

PRODUCCIÓN DE CARBÓN Y CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE SUBPRODUCTOS GENERADOS EN LA INDUSTRIALIZACIÓN DE LA PALMA ACEITERA

PRODUCTION OF CHARCOAL AND ACTIVATED CHARCOAL FROM BY-PRODUCTS GENERATED IN OIL PALM PROCESSING

ARIÁN GONZÁLEZ¹, OSVALDO ENCINAS², YANIRA RANGEL¹, YOLI MOLINA³

1. Instituto Universitario Politécnico Santiago Mariño, Mérida, Venezuela

2. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Laboratorio Nacional de Productos Forestales, Mérida, Venezuela, ORCID 0000 0003 3423 4748

3. Laboratorio Nacional de Productos Forestales, MINEC-ULA, Mérida, Venezuela

Recibido 29 julio 2024 – Aceptado 23 noviembre 2024

Resumen

Durante la industrialización de la palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.), el proceso de extracción de aceite vegetal crudo de palma africana genera considerables cantidades de subproductos residuales, como los restos de racimos, fibras del mesocarpio y del cuesco, que usualmente se destinan a lodos para reciclaje o como combustible para la planta provocando pérdidas y contaminación ambiental. Estas materias primas tienen un potencial valor agregado, siempre y cuando se puedan determinar los productos que pueden obtenerse. Para contribuir al conocimiento de potenciales usos, se realiza un estudio del proceso de pirólisis de biomasa para la producción de carbón activado como alternativa de uso y viabilidad comercial. Se diseñó, construyó y puso en marcha un reactor prototipo lote sin agitación, en forma de horno no rotatorio, con el propósito de someter los residuos industriales a un proceso de pirólisis. En el diseño del proceso se establecieron y evaluaron los principales parámetros operacionales como temperatura, tamaño de partícula, presión, velocidad de calentamiento y tiempos de retención de la materia prima en el horno.

Obtenido el carbón como precursor, se realizó su activación química a partir de la impregnación con ácido fosfórico al 55 %. Los resultados muestran que a 400 °C, 15 psi, 12 °C/min y partículas de 2 a 30 mm, el cuesco tuvo el mayor rendimiento, superando el 49 %, sobre las otras biomásas, pero requirió mayor tiempo de retención y gasto de energía, aproximadamente de 35 minutos. El carbón activado procedente de la fibra de mesocarpio demostró mejores porcentajes de remoción en la prueba de adsorción con azul de

Palabras clave:

carbón vegetal

carbón activado

palma africana

Elaeis guineensis

metileno, por encima del 85 %.

Abstract

Key Words:

charcoal

activated charcoal

oil palm

Elais

During the industrialization of the oil palm (*Elais guineensis* Jacq.), the process of extracting crude vegetable oil from African palm generates considerable amounts of residual by-products, such as bunch residues, mesocarp fibers, and kernel fibers, which are usually destined for recycling sludge or used as fuel for the plant, causing losses and environmental pollution. These raw materials have potentially added value, as long as the products that can be obtained from them can be identified. To contribute to the knowledge of potential uses, a study was conducted on the biomass pyrolysis process to produce activated carbon as an alternative use and commercial feasibility. A batch prototype reactor without agitation, in the form of a non-rotating oven, was designed, built, and put into operation with the purpose of subjecting industrial residues to a pyrolysis process. In the process design, the main operational parameters were established and evaluated such as temperature, particle size, pressure, heating rate, and retention times of the raw material in the furnace.

Once the charcoal was obtained as a precursor, chemical activation was carried out through impregnation with 55 % phosphoric acid. The results show that at 400 °C, 15 psi, 12 °C/min, and particles of 2 to 30 mm; the bean shell had the highest yield, exceeding 49 %, compared to the other biomasses, but required longer retention time and energy consumption, approximately 35 minutes. The activated charcoal derived from mesocarp fiber demonstrated better removal percentages in the methylene blue adsorption test, above 85%..

1. INTRODUCCIÓN

Consecuencia del establecimiento en Venezuela de plantaciones con palma aceitera africana (*Elais guineensis* Jacq.) en el sur del lago de Maracaibo para producir aceites y derivados grasos, se originan variados subproductos, mayoritariamente biomasa lignocelulósica, tanto durante la fase de cosecha como a lo largo del proceso extractivo de aceite y grasas en las plantas de beneficio de la industria venezolana de la palma africana. Raramente se presta atención al valor agregado que pudieran tener estos subproductos del proceso de obtención de aceite de palma; usualmente dispuesto a ser desechado con la consecuente pérdida de materia prima potencial no aprovechada, resultan además un factor de contaminación ambiental de los suelos, donde actualmente son depositados, y en el aire que afecta a las comunidades locales.

Los subproductos de cosecha en el campo (estípites y hojas) suelen dejarse en el sitio de aprovechamiento considerando que desintegrados en el tiempo se incorporan al suelo y se estima que servirían como abono natural, pero conforman un pasivo ambiental importante que debe solucionarse. Los racimos de frutos frescos que llegan a la planta de procesamiento conforman el material que será sometido al proceso de

extracción de aceite de palma; el procesamiento de los racimos de frutos frescos se realiza en varias etapas durante las cuales se producen diversos subproductos, entre los cuales se cuentan los raquis y/o racimos sin fruto, el conglomerado de fibras que componen el mesocarpio y el cuesco, los cuales son usualmente desechados, aunque parcialmente algunos se emplean como biocombustible para generar la energía calórica requerida por la planta de procesamiento de los aceites.

De las partes desechadas en el proceso industrial de obtención de aceite destacan los racimos de frutos vacíos (raquis) y las fibras del mesocarpio que conforman una biomasa lignocelulósica cuya composición es variada, abriendo la posibilidad de ser aprovechada para convertirla en diversos productos entre los cuales llama la atención el carbón, como biocombustible o para mejorar suelos agrícolas conocido como biocarbon. Particularmente es atractivo producir carbón activado debido a su capacidad de adsorber sustancias químicas y toxinas, lo que lo convierte en un producto valioso con una amplia gama de aplicaciones y para variados procesos industriales.

Los procesos de pirólisis de biomasa para la producción de carbón, biocarbon y carbón activado, como alternativa para el aprovechamiento de subproductos residuales industriales generados por empresas que disponen de tales subproductos, está llamando la atención en Venezuela; no tanto a empresas forestales tradicionalmente productoras de residuos lignocelulósicos, como los forestales, sino particularmente a empresas agroindustriales cuyos subproductos y residuos son variadas formas de biomasa vegetal.

Si bien los procesos de obtención de carbón, biocarbón o carbón activado son conocidos, en el país son pocos los trabajos relacionados con el tema y menos aún los relacionados con la producción de carbón activado utilizando biomasa residual del proceso de obtención de aceite de palma; pero se conocen varios trabajos sobre el tema. En Colombia se investigó la producción de biocarbon (biochar en inglés) a partir de residuos de palma africana para la obtención de biocombustibles (Arteaga, J. *et al.*, 2012). En Ecuador se investigó la obtención y caracterización de biochar a partir de los residuos tusa, cuesco y hojas de palma africana utilizando un reactor tubular y 500 °C para la pirólisis, resultando que la tusa (racimos vacíos) es el mejor tipo de biomasa (Guangsig Morocho, C. J., 2022). También en Ecuador, se probó el potencial del cuesco de palma africana para producir biochar para remediación de suelos agrícolas mediante pirólisis lenta, resultando óptimo la temperatura de 600 °C para un biochar que aplicado a los suelos en 5 % mostró resultados adecuados (Álvarez *et al.*, 2022).

