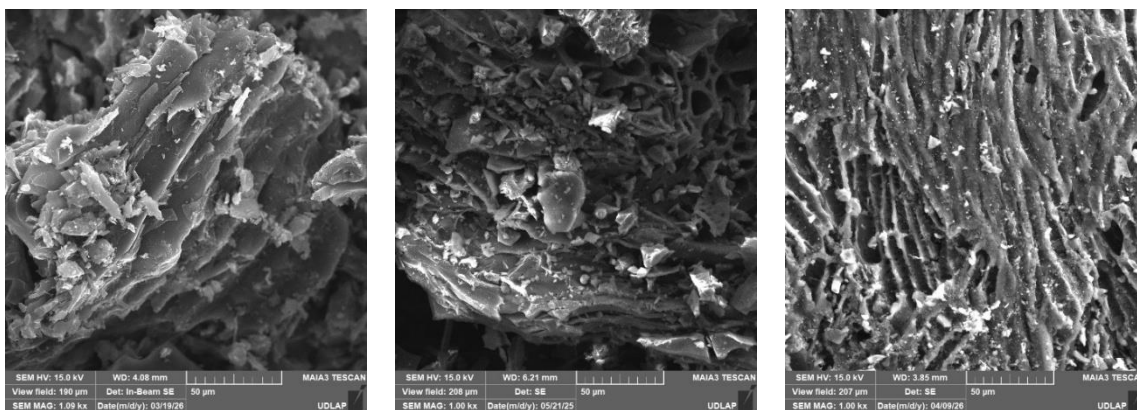
Muestra	Método de activación	Rendimiento (%)
CAQ	Químico (H_3PO_4)	24.0
CAF	Físico (vapor)	19.2

El carbón activado químicamente mostró un rendimiento mayor en comparación con el carbón activado físicamente. Esta diferencia está asociada a los mecanismos implicados en cada método de activación. Durante la activación química, el ácido fosfórico promueve reacciones de deshidratación y reticulación dentro de la matriz lignocelulósica, lo que estabiliza la estructura y reduce la liberación de compuestos volátiles^[5]. En cambio, la activación física implica reacciones de gasificación entre carbono y vapor a temperaturas elevadas, lo que conduce a un consumo progresivo de carbono y a menores rendimientos sólidos^[1].

A pesar de estas diferencias, ambos valores se encuentran dentro del rango típico reportado para precursores lignocelulósicos (15-35%), lo que confirma la idoneidad de *Jacaranda mimosifolia* como precursor para la producción de carbón activado.

3.2 Análisis morfológico y elemental (SEM-EDS)

La morfología superficial y la composición elemental de los carbones activados se analizaron mediante microscopía electrónica de barrido junto con espectroscopía de dispersión de energía (SEM-EDS), con el fin de evaluar los cambios estructurales inducidos por los procesos de activación.



(a) CAQ, 1 kx

(b) CP, 1 kx

(c) CAF, 1 kx

Figura 2. Micrografías SEM de carbones activados obtenidas de Jacaranda mimosifolia: (a) carbón químicamente activado (CAQ, $R=2$); (b) precursor carbonizado; (c) carbón activado físicamente (CAF).

El carbón activado químicamente (CAQ) presentaba una superficie altamente heterogénea e irregular, caracterizada por la presencia de fracturas, cavidades y estructuras fragmentadas. A aumentos más altos, se puede observar una microtextura fina, lo que sugiere el desarrollo de una red porosa bien distribuida. Esta morfología es típica de los carbones producidos por activación química, donde el agente activador favorece la deshidratación, la ruptura de enlaces y la expansión de la matriz de carbono, lo que conduce a la formación tanto de micro- como de mesoporos ^[5,9].

