

Artículo original

## Carbón activado de residuos maderables de shihuahuaco (*Dipteryx micrantha*), y su aplicación en decoloración de aceite de castaña (*Bertholletia excelsa*)

[Making activated carbon from shihuahuaco (*Dipteryx micrantha*) wood chips, and its application in the clarification of brazil-nut oil (*Bertholletia excelsa*)]

Marilu Minaya Pereyra<sup>\*1</sup>, Pedro Wanger Cari Rodríguez<sup>1</sup>, Jorge Santiago Garate Quispe<sup>2</sup>,  
Liset Rodríguez Achata<sup>2</sup>

1. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC). Facultad de Ciencias Agrarias. Jr. San Martín 451, Puerto Maldonado, Madre de Dios, Perú. Correos electrónicos: marilu\_890312@hotmail.com (M. Minaya \* Autor para correspondencia), pedrocari@hotmail.com (P. W. Cari).
2. Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios (UNAMAD). Facultad de Ingeniería. Av. Jorge Chávez 1160, Puerto Maldonado, Madre de Dios, Perú. Correos electrónicos: liset.investigacion@gmail.com (L. Rodríguez), jgarate@unamad.edu.pe (J. S. Garate).

### Resumen

El carbón activado se caracteriza por ser un buen adsorbente, razón por la cual en esta investigación se obtuvo este producto mediante activación física (vapor de agua) utilizando residuos maderables de *Dipteryx micrantha* (shihuahuaco). Además se evaluó la aplicación en la decoloración del aceite de *Bertholletia excelsa* (castaña). Los resultados mostraron que el carbón activado en 45 minutos tiene una mayor área superficial (430,24 m<sup>2</sup>/g), capacidad de adsorción de 3333 mg de azul de metileno y una mayor cantidad de sitios activos disponibles. Los valores de pH oscilaron entre 9,85-9,30 lo que evidencia la naturaleza básica y la relación con los grupos funcionales del carbón, con presencia de enlaces OH del grupo alcohol y grupos aromáticos. En activación de 45 minutos se encontró un mayor número de microporos. Considerando estas características óptimas se utilizó este carbón activado para la decoloración del aceite de castaña. El proceso de adsorción de las moléculas contenidas en el aceite de castaña, responsables de su color, sobre la superficie activa de los carbones activados tarda aproximadamente 20 minutos en decolorar 14,13% del aceite de castaña. Los resultados sugieren que el carbón activado obtenido de residuos maderables de shihuahuaco presentan importantes propiedades texturales y adsorbentes.

**Palabras clave:** Activación física, Adsorción, Grupos funcionales, Materiales lignocelulósicos, Microporos.

### Abstract

Activated carbon is characterized as a good adsorbent, for this reason, this investigation obtained the product via physical activation (water vapor) using residual wood chips of (*Dipteryx micrantha*) shihuahuaco. We then evaluated the application of the activated carbon in the process of refining vegetable oil extracted from the brazil nut (*Bertholletia excelsa*). The results show that the carbon activated for 45 minutes has the greatest surface area of (430,24 m<sup>2</sup>/g), capable of adsorbing 3333 mg of methyl blue as well as having a greater quantity of activated sites available. The PH values oscillate between 9,85-9,30 which indicated a basic nature and its relations with the functional groups of carbon, with presence of links OH from alcohol group and aromatic groups. With 45-minute activation we found a greater number of micropores. Considering these optimal characteristics, the activated carbon was used to refine and discolor the brazil nut oil. The process of adsorption of molecules contained in the brazil nut oil responsible for the color can take approximately 20 minutes to clarify 14,13 % of brazil nut oil. The results suggest that activated carbon obtained from wood chips of shihuahuaco can provide material with important textural and adsorbent properties.

**Keywords:** Adsorption, Functional Groups, Lignocellulosic Materials, Micropores, Physical activation.

## INTRODUCCIÓN

El carbón activado (CA) es un adsorbente muy versátil, es ampliamente utilizado en procesos de adsorción debido a su estructura y distribución de sus poros (Hernández-Monje *et al.*, 2019). Además, la estructura carbonosa puede ser controlados para diversos usos actuales y futuros mediante una presentación adecuada, ya sea granular o en polvo (Coronado *et al.*, 2016). El área superficial del carbón activado varía dependiendo de la materia prima y del proceso de activación (Nevskaia *et al.*, 2004). La elección del precursor para la elaboración de carbón es fundamental y está en función de su disponibilidad, precio y pureza. Sin embargo, el proceso de fabricación del carbón activado y su posible aplicación también deben ser considerados. Los materiales lignocelulósicos han sido utilizados ampliamente para la elaboración de carbón activado ya que presentan una adecuada capacidad de adsorción (Pinzón y Cardona *et al.*, 2008). Por lo cual es muy importante contribuir con la generación de información sobre el carbón activado de materiales lignocelulósicos.

En el Perú, el carbón activado se ha aplicado en la adsorción de metales pesados, como el plomo, cromo y cadmio (Lavado *et al.*, 2010; Lavado *et al.*, 2012; Sun-Kou *et al.*, 2014; de la Torre *et al.*, 2017), compuesto fenólicos (Aylas *et al.*, 2016); además de la recuperación del oro, mediante el proceso de cianuración (Coronado *et al.*, 2016). Diferentes especies vegetales se han utilizado como precursores, residuos de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) (Lavado *et al.*, 2010) o marlo de maíz (*Zea mays*) (Oré-Jiménez *et al.*, 2015; Cruz-Cerro *et al.*, 2016). En la Amazonía peruana se han obtenido carbones activados a partir de semillas de shapaja (*Attalea phalerata*), ciruelo (*Spondia purpurea*), aguaje (*Mauritia flexuosa*), de acuerdo a varias publicaciones (Coronado *et al.*, 2016; Cruz-Cerro *et al.*, 2016; Sun-Kou *et al.*, 2014; Aylas *et al.*, 2016). Sin embargo, son escasos los estudios en la obtención de carbón activado de residuos de la industria forestal maderable (aserrín o virutas). El carbón activado es un producto de gran demanda en el

Perú, demostrado por la cantidad y valor importado: entre los años 2003 y 2007, la industria nacional importó más de 5540 t, que significó un valor cercano a 9 millones de dólares y con una tendencia de crecimiento anual de importación del 41% (Zamora, 2010). La producción nacional de carbón activado es muy pequeña, y no supera los 500 kg al año (de la Fuente *et al.*, 2018).

Por otro lado, debido a la elevada presión en la extracción de especies tradicionales en la Amazonía peruana, como cedro (*Cedrela odorata*) y caoba (*Swietenia macrophylla*), en la última década debido a la protección de estas especies, el mercado ha diversificado la explotación de especies maderables de alta densidad, no aprovechadas de forma intensiva previamente, como *Dipteryx micrantha* y *Tabebuia spp.* (Putzel *et al.*, 2011). *Dipteryx micrantha*, conocido como shihuahuaco en el Perú, se ha convertido desde la pasada década en un elemento clave en la industria local, incrementó en exportaciones al mercado asiático y además representa casi la mitad de las exportaciones de madera en el Perú (Killick, 2020; Putzel *et al.*, 2011).