La carbonización requiere contar con hornos o reactores los cuales tienen características particulares y para producir carbón activado se debe prestar atención a la identificación de los parámetros que intervienen en la construcción del equipo para la carbonización y considerar una segunda etapa que precisa la definición del método de activación (Hernández, L. y Herrera, J. (2020). Se debe prestar atención a la temperatura de trabajo, el tiempo de carbonización y el tiempo de activación, atendiendo en la etapa de construcción del reactor a la normativa ASME G-27 para la construcción mecánica

de recipientes expuestos a temperaturas no mayores de 500 °C y 44 psi de presión.

Considerando los antecedentes anteriores, se pretende contribuir al conocimiento del tema producción de carbón activado a partir de subproductos de procesos agroindustriales, específicamente con los subproductos de la elaboración de aceites y grasas que resultan de la utilización de la palma aceitera (*Elais quinensis* Jacq.) de los cultivos que crecen en terrenos del Sur del lago de Maracaibo, caracterizando los mismos y evaluando el rendimiento del carbón y carbón activado que puede obtenerse de cada una de las partes lignocelulósicas que conforman los subproductos de la obtención de aceites y grasas, para lo que se construyó un prototipo de reactor que permita producir carbón o biocarbon, para finalmente determinar la factibilidad de elaborar carbón activado.

2. METODOLOGÍA GENERAL

La información relacionada con los procesos industriales de fabricación de aceite utilizando los frutos de la palma aceitera se obtuvo de una empresa que opera en Sta. Cruz del Zulia que, al tiempo de proporcionar esta información básica, permitió conocer y caracterizar los procesos de clasificación y volúmenes de los subproductos de dicho proceso; particularmente aquellos que conforman biomasa puesto que contienen alguna forma de compuestos lignocelulósicos.

La revisión de la literatura permitió conocer los diversos procedimientos o métodos que se usan para elaborar carbón y carbón activado empleando materiales lignocelulósicos, prestando particular interés a la biomasa que contienen los subproductos del proceso industrial de elaboración de aceites y grasas. Al mismo tiempo se recopiló información en cuanto a los diferentes tipos de reactores u hornos que se emplean para la carbonización de biomasa y la forma de cuantificar el carbón resultante según la materia prima que se emplea, privilegiando aquellos que se pudieran haber empleado en la carbonización de residuos industriales del proceso de elaboración de aceites obtenidos de la palma aceitera.

Con este conocimiento se diseñó y construyó un reactor pequeño al que se adaptó un sistema de calentamiento mediante gas natural licuado comercial y se instalaron los sensores de temperatura y presión originadas dentro del reactor. Previa caracterización de los subproductos lignocelulósicos del proceso de fabricación de aceite de la palma aceitera, se realizaron ensayos de carbonización de tales subproductos lignocelulósicos, variando temperatura y tiempo de carbonización. Una vez caracterizados los carbones obtenidos se realizaron ensayos con estos precursores para activar el carbón obtenido, seleccionando como agente activante el ácido fosfórico (H_3PO_4) y se evaluaron las características fisicoquímicas del carbón activado obtenido.

3. RESULTADOS

3.1. La industria de producción de aceite a partir de la palma aceitera en Venezuela

En Venezuela, la producción de palma aceitera se inició alrededor de 1990 en Santa Bárbara del Zulia, Sur de Lago de Maracaibo (Carmona, A. 2025). En la actualidad el cultivo y la extracción de aceites a partir de la palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.) conforman uno de los mercados con mayor interés comercial para las industrias aceiteras. La producción de racimos del fruto de la palma aceitera es de alrededor de 420.000 toneladas y existen en el país siete plantas extractoras de aceite de palma (5 en el estado Zulia, 1 en el estado Yaracuy y 1 en el estado Monagas) que producen 84.000 toneladas de aceite crudo de palma (Contreras, N. 2025). Se ha contabilizado que existen en el país tiene 3.000 productores de palma aceitera, entre pequeños y medianos, y en el estado Zulia llegan a 300 productores, que generan el 56 % de la producción nacional, lo que convierte al Zulia en pionero en la producción de palma (Cohen, E. 2024)

3.2. Proceso de Extracción de Aceite de Palma Africana

Se inicia con la recepción de los camiones que transportan desde las plantaciones los racimos con frutos dentro de un período de tiempo entre 10 a 12 horas luego de ser cosechados. Ya en la planta pasan por básculas adecuadas para determinar el peso de la carga y se realiza una evaluación visual de la calidad de los racimos según los porcentajes de aceptación que tiene la empresa. Luego de pasar por un equipo fracturador, que corta transversalmente los racimos para facilitar y acelerar su cocción, los racimos son luego descargados en vagones que facilitan el proceso de esterilización con el propósito de facilitar y aumentar el potencial de extracción de aceites de calidad, detener la oxidación y degradación de la fruta (una drupa) por la inactivación de enzimas, neutralizar el porcentaje de ácidos grasos libres y totales y promover la separación de la pulpa de mesocarpio de la nuez o almendra, facilitar el desprendimiento de la almendra (endosperma) del cuesco o cascarilla (endocarpio) y eliminar cualquier microorganismo no deseado. El proceso de cocción se inicia con la desaireación de los equipos esterilizadores, durante aproximadamente cinco minutos, para luego inyectar vapor con fluctuaciones en las presiones en forma de picos previamente estipulados con el propósito de facilitar la separación del cuesco de la almendra.

Terminado el proceso de cocción los vagones de fruta cocida son llevados a un segundo puente de traslación para ser ingresados en el volcador de vagones con la finalidad de alimentar el *redler* o trasladador de cadena del equipo desfrutador donde se separan los frutos del raquis, el cual es tamizado y prensado para ser enviado a espacios de almacenamiento a campo abierto. Los frutos aceptados son enviados al sistema de digestión y prensado de donde pasan al preclarificador que permite separar los aceites, 80 % de aceite, de otros materiales que luego de ser tamizados se conducen al tanque de lodos; este material es enviado por un pulmón hacia las centrifugas tricanter donde se recupera hasta un 20 % de aceite. El remanente denominado chocolatina, esencialmente constituida por aguas lodosas, licor de prensa y aceite, pasa por la trampa de grasas y luego se envía a las lagunas de oxidación para el tratamiento de efluentes.

3.3. Selección de biomasa para el proceso de pirólisis

Para la selección de biomasa para el proceso de pirólisis, se consideraron la composición química, las propiedades físicas, las características energéticas de las biomasa lignocelulósicas y humedad, densidad y tamaño de partícula. Previamente, se compiló información en cuanto a la disponibilidad de biomasa lignocelulósica resultante del proceso de elaboración de aceite en la planta industrial, Cuadro 1.