En contraste, el precursor carbonizado (antes de la activación) presentaba una estructura relativamente compacta con porosidad limitada, compuesta por partículas irregulares con superficies lisas y parcialmente colapsadas. Solo se observaron cavidades y vacíos incipientes, lo que indica que la carbonización por sí sola es insuficiente para generar una estructura porosa altamente desarrollada. Estas características son consistentes con la descomposición térmica de componentes lignocelulósicos, lo que conduce a la formación de una matriz inicial de carbono con baja accesibilidad ^[11].

Tras la activación física, el carbono resultante (CAF) mostró una estructura porosa más definida en comparación con el material carbonizado. La superficie presentaba canales, cavidades alargadas y patrones de erosión asociados al proceso de gasificación. Sin embargo, la textura se mantuvo más uniforme y menos fragmentada que la observada en el carbón activado químicamente. Esto sugiere que la activación física promueve la formación de poros mediante la eliminación selectiva del carbono en lugar de una alteración estructural extensa.

Estas observaciones ponen de relieve las diferencias fundamentales entre los mecanismos de activación. La activación química genera porosidad mediante la modificación estructural interna y la hinchazón de la matriz, mientras que la activación física desarrolla porosidad mediante erosión superficial y gasificación gradual ^[1].

La composición elemental obtenida por EDS se resume en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición elemental de los carbones activados determinada por EDS.

Element	CAQ (%)	Carbonizado (%)	CAF (%)
C	71.49	72.85	93.96
O	21.79	23.4	6.04

El carbón activado químicamente mostró un contenido significativo de oxígeno, lo que indica la presencia de grupos funcionales superficiales como hidroxilo, carbonilo y carboxílico. Se sabe que estas funcionalidades mejoran la adsorción al proporcionar sitios activos para la interacción con adsorbatos, especialmente en sistemas acuosos ^[12].

En cambio, el carbón activado físicamente presentaba un contenido de carbono mucho mayor y una menor concentración de oxígeno, lo que sugiere un mayor grado de carbonización y ordenamiento estructural. La reducción de grupos que contienen oxígeno es coherente con el tratamiento a alta temperatura, que elimina especies volátiles y promueve la formación de estructuras de carbono más aromáticas.

Además, la detección de fósforo en el carbón activado químicamente (no mostrado en el CAF) confirma la incorporación de residuos del agente activador. Se ha reportado que los grupos que contienen fósforo contribuyen al desarrollo de poros y a la estabilidad estructural en carbonos activados químicamente ^[9].

En general, el análisis SEM-EDS demuestra que el método de activación influye fuertemente tanto en la morfología como en la composición química de los materiales resultantes. El carbón activado químicamente presenta una superficie más heterogénea y funcionalizada con mayor accesibilidad, mientras que el carbón activado físicamente presenta una matriz más rica en carbono y

estructuralmente ordenada, con menor funcionalidad superficial. Estas diferencias están directamente relacionadas con el rendimiento de adsorción discutido en secciones posteriores.

3.3 Química de superficies (pH)

Los valores de pH de los carbones activados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores de pH del carbón activado.

Masa (g)	Químico (pH)	Std. Dev.	Físico (pH)	Std. Dev.
0.2	6.75	0.202567	10.8	2.036427
0.2	7.14		7.41	
0.2	6.85		7.15	
Promedio	6.91		8.45	

El carbón activado químicamente mostró un pH casi neutro, lo que puede atribuirse a la presencia de grupos funcionales que contienen oxígeno formados durante la activación. En cambio, el carbón activado físicamente mostró un carácter ligeramente básico, comúnmente asociado con la eliminación de grupos ácidos durante tratamientos a alta temperatura y la concentración de residuos minerales ^[1].

Estas diferencias en la química superficial influyen en la interacción entre el adsorbente y los contaminantes, especialmente en sistemas acuosos donde las interacciones electrostáticas juegan un papel clave.

3.4 Número de yodo

El número de yodo se determinó como indicador de microporosidad, y los resultados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de adsorción de yodo para carbones activos.