En la región Madre de Dios, se estima que la actividad forestal generaría en promedio 24 000 a 65 000 m<sup>3</sup>/año de residuos maderables de *Dipteryx micrantha* como parte de su proceso de transformación de la madera. Datos estimados a partir de la producción aserrada por departamento 2012-2016 (SERFOR, 2018) y porcentajes de generación de residuos maderables en la industria forestal reportados para shihuahuaco en Madre de Dios (Miche, 2006; Zapana, 2018). Estos productos secundarios en la mayoría de los casos son eliminados, sin darle un valor agregado. Considerando que el carbón activado es un material muy versátil de muchas aplicaciones, en el presente estudio se ha producido carbón activado en polvo con vapor de agua a partir de residuos de la industria forestal maderable. El carbón activado obtenido se aplicó en la decoloración de aceite de *Bertholletia excelsa* (castaña), un producto de importancia económica de la región Madre de Dios, con la finalidad de mejorar sus propiedades físicas como

color, olor, etcétera; y dar un aporte extra a la agroindustria para el proceso de refinación de este aceite vegetal. La semilla de la castaña es comestible, se consume cruda, tostada, salada y en la preparación de dulces y productos de confitería, es altamente calórica debido a la alta concentración de lípidos y proteína, aunque sea deficiente en lisina, isoleucina y treonina, mediante un filtrado posterior se puede obtener el aceite extra virgen (Limachi *et al.*, 2009). En el aceite de castaña se ha reportado la presencia de 8 ácidos grasos, entre los que destacan ácido oleico (37,7%), ácido linoleico (27,8-32,6%) y ácido palmítico (17,5-18,7%) y ácido esteárico (8,3-11,5%) da Conceição *et al.* (2019).

Por todo lo expuesto, el presente trabajo tuvo como objetivo producir carbón activado físicamente con vapor de agua obtenido a partir de residuos maderables de *Dipteryx micrantha* y comprobar su aplicación en la decoloración del aceite de *Bertholletia excelsa*.

## MATERIALES Y MÉTODO

La obtención del carbón activado a partir de la madera de *Dipteryx micrantha* tuvo las siguientes condiciones de activación: temperatura (800 °C), tiempo (15, 30 y 45 minutos), activación física con vapor de agua; teniendo como variables de respuesta el área superficial, capacidad de adsorción y porcentaje de decoloración del aceite de *Bertholletia excelsa*.

### Muestras biológicas

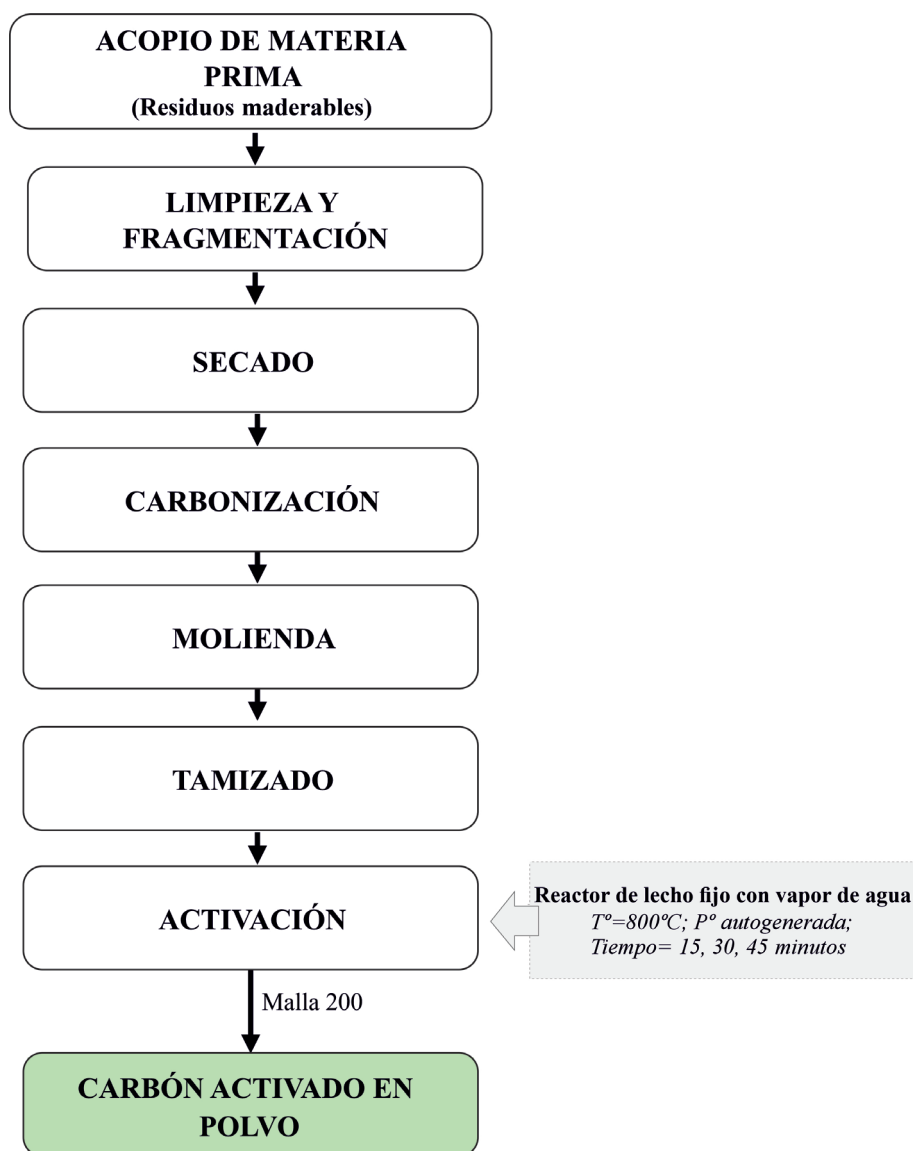
Se utilizó 1000 g de residuos (astillas) de madera sin corteza de *Dipteryx micrantha* que se colectó en el aserradero Turbina S.A.C. (12°35'53,00"S y 69°13'11,54"O), ubicado en la provincia de Tambopata, región Madre de Dios -Perú-. El muestreo del precursor se realizó por cuarteo de acuerdo a las normas ASTM (American Society for Testing and Materials).

### Procedimiento de obtención de carbón activado

Todo el proceso de preparación de la materia prima, carbonización, activación y la determinación de algunos parámetros como la del índice de azul de metileno, densidad aparente, densidad real, ceniza y materia volátil; y pruebas de decoloración del aceite de *Bertholletia excelsa* se realizó en el Laboratorio Ambiental de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios (UNAMAD) y se detalla en la Figura 1.

El proceso de obtención de carbón activado se inició con la limpieza y fragmentación de astillas de shihuahuaco, secado en una estufa a 105°C, luego se procedió a la carbonización a 500°C por 15 minutos, para su posterior trituration en un mortero de porcelana y tamización en un tamiz de malla N°200; se tomaron 500 g del carbón vegetal obtenido y se colocaron en el reactor de lecho fijo para el inicio de la activación, se verificó que el tanque de agua se encuentre en el nivel, la bomba peristáltica tenga un flujo de agua de 1 segundo por gota y el controlador de temperatura a 800 °C y los tiempos de activación fueron de 15, 30 y 45 minutos, para comparar cual es el tiempo óptimo de activación. La activación del carbón se inició al llegar a la temperatura indicada en el diseño mostrado en la Figura 1, durante el tiempo correspondiente se suministró vapor de agua, una vez que terminó el tiempo de activación se retiró el suministro de vapor de agua, el carbón activado obtenido en cada corrida, se secó en una estufa durante 4 horas a 105 °C.

La caracterización de las propiedades fisicoquímicas, morfológicas, mecánicas y térmicas se realizaron de acuerdo a pruebas estandarizadas según las normas internacionales ASTM. Las muestras fueron limpiadas y fragmentadas previas al secado en una estufa a 100 °C durante 24 horas.



**Figura 1.** Diagrama de flujo utilizando en el presente estudio para la obtención del carbón activado utilizando residuos maderables de shihuahuaco (*Dipteryx micrantha*).