Cuadro 1. Subproductos de la palma aceitera africana (*Elaeis guineensis* Jacq.) en planta

Subproducto	Porcentaje del proceso (%)	Uso actual	Disponible (%)	Ton por cada 50 Ton del producto
Racimos frutos vacíos (raquis)	17,7 – 26,1	Abono compost para campo de plantación	60	21,2 – 31,3
Fibra de mesocarpio	11,6 – 15	Combustible para calderas Abono compost para campo de plantación	60	13,9 – 18,0
Cuesco (endocarpio)	5 - 7	Combustible para calderas	40	6,0 – 8,4
Lodos pesados	4,8 - 6	Suplemento alimenticio animal	70	5,8 – 7,2

De estos subproductos interesan solamente los que contienen material lignocelulósico por lo que no se consideraron los lodos pesados.

El racimo de frutas vacío (RFV), separada del raquis, es la capa carnosa y fibrosa y está conformado por el pedúnculo, tallo central y los alveolos, estructuras que sostienen a los frutos, distribuidos mediante espigas ramificadas a lo largo del racimo, Figura 1a.



Figura 1. A. Racimo de Frutos Vacío. B. Fibras de mesocarpio. C. Cuesco

Las fibras del mesocarpio, Figura 1. B, rodean el endocarpio y están conformadas mayormente por fibras largas y resistentes, compuestas principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina. El endocarpio, cuesco o cascarilla, Figura 1 C, es la capa externa de la nuez del fruto de la palma aceitera que recubre y protege la almendra o endospermo; es un material liviano, duro, denso y con alta resistencia mecánica, resultado de la separación de las partes de la nuez del cuesco, suele utilizarse en la industria como combustible para alimentar calderas de vapor.

3.4. Construcción del reactor prototipo para pirólisis

Para la construcción del reactor se consideraron modelos similares en la literatura. Para su diseño, se definieron como requerimientos técnicos operacionales la temperatura máxima de 400 °C y una presión máxima de 40 psi, capacidad mínima de 1.000 g y como material se seleccionó acero de alta conductividad térmica y alta resistencia, provisto de válvulas y sensores de presión y temperatura. Se consideró que el reactor tenía que permitir fácil carga de la biomasa y descarga del carbón producido con puertas que sellen el reactor para evitar el ingreso de oxígeno.

Se construyó el reactor tipo “batch” para el cumplimiento de las exigencias operacionales y técnicas, cilíndrico, no rotatorio, discontinuo. La selección de los materiales comenzó con la selección de acero estructural al carbono ASTM A36, de baja aleación y alta resistencia, adecuada termo fluencia y buena conductividad térmica para los rangos de temperatura exigidos. Con este material se elaboraron dos cuerpos cilíndricos, el cuerpo externo o chaqueta térmica y el cuerpo interno o porta muestra, este último, sin soldaduras longitudinales en su estructura. El sistema de calentamiento seleccionado fue un quemador semicilíndrico alimentado mediante conductos a presión de GLP (Gas licuado de Petróleo), construido con hierro gris fundido, material altamente resistente al craqueo térmico (180 – 230 HB), capaz de soportar temperaturas mayores a los 2000 °C; característica que lo hace propicio para la elaboración de quemadores longitudinales.

El soporte estructural tiene un sistema de soporte elaborado a partir de tubos estructurales galvanizados (SAE 1006) que tiene resistencia térmica mayor a 1000 °C.

Para el monitoreo y medición de los parámetros operacionales de temperatura y presión, se utilizó un termopar o termocupla tipo K, conectado a una tarjeta desarrollada para un arduino modelo MAX6675 que permite el registro de temperatura en recipientes a presión, mediante la conexión al hardware, a la placa base donde se instaló el software desarrollado para este propósito. Adicionalmente, se implementó un medidor de presión, que por diferencia a la presión externa mide la presión interna en el reactor.

Para definir la velocidad de calentamiento del sistema, se probaron varios tiempos comenzando con intervalos de 5 a 20 °C por minuto que se recomienda para tener una descomposición térmica más suave y uniforme de la biomasa. Se definió una velocidad de calentamiento promedio de 12 °C/min, semi lenta, para maximizar la producción de

sólidos piroleñosos, Figura 3.



Figura 2. Prototipo de reactor de pirólisis

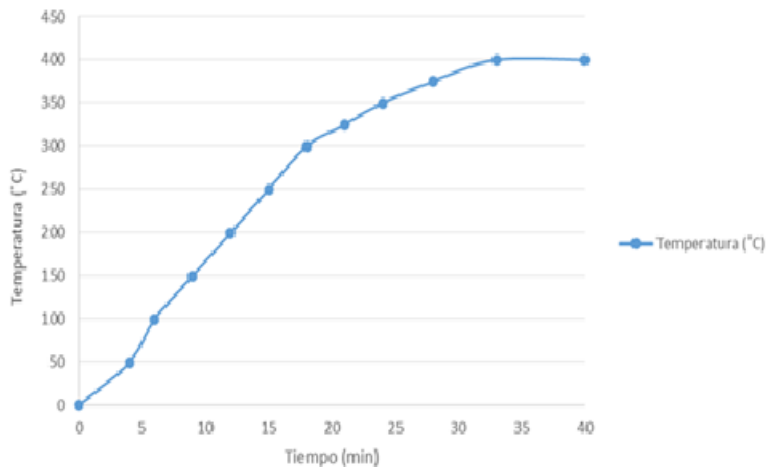


Figura 3. Tasa de calentamiento del módulo de reacción

Se estableció un protocolo de cuatro etapas para realizar los ensayos: etapa de carga de materia prima (biomasa), etapa de calentamiento, etapa de reacción de pirólisis y etapa de descarga de productos (carbón).

3.5. Acondicionamiento de la Biomasa

La biomasa seleccionada fue acondicionada para reducir la humedad, facilitar el control del tamaño de las partículas y eliminar impurezas y contaminantes, como

residuos orgánicos, metales o compuestos indeseables, que podrían interferir en la reacción de pirólisis y afectar la calidad del carbón producido, Figura 4. En la Figura 5 se presentan los contenidos de humedad inicial, como se disponen en la planta y humedad final de los tres tipos de subproductos seleccionados luego de acondicionarlos. Las partículas del raquis tuvieron la humedad inicial por encima de 60 % y las fibras por encima de 40 %; por lo que fue necesario su acondicionamiento previo a la pirólisis.



Figura 4. Recolección y secado de biomasa

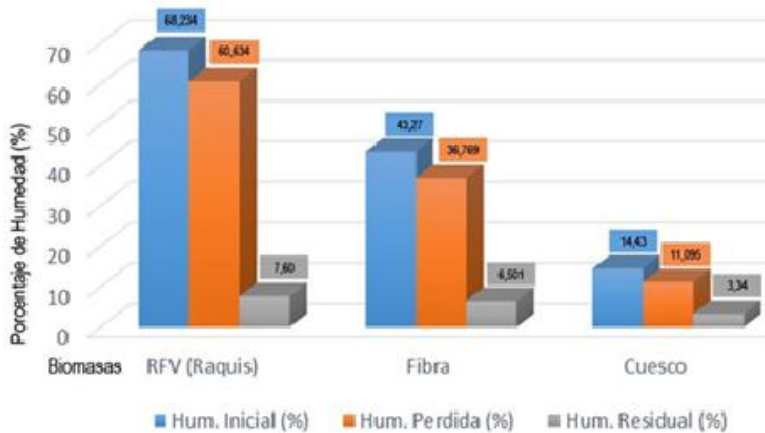


Figura 5. Control de la Humedad en la Biomosas

La diferencia del contenido de humedad entre los subproductos puede explicarse por el hecho de que el raquis no ha pasado por las etapas del proceso a las que se sometieron las fibras del mesocarpio y menos aún a las etapas de prensado, triturado y desfibrado que reducen considerablemente su humedad; el cuesco absorbe menos humedad por su dureza y consistencia.