CAQ				CAF			
C _n	X/M (mg/g)	log(C)	log(X/M)	C _n	X/M (mg/g)	log(C)	log(X/M)
0.0665	1666.48	1.1773	3.2218	0.0741	1238.7611	1.1305	3.0930
	30						

0.0722	898.336	1.1414	2.9534	0.0757	757.6920	1.1210	2.8795
7							
0.0814	377.049	1.0893	2.5764	0.0792	437.7456	1.1015	2.6412
0							
Número medio de yodo: 1239.6 mg/g				Número medio de yodo: 1265.26 mg/g			

Ambos materiales presentaban niveles de yodo superiores a 1200 mg/g, lo que indica una estructura microporosa muy desarrollada. El valor ligeramente mayor observado para el carbón activado físicamente sugiere que la activación del vapor promueve eficazmente la formación de microporos mediante reacciones de gasificación^[11].

Estos valores son comparables o superiores a los reportados para los carbones activados comerciales, que suelen oscilar entre 500 y 1200 mg/g^[11], lo que indica la alta calidad de los materiales producidos en este estudio.

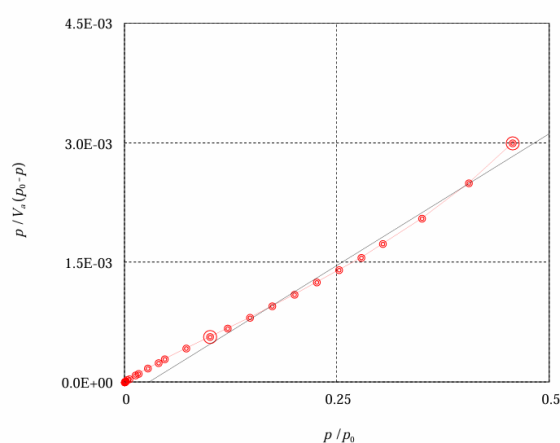
3.5 BET parámetros texturales de carbones activados.

Las propiedades texturales de los carbones activados se determinaron mediante análisis de adsorción y desorción de nitrógeno a 77 K, y los resultados se resumen en la Tabla 5.

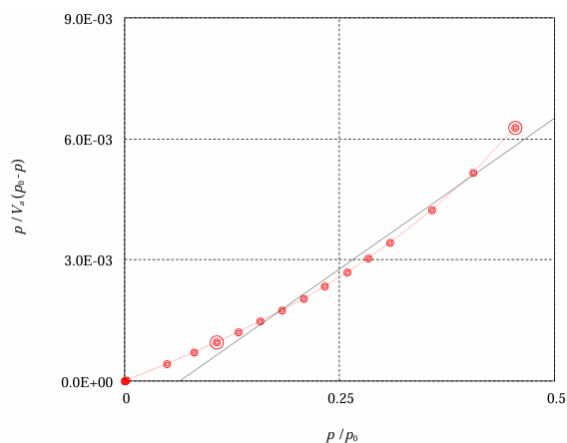
Tabla 5. Parámetros texturales de BET de carbones activos.

Muestra	Superficie (m²/g)	Volumen de poros(cm³/g)	Diámetro de poros (nm)
CAQ	678.36	0.5435	3.20
CAF	311.27	0.2096	2.69

Las isotermas de adsorción-desorción para ambos materiales se presentan en la Figura 3.



(a) CAQ



(b) CAF

Figura 3. Isotermas de adsorción-desorción de nitrógeno de carbones activados obtenidas de *Jacaranda mimosifolia*: (a) CAQ; (b) CAF.

El carbón activado químico (CAQ) mostró un área superficial y volumen de poro significativamente mayor comparado al carbón activado físico (CAF). Este comportamiento se atribuye a la acción del ácido fosfórico, que promueve el desarrollo de poros a temperaturas relativamente bajas y facilita la formación tanto de micro- como de mesoporos [9].

La isoterma de CAQ muestra un perfil consistente con el comportamiento tipo IV según la clasificación IUPAC, lo que indica la presencia de mesoporosidad con posible histéresis asociada a condensación capilar. Esto coincide con el diámetro medio del poro (3,2 nm), que se encuentra dentro del rango mesoporoso y favorece la difusión de moléculas más grandes en procesos de adsorción en fase líquida [13].