#### *Determinación del rendimiento del carbón activado*

Se determinó la humedad de 500 g de precursor por diferencia de pesos. Luego se realizó la carbonización a 500 °C, seguido de la molienda y tamización con malla N°200, y finalmente la activación a 800 °C. El rendimiento se determinó utilizando esta ecuación:  $Y_c = (M_c/M_w) \cdot 100$ . Donde:  $Y_c$  = rendimiento de carbón activado en base seca;  $M_c$  = masa de carbón activado obtenido y  $M_w$  = masa del precursor.

#### *Determinación del pH del carbón activado*

Se adicionó 2,22 g de carbón en 100 ml de agua destilada, se hizo hervir la suspensión durante 2 minutos, se filtró por gravedad en papel de poro medio (Watman N° 2), se enfrió la solución a temperatura ambiente. Y finalmente se procedió a la medición del pH, de acuerdo a la norma ASTM D3838-05 (ASTM, 2017a).

*Determinación de humedad*

Se determinó la humedad de muestras de 1 g de carbón vegetal por medio de la Norma ASTM D2867-17 (ASTM, 2017b). La cual se expresa por diferencias de masas, hasta que la cantidad de masa se estableció. El porcentaje de humedad se calculó con la fórmula: Porcentaje de humedad =  $((P_i - P_f)/P_i) * 100$ . Donde:  $P_i$  = peso inicial en gramos y  $P_f$  = peso final en gramos.

*Determinación del porcentaje de cenizas*

Se preparó una muestra de  $1 \pm 0,1$  g con tamaño de grano menor a 0,2 mm siguiendo la norma ASTM D2866-11 (ASTM, 2018). Luego se calentó las muestras hasta  $815 \pm 10$  °C y por al menos 1 hora. El porcentaje de cenizas se calculó utilizando esta ecuación: Porcentaje de cenizas =  $((W_1 - W_2)/W) * 100$ . Donde:  $W_1$  = peso del crisol con muestra calcinada; y  $W_2$  = peso del crisol vacío;  $W$  = peso de la muestra.

*Determinación del porcentaje de materia volátil*

Se pesó muestras de  $1 \pm 0,1$  g y tamaño de grano menor a 0,2 mm. Luego se introdujo las muestras a un horno precalentado a 900 °C, durante 7 minutos y se dejó enfriar por 3 minutos, finalmente se volvió a pesar, y se calculó el porcentaje de material volátil (% pérdida de peso) utilizando la norma ASTM D5832-98, (ASTM, 2014a) de acuerdo a la siguiente ecuación: Porcentaje de pérdida de peso =  $(m^2 - m^3) * 100 / (m^2 - m^1)$ . Donde:  $m^1$  = peso del crisol;  $m^2$  = peso del crisol + muestra;  $m^3$  = peso del crisol + muestra después de calentar.

*Determinación de la densidad aparente.*

Se calculó la densidad aparente a 10 g del carbón activado. Se traspasó con cuidado una tercera parte de la muestra pesada a una probeta graduada de 10 ml, se apisonó con una almohadilla de caucho. Se comprimió por 5 min y por períodos de 2 min hasta que ya no hubo más asentamiento, siguiendo la norma ASTM D2854-09 (ASTM, 2014b).

*Determinación de la densidad real*

La muestra de carbón activado se pesó en una fiola, luego se agregó agua hasta cubrir la muestra y se calentó lentamente en baño maría con agitación, durante 15 minutos. Se aforó para pesarlo nuevamente.

*Determinación de la capacidad de adsorción por Espectrofotometría UV/VIS*

Para determinar la capacidad de adsorción del carbón activado obtenido, se prepararon diluciones de azul de metileno de 1,0, 2,5, 5,0, 8,5, 10,0, 12,5, 15,0 ppm a partir de la solución patrón de 100 ppm de concentración, se dio lectura en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 665 nm, las absorbancias de las soluciones de azul de metileno en el espectrofotómetro DR5000. Se añadió 0,03 g de carbón activado a cada una de las soluciones de azul de metileno (cada tubo de ensayo se cubrió con tapón de goma para su respectiva agitación), se colocaron los tubos de ensayo en la gradilla y finalmente se pusieron sobre el agitador magnético durante 5 minutos, después de este tiempo se filtró y se dio lectura de la absorbancia final en el espectrofotómetro marca HACH modelo DR5000. El análisis se realizó en el Laboratorio Ambiental de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.

*Medición del tamaño de partículas y estado de cristalización por microscopía electrónica de barrido*

Para analizar la morfología de los carbones activados (fotomicrografías) con mayor nitidez se utilizó un microscopio electrónico de barrido Philips SEM XL 20 y el Metalizador de Muestras Denton Vacuum Desk II. El análisis se realizó en el Centro de Microscopia Electrónica de la Facultad de Ingeniería de Procesos de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

*Determinación de grupos funcionales por espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier FT-IR*

La determinación de las bandas de absorción



para la determinación de los grupos funcionales orgánicos se realizó en el Espectroscopio Infrarrojo de marca Thermo electron corporation Modelo Nicolet 380, esta determinación se llevó a cabo en el laboratorio de Química Orgánica de la Carrera profesional de Química de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

### ***Aplicación del carbón activado obtenido en la decoloración de aceite de castaña (*Bertholletia excelsa*)***

Primero se realizó una curva espectral del aceite de castaña en el espectrofotómetro UV/VIS marca HACH y modelo DR 5000, para encontrar la longitud de onda adecuada para realizar las pruebas de decoloración. Se determinó la concentración óptima de porcentaje peso-peso del carbón activado (activación en 45 minutos) con el aceite de castaña obtenido por prensado. Se puso en contacto el carbón activado de shihuahuaco con la concentración óptima encontrada con el aceite vegetal de castaña en tiempos de 0, 5, 10, 15, 20 y 25 minutos. Para comparar el rendimiento en decoloración del carbón activado obtenido se realizó el mismo procedimiento con el carbón activado comercial (CLARIMEX).

## **RESULTADOS**

### ***Producción y rendimiento en la producción del carbón activado***

A partir de 500 g de residuos de madera de *D. micrantha*, en el tiempo de activación de 15 minutos se obtuvo una mayor cantidad de carbón activado ( $350,9 \pm 2,59$  g), mientras que la menor cantidad se encontró con una activación del carbón de 45 minutos ( $291 \pm 0,35$  g). Por lo tanto, el rendimiento de carbón activado en 15 minutos varió entre 69,9% a 71,1%. El carbón activado en 30 minutos varió entre 62,2% a 62,4%. Mientras que, el carbón activado en 45 minutos varió entre 58,1% a 58,3%.

### ***Caracterización de carbón activado obtenido de residuos maderables de shihuahuaco (*Dipteryx micrantha*)***

El carbón activado en 15 minutos presentó los valores de pH más altos ( $9,85 \pm 0,006$ ). Mientras que el carbón activado en 45 minutos presentó los valores más bajos de pH ( $9,30 \pm 0,006$ ), (Tabla 1). Con el carbón activado en 15 minutos se encontró un mayor contenido de humedad (9,65%), y el más bajo fue en el carbón activado en 30 minutos (6,51%), (Tabla 1). Sin embargo, el porcentaje de ceniza fue inferior en el carbón activado en 15 minutos (2,67%), en comparación con el carbón activado en 45 minutos (6,59%). El mayor porcentaje de material volátil se obtuvo en el carbón activado de 45 minutos (9,14%), y el menor porcentaje se encontró en el carbón activado de 15 minutos (8,76%). Por otro lado, el carbón activado en 45 minutos tuvo la mayor densidad aparente ( $0,54 \text{ gr/cm}^3$ ) y la menor densidad la obtuvo el carbón activado en 15 minutos ( $0,34 \text{ gr/cm}^3$ ); similar patrón fue encontrado en la densidad real (Tabla 1).