El racimo de frutos vacíos presenta una morfología compleja: es largo, grande, flexible, duro y fibroso, su interior tiene una forma cilíndrica, ligeramente aplanada y

fibrosa que puede variar en longitud según la especie de palma. El exterior de esta zona central está rodeado de espigas, alveolos y cutículas que presentan fibras con mayor lignificación; lo cual crea una heterogeneidad en la biomasa como materia prima; además presenta altos porcentajes de fibras y agua en su composición, siendo de los tres la biomasa más compleja para acondicionar, fue el subproducto que demoró más tiempo en el secado. Para homogenizar este material se recurrió a su fraccionamiento mediante un triturador y mediante un tamiz de malla 5 (4 mm) se eliminaron las partículas de tamaño no deseado. Para su acondicionamiento se realizó una primera depuración mediante el corte de partículas que presentaron un tamaño no mayor a 5 cm de longitud, 2,5 cm de ancho y 1 cm de espesor y se procedió a una etapa de tamizado; la fracción fibrosa y lignificada fue sometida a un proceso de triturado mediante un equipo de molienda para biomasa y posteriormente se realizó un tamizado en tamices de malla número 10 para la eliminación de partículas no deseadas menores a 2 mm de longitud, resultando así dos porciones de raquis: una triturada y otra tamizada, Figura 6.



Figura 6. Fracción depurada y fracción triturada del racimo de frutos vacíos

La fibra de mesocarpio fue recolectada manualmente luego del proceso de desfibrado y secado. Una vez seco el material fue depurado, para eliminar nueces enteras, nueces adheridas, almendras enteras, almendras partidas y cascarilla, mediante un tamizado con tamiz de tamaño de malla diez, para obtener un tamaño de partícula homogéneo superior a los 2 mm en granulometría.

El cuesco presenta una situación similar a la de la fibra, si bien esta cuenta con una granulometría más definida, una densidad mayor y una dureza considerable, también, presenta un mayor porcentaje de polvo y fibra residual. Por lo cual, se aplicó un proceso similar de depuración y tamización para asegurar una granulometría mayor a 2 mm

3.6. Proceso de carbonización o Pirólisis

Para cada biomasa, Racimo de frutas vacío fracción depurada (RFVD), Racimo de frutos vacío fracción triturada (RFVT), fibra de mesocarpio (FM) y cuesco (endospermo) (C), se realizaron cinco ensayos para determinar la influencia de los parámetros operacionales atendiendo a las características propias de las diversas formas de biomasa y la influencia del tamaño de partícula en el rendimiento de los procesos productivos de carbón.

Se realizaron en un rango térmico de 400 ± 50 °C, con el propósito de asegurar y maximizar la carbonización sin incrementar las pérdidas por volatilización o gasificación parcial. Se trabajó con presiones no mayores a 15 psi y capacidades de alimentación de materia prima particulares para cada biomasa; en todos los ensayos se tomaron entre 1.000 y 2.500 gramos de biomasa seca. El tiempo de residencia, duración de la carbonización, fue modificado en cada ensayo para observar el efecto de reacción a temperaturas constantes.

Inicialmente se realizaron tres ensayos en los que se modificó gradualmente el tiempo de residencia, para identificar el proceso de mayor rendimiento; no obstante, considerando la probable obtención de material con carbonización incompleta realizando observaciones organolépticas, posteriormente se realizaron dos pruebas finales para garantizar la reproducibilidad del proceso.

Las condiciones y parámetros operacionales se mantuvieron constantes en todos los ensayos: Temperatura 400 ± 50 °C; Granulometría ≥ 2 cm. Volumen de la carga 1.000 g para los subproductos Racimo de frutos vacíos Depurado y Triturado, mesocarpio 1.500 g y Cuesco 2.500 g. Tiempo de retención mínimo 20 min. Presión máxima 15 psi. Velocidad de calentamiento 12 minutos por grado y para cuesco 7 minutos por grado.

3.7. Pirólisis del Racimo de frutos vacíos (RFVD)

La biomasa de RFVD tiene mayormente partículas de 3 a 5 cm, conformadas principalmente por la zona lignificada de las espigas, lo que supone parcial pérdida y desperdicio de biomasa, pero se presenta como una materia prima más homogénea, posee mayor contenido de material lignocelulósico, por lo que se iniciaron los ensayos con tiempos de residencia relativamente cortos. En el primer ensayo se emplearon 20 minutos de residencia que no fueron suficientes porque produjo solo en las partes superficiales de las partículas, por lo que para el segundo ensayo se subió el tiempo de residencia a 30 minutos que produjo rendimientos de alrededor del 38 %. De todos modos, se realizó otro ensayo empleando mayor tiempo de residencia, 40 minutos, pero los rendimientos bajaron a 36,16 %, por lo que se adoptó el tiempo de residencia de 30 minutos para otros dos ensayos de comprobación, Figura 7.

3.8. Pirólisis de Racimo de Frutos Vacío Triturado (RFVT)

La biomasa compuesta por RFVT fue sometida a 400 ± 50 °C, a una tasa de calentamiento lenta y en una atmósfera limitada de oxígeno. Se carbonizaron 1.000 gramos y se tamizaron con tamiz de malla 10. El primer ensayo con residencia de 10 minutos produjo muy poco carbón, para el segundo ensayo se consideró un tiempo de residencia de 30 minutos que produjo 37,30 % de rendimiento con presencia de partes muy pequeñas que indicaron desprendimiento de las piezas más grandes, por lo que se consideró disminuir el tiempo de residencia de 20 minutos, condición que mostró un rendimiento constante de cerca de 40 % en los tres ensayos posteriores, Figura 8.