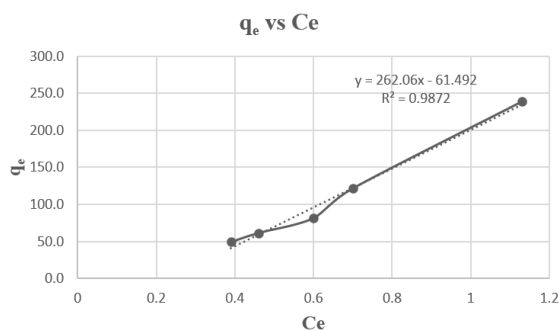
En contraste, la muestra de CAF mostró una menor capacidad de adsorción y un lazo de histéresis menos pronunciado, lo que sugiere una estructura con mayor contribución de microporos y un desarrollo de mesoporo limitado. El diámetro medio de los poros (2,69 nm) indica una estructura cercana al límite microporoso-mesoporoso, lo que puede restringir el acceso de adsorbatos más grandes.

Estos hallazgos son coherentes con los resultados del número de yodo, que indicaron un alto grado de microporosidad en ambos materiales, y con los resultados de adsorción, donde el carbón activado químicamente mostró un rendimiento superior para la eliminación del azul de metileno.

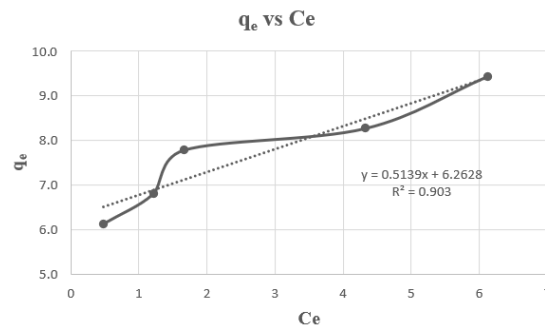
3.6 Adsorción del azul de metileno

La capacidad de adsorción de los carbones activados se evaluó utilizando azul de metileno (MB) como compuesto modelo debido a su sensibilidad a la mesoporosidad y su uso generalizado en estudios de adsorción [3].

Las isothermas de adsorción experimentales obtenidas para ambos materiales se presentan en la Figura 4.



(c) CAQ



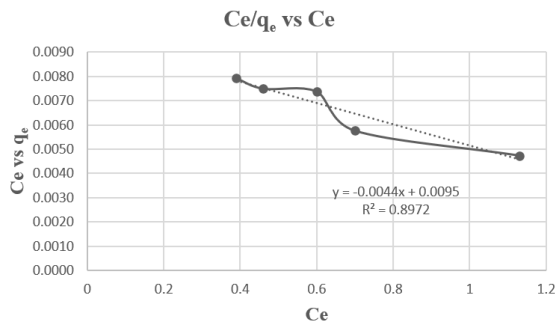
(d) CAF

Figura 4. Isothermas de adsorción experimental de azul de metileno sobre carbones activados: (a) carbón químicamente activado (CAQ, R=2) y carbón activado físicamente (CAF).

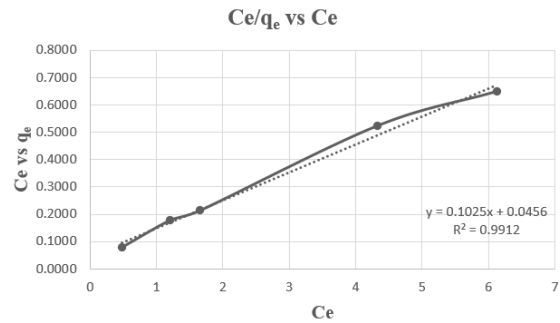
Como se observó, el carbón activado químicamente mostró una capacidad de adsorción significativamente mayor, alcanzando un valor máximo de aproximadamente 227 mg/g, mientras que el carbón activado físicamente presentaba una capacidad mucho menor, cercana a 10 mg/g.