### ***Análisis de los carbones activados mediante microscopía electrónica de barrido***

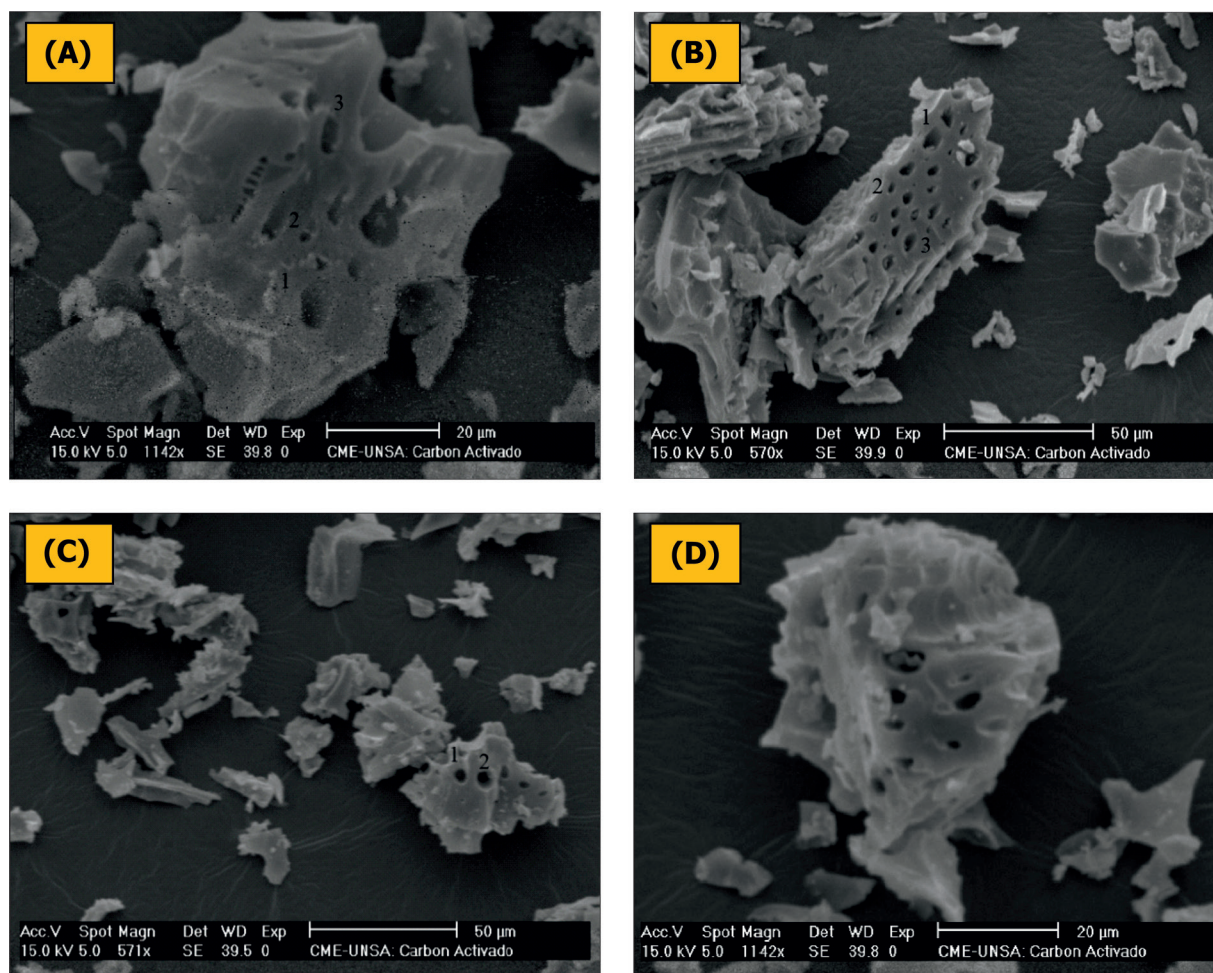
Para este análisis se utilizó el carbón activado durante 45 minutos debido a que presentan una mayor área superficial. Estas partículas de carbón activado son de forma muy variada; corresponden a poliedros irregulares con superficies rugosas, lisas con formación de microporos (ver Figura 3), los resultados de las dimensiones y área se detallan en la Tabla 2.

### ***Espectroscopia infrarroja del carbón activado***

En la Figura 3 se muestran las imágenes de las bandas de los espectros para las asignaciones de los grupos funcionales presentes en los carbones activados en diferentes tiempos. Esta técnica provee información cualitativa sobre todo de los grupos funcionales presentes en los carbones activados y se basa en los mismos principios del análisis funcional tradicional de la química orgánica. Así, a cada grupo se le asigna una o varias bandas características.

**Tabla 1.** Principales parámetros con los que se especifica a los carbones activados a partir de madera de *Dipteryx micrantha*. BET = Método Brunauer–Emmett–Teller para calcular el área superficial.

Parámetro	Unidades	Tiempo de activación			Carbón activado comercial CLARIMEX
		15 minutos	30 minutos	45 minutos	
Densidad aparente	g/cm <sup>3</sup>	0,34	0,50	0,54	0,38
Densidad real	g/cm <sup>3</sup>	1,18	1,52	1,57	---
Volumen total de poro	cm <sup>3</sup> /g	0,51	0,66	0,68	0,93
Humedad	%	9,85	7,77	6,51	5,00
Ceniza	%	2,76	6,24	6,59	---
Material volátil	%	8,76	8,79	9,14	---
pH del extracto acuoso		9,85	9,50	9,30	5 - 6
Capacidad máxima de adsorción	mg/g	2998	3152	3333	---
Área superficial BET	m <sup>2</sup> /g	408,56	422,41	430,24	600

**Figura 2.** Fotomicrografías de la estructura externa del carbón activado obtenido a partir de residuos de madera de *Dipteryx micrantha* durante un periodo de 45 minutos, en donde se realiza la medición y las características microscópicas de cada poro en cada unidad muestral. Las letras A, B, C y D corresponden a la codificación de la Tabla 2.