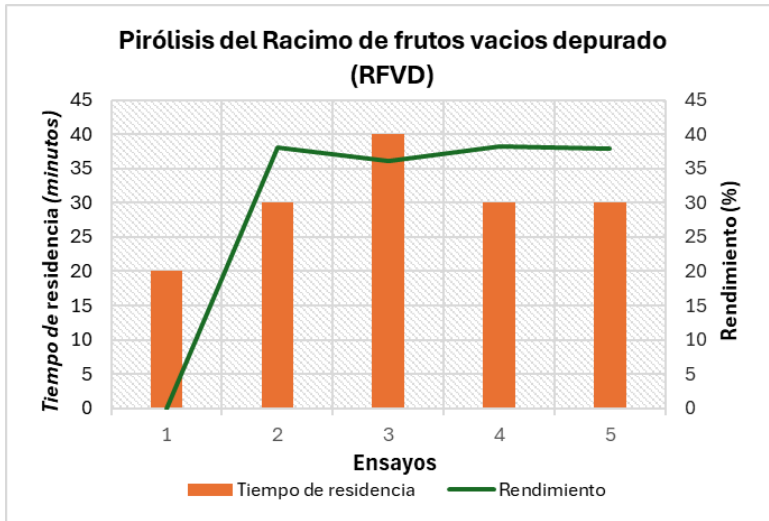


Figura 7. Tiempo de residencia y rendimiento del Racimo de frutos vacío depurado

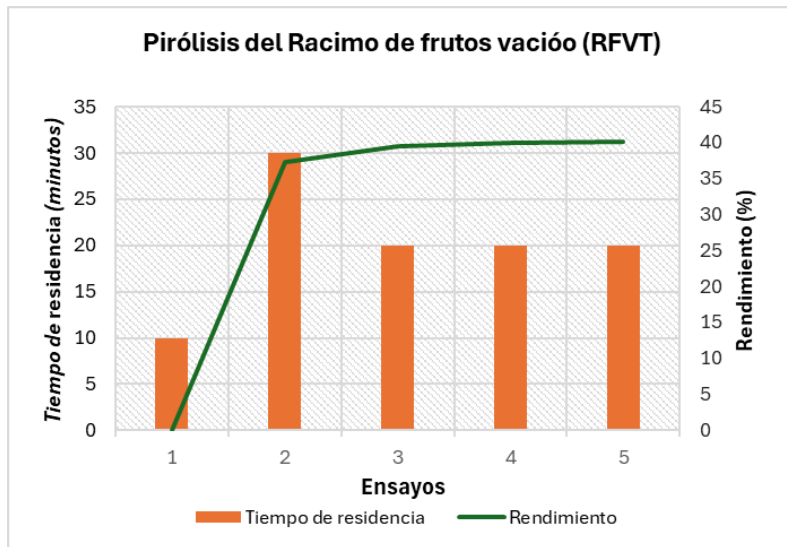


Figura 8. Tiempo vs Rendimiento - Proceso de Pirólisis para RFV Triturado

3.9. Pirólisis de fibra de mesocarpio

Las fibras del mesocarpio tienen adicionalmente partículas muy pequeñas, polvo, por lo que se tamizó para eliminarlo. Posterior a su depuración se efectuó el calentamiento del reactor comenzando con 35 minutos de residencia para asegurar carbonización completa, pero el rendimiento fue apreciado como bajo, posiblemente por el tamaño de las partículas que se carbonizan rápidamente, por lo que el segundo ensayo fue realizado con menos tiempo de residencia, 25 minutos, lo que resultó en

aumento del rendimiento de carbón hasta 45 %. Un tercer intento bajando el tiempo de residencia a 15 minutos no fue suficiente para lograr carbonización completa, por lo que se realizaron dos pruebas más con residencia de 25 minutos que fue considerado conveniente para carbonizar las fibras del mesocarpio, Figura 9.

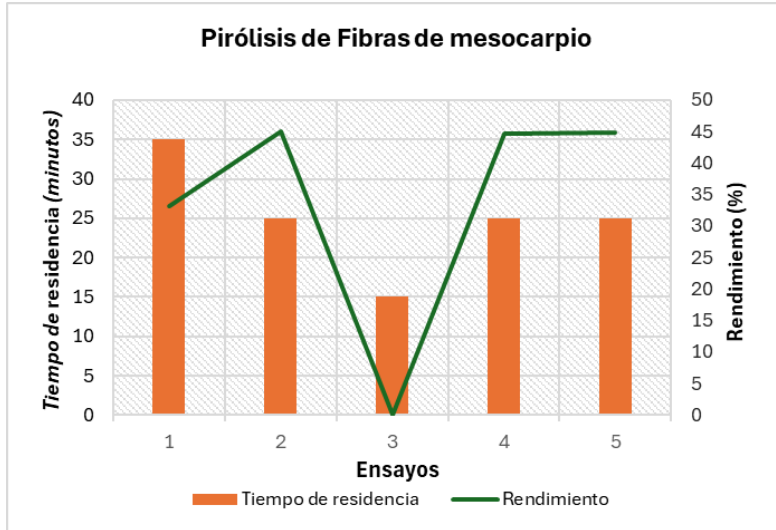


Figura 9. Tiempo vs Rendimiento - Proceso de pirólisis para la fibra de mesocarpio

3.10. Pirólisis de Cuesco (Endocarpio)

El tamaño de las partículas de cuesco estuvo alrededor entre 2 y menos de 30 mm; se consideró que contenía material más compacto y relativamente con mayor dureza y densidad que los otros subproductos y que se podría empezar la carbonización con 45 minutos de residencia. Este tiempo de residencia no resultó conveniente para el rendimiento en carbón porque una revisión visual del material mostró adherencia de residuos de las fibras de mesocarpio, muy fácil de volatilizar, por lo que se bajó el tiempo de residencia a 25 minutos lo que tampoco fue conveniente porque los rendimientos fueron muy y no se logró la carbonización completa. Tiempos de residencia menores a 30 minutos parecen inadecuados para un rendimiento aceptable de carbón.

Para el tercer ensayo en consecuencia se emplearon 35 minutos, intermedio de los anteriores; se mejoró el rendimiento por encima del 49 %, que fue el mayor rendimiento obtenido en la investigación. Se corroboran los rendimientos con dos pruebas adicionales más, Figura 10.

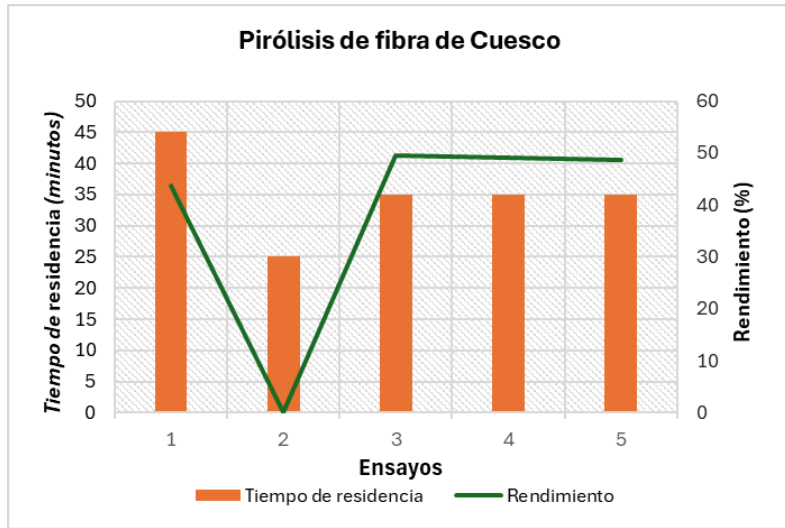


Figura 10. Tiempo vs Rendimiento - Proceso de Pirólisis para el Cuesco (Endocarpio)

3.11. Rendimiento de carbón

Como se esperaba, la biomasa de cuescos tuvo el mayor rendimiento, 47,78 % de la masa de la carga, seguido por la fibra del mesocarpio con rendimiento de 41,96 %, tiene mayormente fibras y mayor coeficiente de variación, la fracción triturada del racimo de frutos vacío con rendimiento de 39,3 %; la fracción depurada del racimo de frutos vacío con el menor rendimiento, 37,60%. El promedio de rendimiento obtenido considerando las cuatro biomásas fue de 41,67 % con coeficiente de variación del 10,68 %. Cuadro 2 y Figura 11.