Esta diferencia pronunciada se atribuye a las características estructurales y químicas de los materiales. La mayor superficie y la estructura mesoporosa de la CAQ facilitan la difusión y adsorción de moléculas de azul de metileno, mientras que la predominancia de microporos en la CAF limita la accesibilidad [1].

Para describir mejor el mecanismo de adsorción, los datos experimentales se ajustaron a los modelos de Langmuir y Freundlich. Los gráficos linealizados correspondientes se muestran en las Figuras 5 y 6.

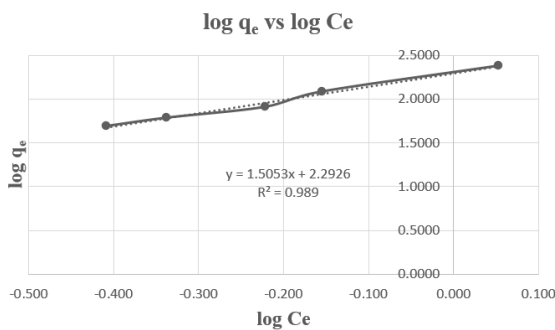


(a) CAQ

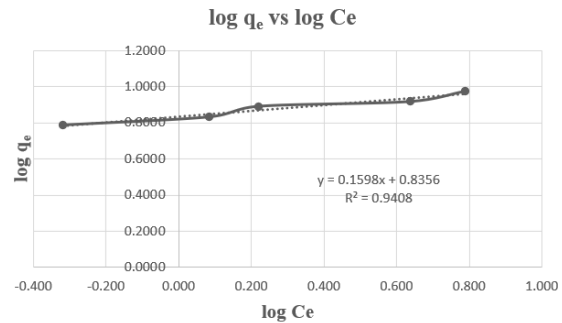


(b) CAF

Figura 5. Ajuste del modelo Langmuir para la adsorción de azul de metileno en carbones activados.



(a) CAQ



(b) CAF

Figura 6. Ajuste del modelo Freundlich para la adsorción de azul de metileno en carbones activados.

Los datos experimentales se ajustaron a modelos de Langmuir y Freundlich. Para el carbón activado químicamente, el modelo de Freundlich proporcionó el mejor ajuste, indicando adsorción en una superficie heterogénea con múltiples sitios activos. Este comportamiento es típico de carbones químicamente activados con diversas estructuras de poros y grupos funcionales [5].

En contraste, el carbón activado físicamente mostró mejor concordancia con el modelo de Langmuir, lo que sugiere un comportamiento de adsorción de superficie y monocapa más homogéneo.

En general, estos resultados confirman que la mesoporosidad desempeña un papel fundamental en la adsorción de moléculas más grandes como el azul de metileno, y que la activación química es más eficaz en el desarrollo de dichas estructuras.

3.7 Análisis comparativo

Una comparación entre ambos materiales revela que el método de activación influye significativamente en las propiedades finales del carbón activado.

La activación química resultó en una mayor superficie de superficie, mayor volumen de poros y una capacidad de adsorción significativamente mayor. En cambio, la activación física produjo un material con menor rendimiento de adsorción pero con ventajas como la simplicidad operativa y la ausencia de reactivos químicos.

En comparación con otros precursores lignocelulósicos reportados en la literatura, la capacidad de adsorción obtenida en este estudio se encuentra dentro del rango típico, lo que confirma la competitividad de *Jacaranda mimosifolia* como precursor ^[5].

3.8 Relevancia medioambiental

Desde una perspectiva medioambiental, el uso de *Jacaranda mimosifolia* como precursor representa una estrategia sostenible para producir carbón activo. Esta biomasa está ampliamente disponible como residuo urbano, y su valoración contribuye a la reducción de residuos y a la recuperación de recursos.