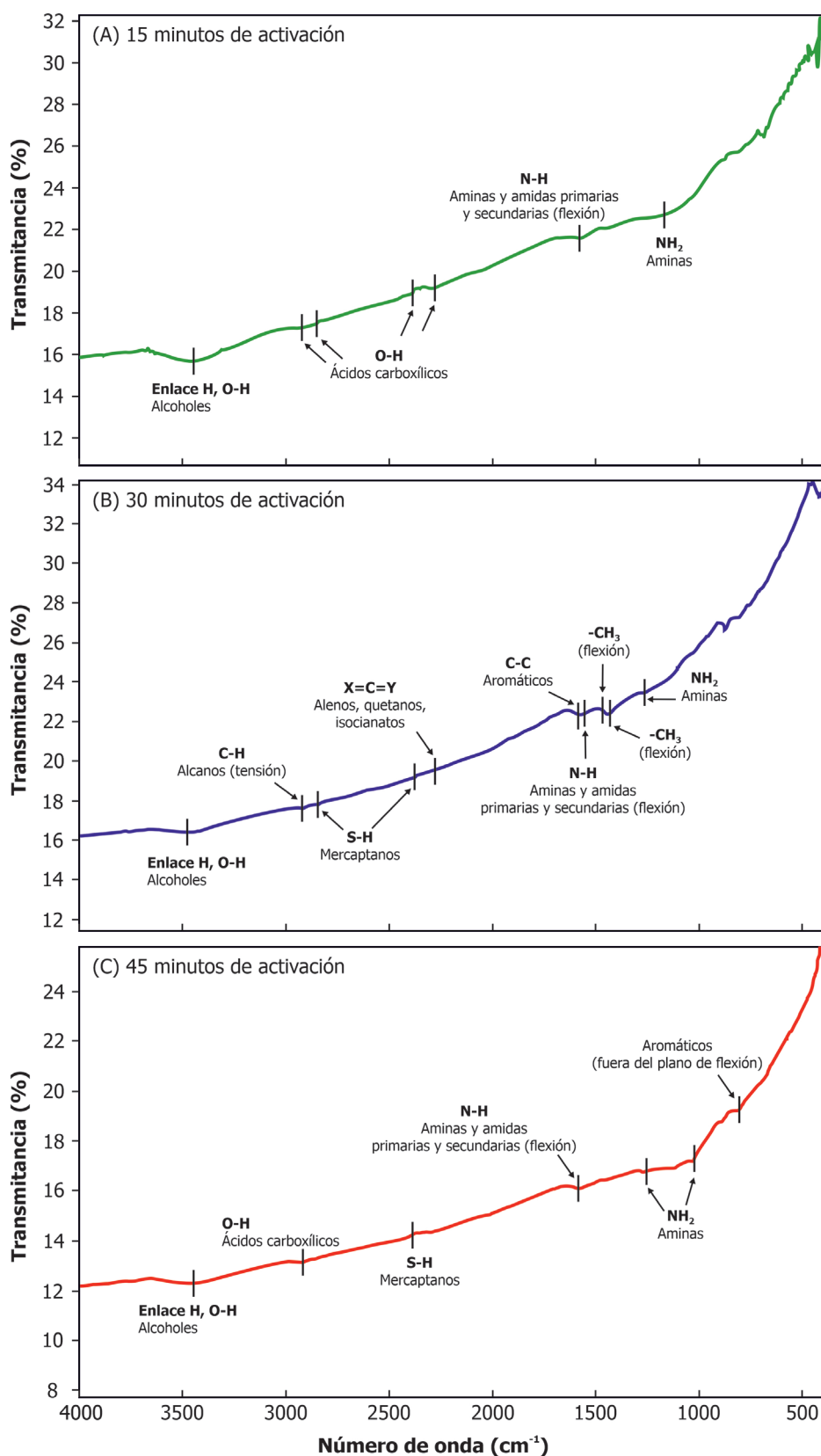
**Tabla 2.** Dimensiones de los microporos (< 2 nm) del carbón activado obtenido a partir de residuos maderables de shihuahuaco (*Dipteryx micrantha*).

Identificación	Dimensiones (μm)	Área (μm <sup>2</sup> )
Muestra A		
Punto 1	7,26 x 4,65	32,70
Punto 2	3,72 x 1,71	7,70
Punto 3	7,11 x 3,74	22,15
Muestra B		
Punto 1	7,86 x 5,96	41,59
Punto 2	2,08 x 1,33	3,03
Punto 3	6,03 x 3,74	18,56
Muestra C		
Punto 1	4,84 x 4,45	17,27
Punto 2	6 x 5,43	32,32
Muestra D		
Punto 1	4,99 x 2,11	10,69
Muestra E		
Punto 1	4,91 x 2,91	14,97
Muestra F		
Punto 1	7,95 x 5,59	44,55
Punto 2	10,4 x 7,07	70,5
Muestra G		
Punto 1	15,99 x 6,49	83,79

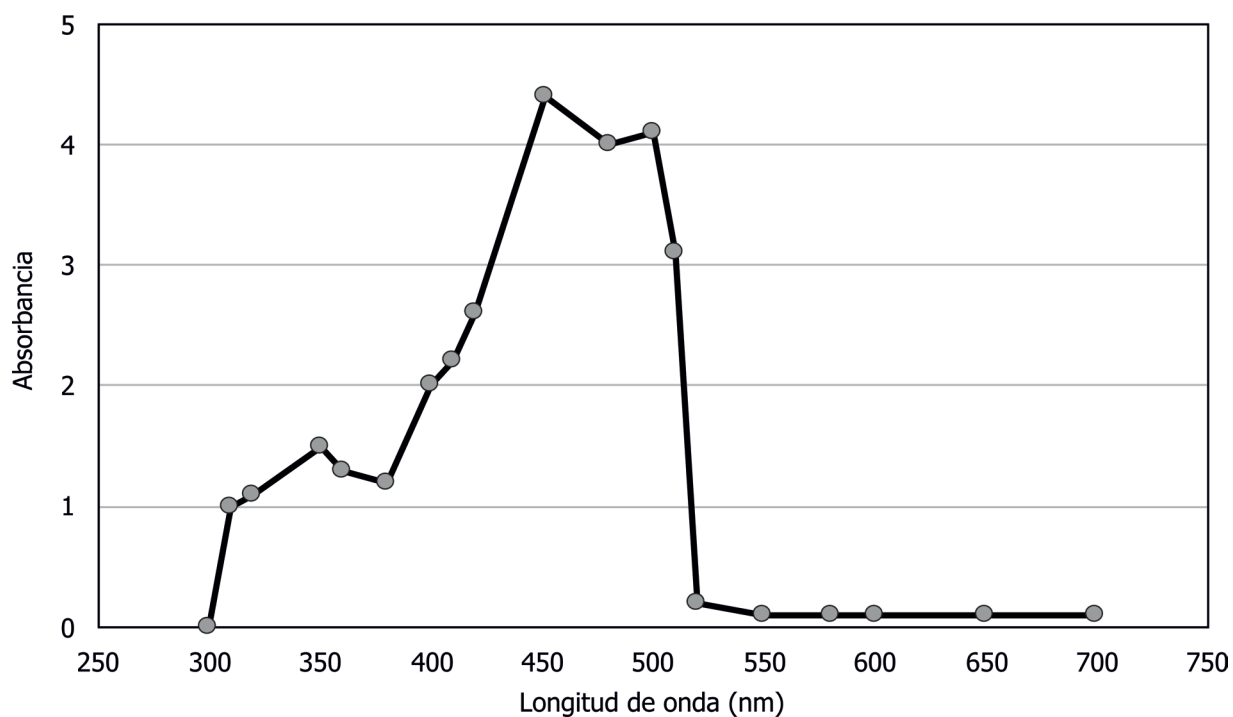
**Tabla 3.** Resultados de la comparación del porcentaje de decoloración entre el carbón activado obtenido de shihuahuaco (*Dipteryx micrantha*) y una carbón activado comercial (CLARIMEX).

Parámetro	Carbón activado obtenido a partir de residuos de madera de <i>Dipteryx micrantha</i>		CLARIMEX	
	Absorbancia	Decoloración (%)	Absorbancia	Decoloración (%)
0	4,399	0	4,398	0
5	3,297	5,51	4,394	21,12
10	3,101	9,82	4,215	24,56
15	2,997	11,97	4,209	32,45
20	2,884	14,13	4,198	39,52
25	2,884	14,13	4,198	44,32