Cuadro 2. Rendimiento de carbón por tipo de subproducto de la elaboración de aceite de palma

	Fracción Depurada	Fracción Triturada	Fibra Mesocarpio	Cuesco Endocarpio
Prueba 1	38,01	37,30	33,13	43,70
Prueba 2	36,16	39,50	45,10	48,70
Prueba 3	38,30	40,40	44,90	49,50
Prueba 4	37,91	40,13	44,70	49,20
Prom	37,60	39,33	41,96	47,78
CV %	2,00	2,77	10,87	4,44
Desv St	0,75	1,09	4,56	2,12

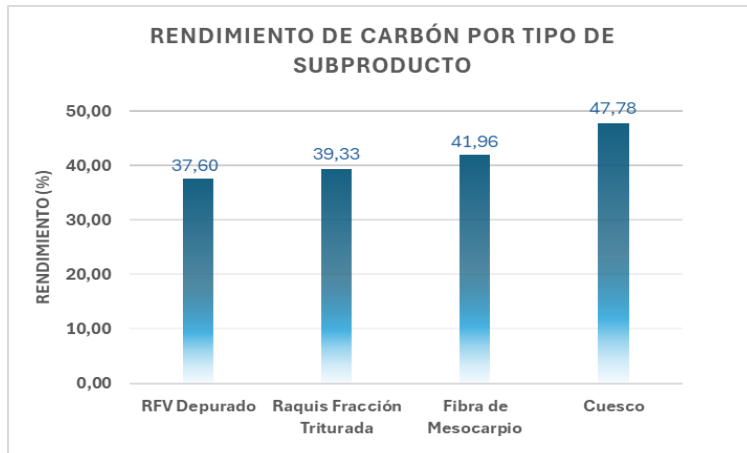


Figura 11. Rendimiento de carbón por subproducto industrial

3.12. Carbón activado

A partir del carbón producido se pueden considerar diversas alternativas de utilización para mejorar su valor agregado en la comercialización. Entre las alternativas se tiene la producción de biochar que requiere procesos de activación biológica y suele ser aplicado como enmienda en suelos agrícolas a los que mejora sus propiedades; puede ser usado como combustible sólido en la siderurgia para la producción de aceros por su capacidad reductora y como combustible actuando como reductor y eliminación del oxígeno de los minerales de hierro; también puede ser usado en la producción de carbón activado mediante procesos de activación física y química. Este último uso es el que tiene mayor agregado.

3.12.1. Selección de método de activación

Para la activación del carbón se suelen usar dos métodos: uno químico y otro físico. La activación química implica la impregnación del carbón con agentes químicos, principalmente ácido fosfórico (H_3PO_4), hidróxido de potasio (KOH) o cloruro de zinc ($ZnCl_2$), seguido de un tratamiento térmico a temperaturas de moderadas-altas (Bayona, 2006). Este proceso permite generar una mayor porosidad y área superficial en el carbón, lo que mejora su capacidad de adsorción al tiempo de liberar y degradar los residuos de alquitrán que obstruyen los macro-, meso- y microporos del carbón. La activación física requiere someter al carbón a tratamientos térmicos a altas temperaturas (entre 800 °C y 1100 °C) en una atmósfera de gases oxidantes, como vapor de agua o dióxido de carbono. Ambos métodos tienen sus ventajas y desventajas; el método físico es más sencillo y económico, pero suele tener un rendimiento ligeramente inferior al de la activación química.

Se consideró que la activación física al requerir instalaciones complejas para el suministro de vapor con temperaturas más elevadas tendría costos elevados en su

implementación por lo que se privilegió el método de activación química.

3.12.2. Activación química

Las muestras ensayadas fueron los carbones producidos con los distintos subproductos de la fabricación de aceite de palma, seleccionando aquellos obtenidos con menor tiempo de residencia y mayor rendimiento, que secas al aire se guardaron bolsas de plástico, Figura 12.



Figura 12. Carbón seleccionado para la activación

3.12.3. Granulometría, pulverizado y tamizado de los carbones

Para cada tipo de carbón producido, se realizó en primer lugar el análisis de granulometría para lo que se tomaron muestras de 1.000 g pasando el material por tamices 10 (diámetro 2 mm), 20 (diámetro = 0,841 mm), 40 (diámetro = 0,400 mm) y 60 (diámetro = 0,25 mm). En el Cuadro 5 y Figura 13 se presentan los porcentajes del material retenidos por cada tamiz.

Cuadro 3. Análisis de granulometría subproductos del proceso de obtención de aceite de palma

Biomasa	Malla 10	Malla 20	Malla 40	Malla 60	Resto
Raquis Fracción Depurada	15,44 %	23,12 %	25,38 %	20,31 %	15,75 %
Raquis Fracción Triturada	5,03 %	14,57 %	36,67 %	19,59 %	24,14 %
Fibra de Mesocarpio	7,68 %	15,58 %	29,78 %	15,79 %	31,18 %
Cuesco	39,48 %	15,23 %	16,88 %	13,10 %	15,32 %

3.12.4. Impregnación, calcinación, lavado y almacenamiento

Se utilizaron crisoles con tapa, Figura 14, en los cuales el carbón tamizado y seco se impregnó con una solución de ácido orto-fosfórico (H_3PO_4) al 55 % p/v, durante 12 horas, seguido de un secado a 110°C de temperatura durante 2 horas. Esta etapa elimina la humedad y facilita la posterior activación resultante del proceso de calcinación del carbón realizado en una mufla a temperatura de 600°C y por 1 hora. Este proceso térmico promueve la descomposición y eliminación de los componentes volátiles y genera una estructura porosa aumentando la superficie específica del material.

El producto resultante fue secado en estufa a 110 °C durante dos horas y luego se

almacenaron en envases plásticos.

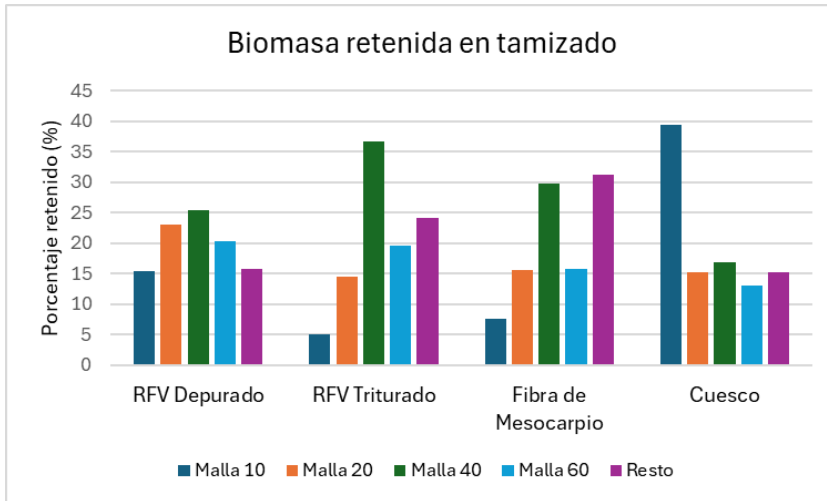


Figura 13. Porcentaje de biomasa retenida durante el tamizado



Figura 14., Crisoles con tapa y mufla para la calcinación de los carbones

3.12.5. Rendimiento del proceso de activación

El rendimiento obtenido en un proceso de activación de carbón depende en gran medida de los parámetros operacionales empleados. Factores como la temperatura, el tiempo de activación, el tipo y la cantidad de agente activante, la atmósfera utilizada, entre otros, tienen una influencia directa sobre el rendimiento final del carbón activado. A mayores temperaturas de activación, se suele obtener una mayor superficie específica y porosidad, pero también un menor rendimiento en masa debido a una mayor gasificación y eliminación de materia volátil.