Aunque la activación química proporciona un rendimiento de adsorción superior, la activación física ofrece ventajas importantes, incluyendo un menor impacto ambiental y un funcionamiento más sencillo. Por lo tanto, representa una alternativa viable para aplicaciones descentralizadas, especialmente en entornos rurales o con pocos recursos.

En este contexto, los resultados de este estudio demuestran no solo la viabilidad técnica de producir carbón activado a partir de biomasa de jacaranda, sino también su potencial como solución sostenible para aplicaciones de tratamiento de agua.

3. Conclusión

Se sintetizaron con éxito carbones activados a partir de frutos secos de *Jacaranda mimosifolia* utilizando métodos de activación tanto químicos (H_3PO_4 , $R=2$) como físicos (vapor). Los resultados demostraron que la vía de activación desempeña un papel decisivo en la determinación de las propiedades estructurales, químicas y de adsorción de los materiales resultantes.

La activación química produjo un carbono con una superficie significativamente mayor ($678 \text{ m}^2/\text{g}$), mayor volumen poroso y una estructura mesoporosa, lo que resultó en una capacidad de adsorción superior para azul de metileno ($\approx 227 \text{ mg/g}$). Este rendimiento se atribuye al efecto combinado del

desarrollo mejorado de los poros y la presencia de grupos funcionales oxigenados, que aumentan la disponibilidad de sitios activos y facilitan la transferencia de masa dentro de la red porosa.

En cambio, la activación física produjo un material con menor superficie ($311 \text{ m}^2/\text{g}$) y menor capacidad de adsorción ($\approx 10 \text{ mg/g}$), pero con un mayor contenido de carbono y microporosidad predominante, como lo demuestran los niveles de yodo superiores a 1200 mg/g . A pesar de su menor rendimiento para moléculas grandes, este material presenta una superficie más estable estructuralmente y menos modificada químicamente.

El comportamiento de adsorción confirmó aún más estas diferencias, con el carbón activado químicamente siguiendo un modelo de Freundlich, indicativo de una superficie heterogénea, mientras que el carbón activado físicamente se describió mejor mediante el modelo de Langmuir, sugiriendo un proceso de adsorción más homogéneo.

En general, los resultados confirman que *Jacaranda mimosifolia* es un precursor viable y sostenible para la producción de carbón activado. Aunque la activación química ofrece un rendimiento de adsorción superior, la activación física ofrece ventajas en términos de simplicidad operativa, ausencia de reactivos químicos y menor imCAFto ambiental.

Desde la perspectiva de la aplicación, el carbón activado químicamente es adecuado para la eliminación de contaminantes orgánicos como colorantes en sistemas acuosos, mientras que el carbón activado físicamente representa una alternativa prometedora para contextos descentralizados o con pocos recursos, especialmente cuando se requieren métodos de producción simples y respetuosos con el medio ambiente.