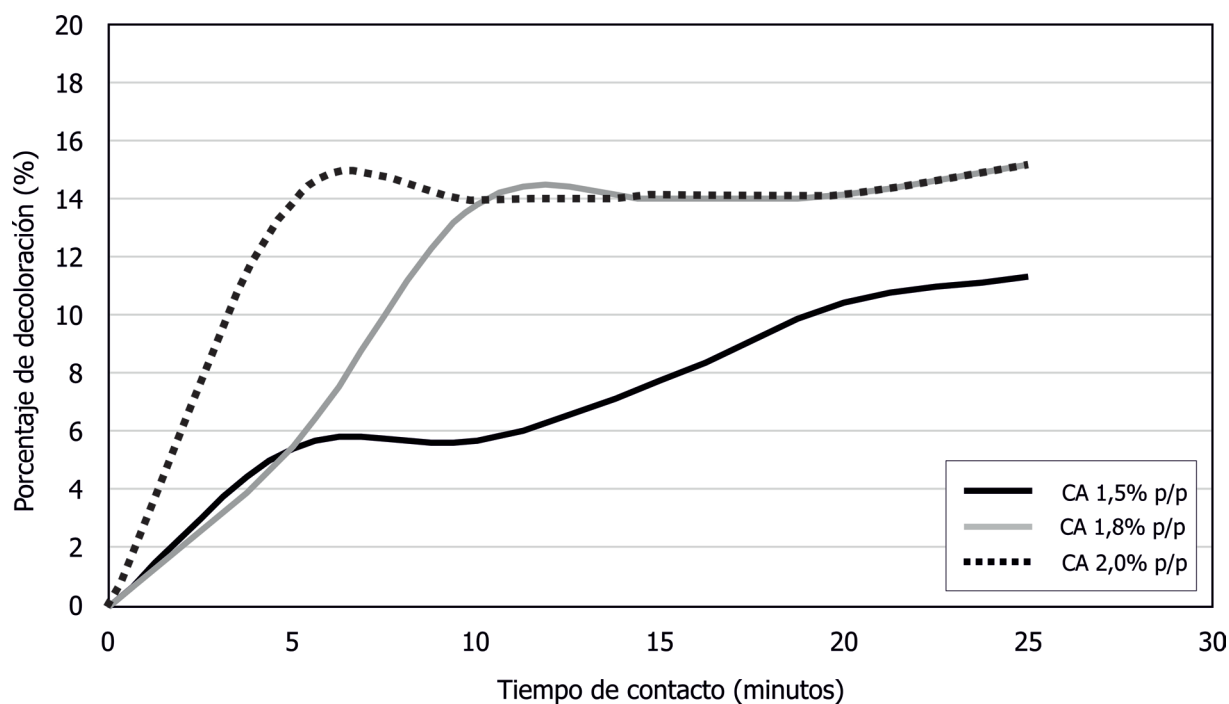




**Figura 3.** Difractograma de espectroscopía infrarroja para el carbón activado a partir de madera de shihuahuaco (*Dipteryx micrantha*) por un periodo de 15 (A), 30 (B) y 45 minutos (C).



**Figura 4.** Curva espectral del aceite de castaña (*Bertholletia excelsa*) virgen.



**Figura 5.** Porcentaje de decoloración de aceite de castaña (*Bertholletia excelsa*) en función a la concentración óptima del carbón activado obtenido de residuos maderables de shihuahuaco (*Dipteryx micrantha*).

### *Concentración óptima de carbón activado para la decoloración del aceite vegetal*

La longitud de onda adecuada para realizar las pruebas de decoloración, fue de una absorbancia de 4,401 se obtuvo el pico más alto de 451 nm (Figura 4).

### *Decoloración en función a la concentración óptima del carbón activado*

Las concentraciones de 1,8% peso-peso y 2,0% peso-peso presentan mejores porcentajes de decoloración a 20 y 25 minutos de contacto (Figura 5).

### *Aplicación en decoloración del aceite vegetal de castaña*

En el tiempo de 20 minutos se obtuvo el mayor porcentaje de decoloración (14,13%), ver Tabla 3. Por otro lado, el carbón activado de *D. micrantha* obtenido en el presente estudio en 20 minutos de decoloró un 25% menos que el carbón activado comercial (CLARIMEX), ver Tabla 3.

## DISCUSIÓN

Los valores de pH del carbón activado oscilan entre 9,85 y 9,30 lo que evidencia la naturaleza básica y la relación con los grupos funcionales presentes en el carbón, con presencia de electrones  $\pi$  deslocalizados en la superficie del carbón activado y de enlaces O-H. Los valores de pH obtenidos en el presente estudio son superiores a los propuestos como óptimos (pH entre 7 y 8) por la norma ASTM D3838-05 (ASTM, 2017a) y los obtenidos de otros residuos vegetales, cascara de plátano, mandarina y pomelo (pH 6,6-7,8) de acuerdo a lo reportado por Nowicki *et al.* (2016). Para algunas aplicaciones específicas puede ser necesario que el carbón activado cambie el pH del producto sobre el cual actúa: por ejemplo, el carbón utilizado en el tratamiento de algunos aceites industriales, tiene como una de sus funciones clarificar el aceite y bajar el pH.

La mayor área superficial promedio encontrada en el carbón activado durante 45 minutos (430,24 m<sup>2</sup>/g) nos indica el desarrollo de la porosidad en los carbones activados (Tabla 1), estos valores son indicativos importantes porque dan a conocer la distribución de poros, esto quiere decir que, a mayor área superficial, existirá mayor cantidad de sitios activos disponibles. Por otro lado, un mayor desarrollo en área superficial estuvo directamente relacionado con el porcentaje de material volátil que presentaron, similares resultados fueron encontrados por Ramirez *et al.* (2017) en carbón activado generado por biomasa residual de la palma aceitera. Una mayor cantidad de material volátil y área superficial promedio se encontró en el carbón activado en 45 minutos, lo cual le confiere una mayor capacidad de adsorción (Tabla 1) y asimismo podría generar una mayor densidad de poros durante el proceso de activación (Ramirez *et al.*, 2017).

La densidad real representa la densidad del carbón activado, sin considerar el volumen entre partículas, ni su porosidad interna. Aumenta con el tiempo de activación, como se observa en Tabla 2. En el caso de la densidad aparente cuanto menor es, los carbones activos presentan poros de mayor tamaño, o bien mayor número de poros. Los poros de gran tamaño presentan proporcionalmente menos área que los poros pequeños. En la Tabla 2 se observa que presentan mayor densidad aparente el carbón activado en el periodo de 45 minutos, que confirma la microporosidad de este, con los resultados de las fotomicrografías. Los valores de densidad del carbón activado obtenido son superiores a los reportados, a partir de madera, por Lazo-Camposano (2015) y la norma ASTM D2854-09 (ASTM, 2014b), de 0,35 g/cm<sup>3</sup> y 0,49 g/cm<sup>3</sup>.

La cantidad y composición del porcentaje de ceniza puede influir en la adsorción y en ciertas propiedades del carbón activado. Los porcentajes de cenizas en el presente estudio (< 7%) fueron inferiores a los reportados por Ospina-Guarín *et al.* (2014), quienes encontraron valores de porcentaje de cenizas superiores al 20% en carbón activado físicamente. El porcen-

taje de ceniza obtenido en los carbones activados en diferentes periodos de activación fue bajo por lo que no afectaron la clarificación del aceite de castaña. Sin embargo, los porcentajes de ceniza encontrados en el presente estudio es superior al nivel de calidad (3% máximo) establecido por la norma ASTM D2867-09 (ASTM, 2014c) para carbón activado en polvo.

La determinación de humedad tiene un rango de valor típico de 2 a 15% (Bansal *et al.*, 1998), los carbones activados obtenidos se encuentran dentro de este rango. Parámetro importante para su conservación y para su calidad, en la Tabla 2 se observa que el carbón activado en el periodo de 15 minutos presenta 9,65% de humedad siendo este valor el más alto, este parámetro disminuye a medida que aumenta el tiempo de activación, para 45 minutos disminuyó a 6,51%. Similares resultados de humedad (6,9 a 9,3) en carbón activado obtenido a partir de residuos vegetales (cascara de naranja, café y bagazo de caña de azúcar) fueron encontrados por Solís-Fuente *et al.* (2012). Sin embargo, los porcentajes de humedad encontrados en el presente estudio es superior al nivel de calidad (3% máximo) establecido por la norma ASTM D2866-94 (ASTM, 2004).