Asimismo, el tipo de agente activante y su concentración afectan la velocidad y extensión de la activación química, lo que también impacta en el rendimiento del proceso. Por lo tanto, es crucial tomar en cuenta la repartición de estos parámetros operacionales para lograr un balance adecuado entre las propiedades deseadas del carbón activado y un rendimiento satisfactorio del proceso de producción. En el Cuadro

4, se describen los parámetros de operación durante la fase de activación, propuesta por la investigación en base a diversas metodologías estudiadas por Pantoja (2015), Beltrán (2014) y Sarmiento y col. (2004).

Cuadro 4. Parámetros operacionales de activación de muestras de carbón

Parámetro	Dimensión
Tamaño de diámetro de partícula en polvo	0,25 mm
Agente activante	Ácido fosfórico (H ₃ PO ₄)
Concentración del agente activante	55% p/v
Tiempo de impregnación	12 h
Temperatura de activación	600 °C
Tiempo de retención	1 h

Para la activación se tomaron cuarenta gramos de cada tipo de carbón obtenido previamente, con el propósito de minimizar la utilización de ácido ferroso; el cual tiene un alto valor, permitiendo obtener cantidades de muestras representativas para evaluar el efecto del proceso de activación y su rendimiento.

3.12.6. Rendimientos de la activación de carbones precursores

La Figura 15 resume los rendimientos en carbón activado que se han obtenido de los precursores, carbones, de los subproductos de la palma aceitera, se presentan los promedios y los valores de rendimiento máximos y mínimos de las pruebas realizadas. Los rendimientos más elevados corresponden a los carbones activados obtenidos del carbón de cuesco; no existen mayores diferencias estadísticas entre los rendimientos de RFV depurado y el carbón de fibra. Menos rendimientos presentaron los carbones de RFV triturado.

El mejor rendimiento presentado por el carbón de cuesco, puede explicarse porque su precursor, carbón de cuesco, contiene menor remanente de carbohidratos, que producen menos alquitranes piroleñosos que podrían haber obstruido los poros del carbón activo.

3.12.7. Características fisicoquímicas del carbón activado

Los carbones activados se caracterizaron en cuanto a adsorción, porcentaje de remoción, pH, densidad, humedad, cenizas, material volátil y carbón fijo.

3.12.8. Valores de pH en carbón activado

El pH de los carbones obtenidos varió según el subproducto del cual se obtuvo el carbón activado; así, para el carbón activado de RFV Depurado presentó un pH de 7,20, el RFV Triturado pH de 7, las fibras de mesocarpio pH de 5,98 y el Cuesco H de 8,87.

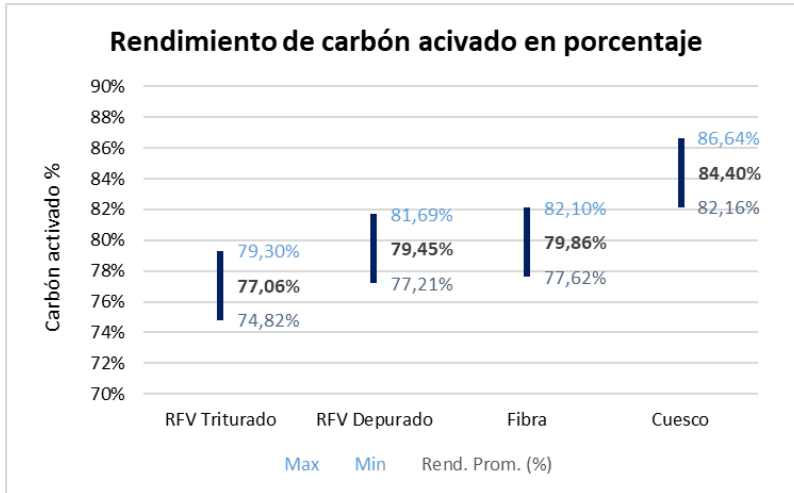


Figura 15. Rendimientos de carbón activado a partir de los precursores, carbones

Se puede decir que ambos carbones activados del Racimo de frutos vacíos tienen un pH neutro, provienen del mismo material y solo difiere en el tratamiento depurado o triturado; este es un pH apropiado para purificación y potabilización de aguas eliminando olores y sabores desagradables, eliminación de toxinas, elaboración de fármacos y cosméticos, así como para eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos y adsorción de gases (Peralta Arroyo *et al.*, 2008; <https://moksa.com.co/>). El carbón activado del mesocarpio, con pH ácido se usa mayormente en la purificación del agua potable y del aire, adsorbe contaminantes y mejora el pH del agua, ideal para tratamiento de aguas residuales y lixiviados y en la remoción de metales pesados eliminación de impurezas y sabores no deseados (www.activecarbon.es). El carbón activado del cuesco con su pH alcalino puede utilizarse en la purificación o potabilización de aguas sin compuesto neutralizador y en suelos con necesidades de alcalinización, útil en el ablandamiento de aguas ácidas para uso de calderas y tuberías (Peralta, 2008).

3.12.9. Densidad aparente

Para determinar la densidad aparente del carbón activado se secaron las muestras en una estufa a 105 °C por aproximadamente una hora. Para cada tipo de carbón se tomó un recipiente de 25 ml de volumen seco y previamente tarado, se llenó completamente el recipiente con la muestra sin compactar y comprobando con una espátula que el material estaba al ras se pesó el recipiente con el carbón activado, luego se restó el peso del recipiente vacío para obtener la masa neta de carbón activado; se dividió la masa neta del carbón activado (g) entre el volumen del recipiente (ml) para obtener la densidad aparente en g/ml. El proceso se repitió tres veces para cada tipo de carbón activado para obtener el promedio.

El carbón activado del raquis depurado tiene una densidad de $0,35 \text{ g/cm}^3$, el del raquis triturado de $0,31 \text{ g/cm}^3$, la fibra $0,43 \text{ g/cm}^3$ y el cuesco $0,55 \text{ g/cm}^3$. El valor de la densidad proporciona una idea del área superficial específica del carbón activado y es influido por la densidad del material del que proviene. El carbón activado del cuesco, que proviene del endocarpio que usualmente es material más compacto que los otros que se ensayaron, tiene una densidad ligeramente superior a las densidades de carbón activado obtenidas de maderas pesadas y alto contenido de lignina (Gómez y Quevedo 2020) y se considera que se aproxima a los valores de referencia del carbón activado, $0,5 \text{ g/cm}^3$. Los carbones del raquis no difieren mucho en su valor entre ellos, son más bajos que los valores de referencia y parecen tener menos masa de carbón por unidad de volumen, lo que limitaría la capacidad de adsorción del carbón activado; además, un carbón activado con baja densidad aparente puede dificultar el empaquetamiento y manejo en equipos, reduce la resistencia mecánica, y complica los procesos de regeneración y reactivación. Esto también se traduce en una menor eficiencia volumétrica, ya que se requieren mayores volúmenes de estos carbones para lograr la misma capacidad de tratamiento.