Referencias

- Marsh, H., & Rodríguez-Reinoso, F. (2007). *Carbón activado*. Elsevier Science Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044463-5.X5013-4>
- Díaz-Terán, J. (2001). Porosidad y propiedades de adsorción de un carbón activado. *Coloides y superficies A: Aspectos físico-químicos e ingenieriles*, 187-188(1-3), 167-175. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(01\)00622-7](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(01)00622-7)
- Hameed, B., Din, A., & Ahmad, A. (2007). Adsorción de azul de metileno sobre carbón activado a base de bambú: estudios de cinética y equilibrio. *Revista de Materiales Peligrosos*, 141(3), 819-825. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.07.049>
- Yahya, M. A., Al-Qodah, Z., & Ngah, C. W. Z. (2015). Materiales de residuos biológicos agrícolas como posibles precursores sostenibles utilizados para la producción de carbón activado: una revisión. *Revisiones sobre energías renovables y sostenibles*, 46, 218-235. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.051>
- Ioannidou, O., & Zabaniotou, A. (2007). Residuos agrícolas como precursores para la producción de carbón activo—Una revisión. *Revisiones de Energías Renovables y Sostenibles*, 11(9), 1966-2005. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.03.013>
- Román, S., Ledesma, B., Álvarez-Murillo, A., Al-Kassir, A., & Yusaf, T. (2017). Dependencia de la microporosidad de los carbones activados respecto a la composición lignocelulósica de los precursores. *Energías*, 10(4), 542. <https://doi.org/10.3390/en10040542>
- Treviño-Cordero, H., Juárez-Aguilar, L. G., Mendoza-Castillo, D. I., Hernández-Montoya, V., Bonilla-Petriciolet, A., & Montes-Morán, M. A. (2013). Síntesis y propiedades de adsorción de carbones activados a partir de biomasa de *Prunus domestica* y *Jacaranda mimosifolia* para la eliminación de metales pesados y tintes del agua. *Cultivos y productos industriales*, 42, 315-323. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.05.029>
- Liou, T.-H., Wang, P. Y., & Liou, Y. H. (2016). Un método eficaz para mejorar la capacidad de adsorción y la mesoporosidad del carbón activado mediante procedimientos previos a la pirólisis y activación química. *BioResources*, 11(3), 6110-6124. <https://doi.org/10.15376/biores.11.3.6110-6124>
- Prauchner, M. J., & Rodríguez-Reinoso, F. (2012). Activación química versus física de la cáscara de coco: un estudio comparativo. *Materiales microporosos y mesoporosos*, 152, 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2011.11.040>
- Yang, I., Jung, M., Kim, M.-S., Choi, D., & Jung, J. C. (2021). Mecanismos físicos y químicos de activación de materiales de carbono basados en el modelo de microdominio. *Revista de Química de Materiales A*, 9(15), 9815-9825. <https://doi.org/10.1039/D1TA00765C>
- Sevilla, M., & Fuertes, A. B. (2009). La producción de materiales de carbono mediante la carbonatación hidrotermal de la celulosa. *Carbono*, 47(9), 2281-2289. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.04.026>
- Lua, A. C., & Yang, T. (2004). Efecto de la temperatura de activación sobre las propiedades texturales y químicas del carbón activado de hidróxido de potasio preparado a partir de cáscara de pistacho. *Revista de Coloides y Ciencia de la Interfaz*, 274(2), 594-601. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2003.10.001>
- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodríguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. W. (2015). Fisisorción de gases, con especial referencia a la evaluación de la superficie y la distribución del tamaño de los poros (Informe Técnico de la IUCP). *Química pura y aplicada*, 87(9-10), 1051-1069. <https://doi.org/10.1515/CAF-2014-1117>

Sobre los autores

Arantza Zoé Hernández Gutiérrez

Contacto: arantza.hernandezgz@udlp.mx

Felipe Córdoba Lozano

Doctor en Química por la Universidad Joseph Fourier de Grenoble, Francia. Maestro en Ciencias en Ingeniería Química por la UDLAP y Licenciado en Química Industrial por la BUAP. Ha publicado 19 artículos internacionales y dirigido 21 tesis. Su investigación se centra en la síntesis y aplicación de nanomateriales para procesos de fotocatalisis y remediación ambiental. Ha colaborado con empresas como Janssen, Jumex, thyssenkrupp y Grupo IDESA en proyectos de análisis y caracterización de materiales.

Contacto: felipe.cordoba@udlap.mx

Deborah Xanat Flores Cervantes

Doctora en Ingeniería Civil y Ambiental por el Massachusetts Institute of Technology. Estudió la licenciatura en la Universidad Nacional Autónoma de México y la Universidad de las Américas Puebla en Ingeniería Química, con terminación en Ambiental. Posteriormente realizó su Maestría en Ing. Ambiental en el Massachusetts Institute of Technology, en los Estados Unidos con especialidad en Calidad del Agua. Profesora de tiempo completo del Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental de la Universidad de las Américas-Puebla desde el 2016.

Contacto: deborah.flores@udlap.mx