Según la Tabla 2, donde se presentan los valores del carbón activado comercial CLARIMEX, se observó que este tiene mayor área superficial (600 m<sup>2</sup>/g), baja densidad y pH ácido en comparación al carbón obtenido de madera de *Dipteryx micrantha*; que presenta propiedades fisicoquímicas diferentes, que serán determinantes en los resultados de decoloración. Varios estudios demostraron que los carbones activados con las mayores áreas superficiales son los más aptos para la adsorción de moléculas pequeñas, y aquellos con áreas superficiales menores resultaron ser los más idóneos en la adsorción de moléculas grandes, como los colorantes (Stoeckli y Kraehenbuehl, 1981; Hernández-Monje *et al.*, 2019). Lo cual es importante debido a que los sistemas comerciales en la actualidad aplican el carbón activado como absorbente de colorantes por su elevada área superficial y volumen de poro (Gonçalves *et al.*, 2013).

El azul de metileno es una molécula de tipo básica de tamaño considerable. Su adsorción da indicios del contenido de macroporos del carbón activado. Se puede suponer un ligero predominio de los grupos ácido en la superficie del carbón basado en los valores obtenidos para el pH. Según Aguilar (2003) cuando el azul de metileno se ioniza en medio acuoso, queda cargado positivamente, cualquier interacción con grupos acídicos negativos en la superficie del carbón es de carácter atractivo y la cantidad de pigmento adsorbido en la primera monocapa puede considerarse como una función de la disponibilidad superficial o de la distribución de tamaños de poros únicamente, en ausencia de otros factores. En la Tabla 1 se observa que los valores obtenidos para la adsorción de azul de metileno siguen la misma tendencia que la observada para el área superficial específica; así mismo los valores más elevados para la porosidad están asociados con los mayores valores de adsorción de azul de metileno.

La caracterización morfológica del carbón activado a partir de madera de *Dipteryx micrantha* en un periodo de 45 minutos, muestra partículas de formas irregulares con vértices agudos, inclusive existe partículas alargadas tipo soga; existen también aglomeración de partículas; del mapeo global a la muestra esta contiene mayor cantidad de partículas con microporosidad (Figura 2). La superficie de las partículas es de condición lisa con formación de canales (Figura 2).

En la Figura 3 se muestran las bandas de los espectros para las asignaciones de los grupos funcionales presentes en los carbones activados en diferentes tiempos, en el tiempo de activación de 15 minutos se observa la aparición de picos que corresponden a grupos funcionales de Alcoholes O-H, enlace H, Ácidos carboxílicos COOH, Aminas y amidas primarias y secundaria (flexión) N-H, Aminas, NH<sub>2</sub>; en 30 minutos de activación se incrementaron grupos funcionales como Alcanos (tensión) C-H, Alenos, quetanos, isocianatos, isotiocianatos X=C=Y, Aromáticos C=C; y para el tiempo óptimo de activación según la prueba de capacidad de adsorción que fue de 45 minutos quedan presentes los grupos



funcionales: Alcoholes O-H, enlace H, Ácidos carboxílicos COOH, Aminas y amidas primarias y secundaria (flexión), N-H, Aminas NH<sub>2</sub>, Aromáticos (fuera del plano de flexión). Los grupos funcionales encontrados en el presente estudio son característicos de carbones activados (Moreno-Castilla, 2004).

En los espectros del difractograma de espectroscopia infrarroja (FTIR) del carbón activado obtenido a partir de madera shihuahuaco en el periodo de 15 minutos se confirma mayor presencia del grupo funcional por la banda 3436 cm<sup>-1</sup> correspondiente al grupo oxidrilo OH de los ácidos carboxílicos. Los espectros FTIR del carbón activado obtenido a partir de madera shihuahuaco en el periodo de 30 minutos y 45 minutos presentan bandas semejantes, esto quiere decir que en los tres periodos de activación no se presentaron cambios en los grupos funcionales de la superficie que caracteriza a este carbón activado. Sin embargo, los valores característicos de número de datos de los grupos funcionales de los carbones activados, pueden ser diferentes a los valores correspondientes que presentan estos grupos aislados en moléculas. Esto se debe a la superposición de señales al efecto de matriz que se presenta en la superficie de estos materiales por la absorción de la radiación (Silverstein *et al.*, 1981).

Por otro lado, los carbones activados con mayor contenido en oxígeno, y consecuentemente con un pH ácido, son aquellos que presentan bandas de adsorción en el IR más intensas. Se puede decir entonces, que la acidez de los carbones se relaciona con grupos funcionales oxigenados, preferentemente estructuras tipo carboxilo, éteres, fenoles e hidroxilos. La ausencia de bandas de absorción en el IR de los carbones de naturaleza básica, pone de manifiesto que este carácter no está relacionado con grupos oxigenados, sino que puede deberse a la presencia de electrones  $\pi$  deslocalizados en la superficie de los carbones, o a estructuras aromáticas, o de tipo cromeno (Silverstein *et al.*, 1981). Esto se observa en las bandas débiles obtenidas del carbón activado obtenido a partir de madera shihuahuaco en los tres periodos de

activación, con presencia de grupos aldehídos y compuestos aromáticos.

Para la selección del carbón activado en un proceso de adsorción, se debe conocer previamente el tipo de moléculas a adsorber. Como el objetivo es decolorar aceite de castaña y las moléculas responsables de su color, las que tienen un gran tamaño molecular, se debe escoger un carbón activado que posea en su estructura porosa compuesta de meso y macro poros para que permitan el acceso de las moléculas a la superficie interna del carbón activado y se realice un eficiente proceso de adsorción. Teniendo en cuenta los parámetros de área superficial y estructura porosa se recomienda como el carbón más apropiado para utilizarlo como adsorbente en la decoloración del aceite de castaña al carbón que tuvo un periodo de activación de 45 minutos. Este carbón activado a pesar de que su estructura porosa es principalmente microporosa, presenta un gran potencial de adsorción debido al volumen de microporos, reflejado en el área superficial total de 430,24 m<sup>2</sup>/g de carbón activado.

De acuerdo a la Figura 5, el proceso de adsorción de las moléculas contenidas en el aceite de castaña, responsables de su color, sobre la superficie activa de los carbones activados analizados tarda aproximadamente 20 minutos. Es decir, requiere 20 minutos como mínimo para garantizar que toda la superficie activa del carbón activado se sature y se establezca un equilibrio de las moléculas absorbidas con las moléculas desorbidas. Este tiempo concuerda con los reportados para ensayos de decoloración de aceites vegetales realizados con otro tipo de adsorbentes selectivos (Wel, 1996).

Según el gráfico 21 también se observó que el carbón activado comercial CLARIMEX, alcanzó a decolorar un 39,52% del color del aceite, y el carbón activado obtenido de madera shihuahuaco un 14,13%, este resultado es debido a que en el carbón obtenido de shihuahuaco presenta muy baja cantidad de mesoporos y un alto potencial de microporos.

## CONCLUSIONES

Los residuos (astillas) de madera shihuahuaco presentan buenas características como materia prima para la preparación de carbón activado en polvo. Trabajando con condiciones moderadas de tiempo y temperatura se obtuvo buen rendimiento de carbón con importantes propiedades adsorbentes. El carbón activado de residuos de madera shihuahuaco debido al alto contenido de microporos y bajo contenido de mesoporos y macroporos decoloró en un 14,13% el aceite vegetal de castaña.

## AGRADECIMIENTO

Al Coordinador de la Facultad de Ciencias Forestales y medio Ambiente, de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Ing. M.Sc. Luis Bocanegra Dávila, los docentes M.Sc. Blgo. Benedicto Baca Rosado y Mgt. Blgo. David Gonzales Gamarra, por sus aportes en el desarrollo de la investigación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, G., Salmones, J. (2003) *Fundamentos de catálisis*. 4ta ed. México: Instituto Politécnico Nacional.
- ASTM D2866-94 (2004) *Standard Test Method for Total Ash Content of Activated Carbon*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM D5832-98 (2014a) *Standard Test Method for Volatile Matter Content of Activated Carbon Samples*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM D2854-09 (2014b) *Standard Test Method for Apparent Density of Activated Carbon*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM D2867-09 (2014c) *Standard Test Methods for Moisture in Activated Carbon*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM D2867-17 (2017-b) *Standard Test Methods for Moisture in Activated Carbon*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM D3838-05 (2017a) *Standard Test Method for pH of Activated Carbon*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM D2866-11 (2018) *Standard Test Method for Total Ash Content of Activated Carbon*. West Conshohocken: ASTM International.
- Aylas, E., Picasso, G., y Sun-Kou, M. (2016) Modificación ácida del carbón activado y la influencia del grupo sustituyente en la adsorción de compuestos fenólicos. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 82 (3), 339-351.
- Bansal, R., Donet, J., y Stoeckli, F. (1988) *Active Carbon*. New York: Marcel Dekker Inc.
- Coronado, C., Gálvez, G., Mora, H., y Pérez, P. (2016) Obtención de carbón activado del endocarpio de shapaja (*Attalea phalerata*) procedente de la región San Martín, empleando un método físico. *Revista Forestal del Perú*, 31 (2), 90-103.
- Cruz-Cerro, G., Velásquez, M., Contreras, J., Solís, J., Gómez, M., y Keiski, R. (2016) Estudio de carbones activados impregnados con quitosano y su comparación con carbones comerciales. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 82 (3), 373-384.
- Da Conceição, M., De Carvalho, M., Goncalves, M., Fernandez, I., Chagas, E., Ferraz, F., Ribeiro, P., y De Melo, A. (2019) Physical-chemical Properties and Chemical Composition of Brazil Nut Oil, *Bertholletia excelsa*, from State of Roraima, Brazilian Amazon, *Chemical Engineering Transactions*, 75, 391-396.
- De la Fuente, L., Muñoz, A., Valdizán, J., Zavalata, J., Portugal, A., Gómez, J., Cárdenas, M. G. (2018) *Aguaje fruto de la vida*. Lima: Fondo Editorial de la Universidad San Ignacio de Loyola.
- De la Torre, J., Echevarría Flores, D., Álvarez Bautista, J., y Barreda Gutiérrez, N. (2017) Remoción de Cromo total en agua, usando carbón mineral activado con radiación de microondas. *Industrial Data*, 20 (2), 43-46.
- Gonçalves, M., Guerreiro, M., de Oliveira, L., y de Castro, C. (2013) a friendly environmental material: iron oxide dispersed over activated carbon from coffee husk for organic pollutants removal. *Journal of environmental management*, 127, 206-211.

- Hernández, D., Giraldo, L., y Moreno, J. (2019) Interaction between Hydrocarbons C6 and Modified Activated Carbons: Correlation between Adsorption Isotherms and Immersion Enthalpies. *ACS omega*, 4 (22), 19595-19604.
- Killick, E. (2020) Extractive relations: natural resource use, indigenous peoples and environmental protection in Peru. *Bulletin of Latin American* 39, 1-15.
- Lavado, C., Kou, M., y Bendezu, S. (2010) Adsorción de plomo de efluentes industriales usando carbones activados con H3PO4. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 76 (2), 165-178.
- Lavado, C., Kou, M., y Recuay, N. (2012) Remoción de cromo (VI) empleando carbones preparados por activación química a partir de las astillas de eucalipto. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 78 (1), 14-26.
- Lazo Camposano, R. (2015) *Operaciones y procesos para la producción de carbón activado a partir de la cáscara de coco*. Tesis de grado. Ingeniería Química. Universidad Nacional del Callao. Perú.
- Limachi, I., Farfan, O., Sterner, O., y Giménez, A. (2009) Preliminary studies about the chemical characterization of fatty acids from *Bertholletia excelsa* fruit's oil by gas chromatography. *Biofarbo*, 17 (1), 47-53.
- Miche, W. (2006) *Evaluación del rendimiento en trozas de Dipteryx odorata (Aublet) Willd. Para la obtención de tablillas (pre-parquet), recuperación de tablillas, tablillas para cerco y tablas para cerco*. Tesis de grado. Ciencias Forestales, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.
- Moreno-Castilla, C. (2004). Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials. *Carbon*, 42 (1), 83-94.
- Nevskaia, D., Castillejos, E., Guerrero, A., Muñoz, A. (2004) Effects of the surface chemistry of carbons material on the adsorption of phenol-aniline mixtures from water. *Carbon*, 42 (3), 653.
- Nowicki, P., Kazmierczak-Razna, J., y Pietrzak, R. (2016) Physicochemical and adsorption properties of carbonaceous sorbents prepared by activation of tropical fruit skins with potassium carbonate. *Materials y Design*, 90, 579-585.
- Oré-Jiménez, F., Lavado, C., y Bendezu, S. (2015) Biosorción de Pb (II) de aguas residuales de mina usando el marlo de maíz (*Zea mays*). *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 81 (2), 122-134.
- Ospina-Guarín, V., Buitrago-Sierra, R., y López-López, D. (2014) Preparación y caracterización de carbón activado a partir de torta de higuera. *Tecnológicas*, 17 (32), 75-84.
- Pinzón-Bedoya, M., y Cardona, A. (2008) Caracterización de la cáscara de naranja para su uso como material bioadsorbente. Bistua: *Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 6 (1), 1-23.
- Putzel, L., Peters, C., y Romo, M. (2011) Post-logging regeneration and recruitment of shihuahuaco (*Dipteryx* spp.) in Peruvian Amazonia: Implications for management. *Forest ecology and management*, 261 (6), 1099-1105.
- Ramírez, A., Giraldo, S., Flórez, E., y Acelas, N. (2017) Preparación de carbón activado a partir de residuos de palma de aceite y su aplicación para la remoción de colorantes. *Revista Colombiana de Química*, 46 (1), 33-41.
- SERFOR (2018) *Anuario Forestal y de Fauna Silvestre 2016*. Lima: Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre.
- Sun-Kou, M., Obregón-Valencia, D., Pinedo-Flores, Á., Paredes-Doig, A., y Aylas-Orejón, J. (2014) Adsorción de metales pesados empleando carbones activados preparados a partir de semillas de aguaje. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 80 (4), 225-236.
- Silverstein. R., Clayton. G., y Morrill. T. (1981) *Identificación Espectrométrica de compuestos orgánicos*. 1era ed. México: Diana.
- Solís-Fuentes, J., Morales-Téllez, M., Ayala-Tirado, R., y Durán-de-Bazúa, M. (2012) Obtención de carbón activado a partir de residuos agroindustriales y su evaluación en la remoción de color del jugo de caña. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 27 (1), 36-48.
- Stoeckli, H., y Kraehenbuehl, F. (1981) The enthalpies of immersion of active carbons, in relation to the Dubinin theory for the vo-

lume filling of micropores. *Carbon*, 19 (5), 353-356.

Wel, L. (1996) Refinación de Aceite de Palma con Sílice. *Palmas*, 7 (3), 43-48.

Zamora, G. (2010) *Obtención de carbón activado a partir de semillas de dos palmeras de la Amazonia peruana, shapaja (Attalea phalerata) y aguaje (Mauritia flexuosa)*. Tesis de grado. Ciencias Forestales, Universidad Nacional Agraria la Molina. Perú.

Zapana, C. (2018) *Rendimiento en aserrío de tres especies maderables para la obtención de tablillas y decking en Tahuamanu – Madre de Dios*. Tesis de grado. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional del Centro del Perú. Perú.

### **Conflicto de interés**

Los autores declaramos no tener ningún conflicto de interés.