3.12.10. Humedad

El contenido de humedad del carbón activado se midió empleando crisoles de porcelana de 22 mm de alto y 44 mm de diámetro con sus respectivas tapas cuyo peso seco se determina introduciendo en estufa a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ enfriando en desecado y pesando en balanza analítica, se agrega alrededor de 1 g de la muestra pesando de 1 g de carbón y se pesó, siendo éste el peso húmedo de la muestra y el crisol; se introduce el crisol en estufa a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ por una hora al cabo del cual se introduce rápidamente en desecador y luego de 20 a 25 minutos se vuelve a pesar siendo éste el peso seco del crisol y la muestra; se restó este valor del peso húmedo y se dividió entre 100 para expresar el contenido de humedad de la muestra.

El carbón activado proveniente de Cuesco presentó un CH de 1,5 %, fibra de palma 3 %, raquis triturado 2,2 % y raquis depurado 2,2 %; todos los valores se considera que se encuentran por debajo del máximo requerido, por lo que se pueden considerar aceptables (Acevedo *et al.*, 2016).

3.12.11. Material volátil

Para cuantificar el material volátil de los carbones activados obtenidos, se tomaron muestras de 1 g de las muestras tamizadas y se colocaron en crisoles de porcelana con tapa, que fueron introducidos en una mufla a una temperatura de $900 \pm 20^\circ\text{C}$ en la que permanecieron 7 minutos luego de lo cual se enfriaron en un desecador y se volvieron a pesar; la diferencia de pesos se expresó en porcentaje.

El contenido de material volátil en los carbones activados obtenidos fue: para el Cuesco 17,43 %, para la Fibra de mesocarpio 18,01 %, para el RFV Triturado 7,29 %, y para el Racimo de Frutos Vacíos Depurado 6,27 %. Llama la atención el contenido de material volátil de las Fibras y el Cuesco que puede afectar negativamente las

propiedades del carbón activado; el RFVT con ambos tratamientos antes de la carbonización se puede indicar que los valores de material volátil son aceptables y apropiados en usos donde se requiere mayor reactividad química. En general, los valores de material volátil reportados para estas muestras de carbón activado se encuentran dentro de los rangos estándar comerciales (5 – 15 %), lo que indica que son materiales adecuados para diversas aplicaciones.

3.12.12. Contenido de cenizas

Para la obtención de cenizas en los carbones activados, se emplearon crisoles de peso conocido; en cada uno se depositó alrededor de 1 gramo del carbón activado, tomando el peso húmedo en una balanza analítica; el recipiente se introdujo en estufa a 105 °C hasta peso constante para obtener el peso seco de la muestra; cada crisol se introdujo en una mufla y se llevó a 750 °C por dos horas, luego de ese período se colocó en desecador y se dejó enfriar antes de pesar para obtener el peso seco de la muestra, dividiendo el peso seco entre el peso húmedo y multiplicando por 100 se obtuvo el peso seco de las cenizas expresado en porcentaje.

El contenido de cenizas en el carbón activado fue para el cuesco 21,22 %, para la fibra 4,45 %, para el raquis triturado 15,06 % y para el raquis depurado 15,95 %. Un contenido de cenizas normal se encuentra entre 2 y 15 % (Navarrete, *et al.*, 2005).

El contenido de ceniza en cuesco fue el mayor y estaría fuera del rango ideal comercial lo que puede perjudicar la calidad del carbón activado generando problemas operacionales como obstrucción de equipos y generación excesiva de residuos; su uso puede estar restringido a ciertos usos como filtración general, rellenos, soporte catalítico o combustible sólido. Las mismas consideraciones se pueden aplicar al contenido de cenizas en el raquis. El contenido de cenizas en las fibras es comparativamente más bajo e indica que el carbón activado de fibras puede ser considerado de buena calidad.

3.12.13. Carbón fijo

El porcentaje de carbón fijo en el carbón activado se determinó siguiendo las indicaciones de la norma ASTM que toma en consideración los porcentajes de humedad, material volátil, cenizas y carbón fijo cuya suma debe restarse del peso total (en porcentaje). Así, el porcentaje de carbono fijo en el Cuesco resultó ser de 64,9 %, de la Fibra de mesocarpio 74,1 %, del RFV Triturado de 75,5 % y del RFV Depurado 75,6 %.

El contenido de carbón fijo conlleva a considerar que las biomásas de los subproductos de la elaboración de aceites a partir de la palma aceitera tienen un buen potencial para la producción de carbones activados de buena calidad conveniente para diversas aplicaciones

4. CONCLUSIONES

Los subproductos lignocelulósicos del proceso de elaboración de aceites a partir de la palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq) pueden ser convertidos a carbón y carbón activado mediante pirólisis controlada. El ensayo realizado en un reactor fabricado localmente, con rendimientos aceptables para su comercialización, demostró que son biomásas con alto potencial para su utilización como materia prima en el proceso de pirólisis de biomasa controlada. Naturalmente es preciso realizar un estudio económico para determinar su factibilidad económica.

Todas las biomásas seleccionadas presentaron un alto porcentaje de material volátil en el carbono activado, lo que podría haber afectado el rendimiento.

No se ha explorado la posibilidad de utilizar el proceso de activación física para obtener carbón activado, por lo que sería conveniente explorar esta posibilidad a desmedro del costo que pudiera suponer su aplicación industrial. También sería conveniente realizar estudios acerca de la composición química de los gases condensables productos de la pirólisis, pudieran contener compuestos químicos de atractivo valor comercial. Esta recuperación de gases condensables se convertiría en la mejor medida de atenuar el impacto ambiental que ocasiona toda operación que implica la producción de gases de combustión.

Agradecimiento

Los autores agradecen a la empresa Grasas El Puerto C.A. ubicada en Santa Bárbara del Zulia las facilidades prestadas para la realización de la presente investigación, así como por proporcionar información general de la empresa.

BIBLIOGRAFIA

- Acevedo, S., Galicia, L., Plaza, E., Atencio, R., Rodríguez, A., González, E. 2016. Carbón activado preparado a partir de carbón mineral bituminoso activado con hidróxido de potasio. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia. Vol. 39, No. 2, 64-70
- Álvarez, E., Carvalho, J. Martins, A. Álvarez, D. 2022. Evaluación de la pirólisis como un método para la obtención de combustibles líquidos a partir de los plátanos. Trabajo de Ascenso Publicado, Instituto de Investigación Científica Tropical de Lisboa, Portugal.
- Arteaga, J. Arenas, E. López, D. Sánchez, C. Zapata, Z. 2012. Obtención de biocombustibles producto de la pirólisis rápida de residuos de palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.). Trabajo de Ascenso Publicado, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.
- Bayona Leal, M. A., y Martínez Rodríguez, J. P. 2021. Propuesta del diseño conceptual de un proceso para la pirólisis de biomasa por medio de simulación. Trabajo de Ascenso Publicado, Fundación Universidad de América, Bogotá D.C.

- Carmona, A. 2025. En: <https://bitacoraeconomica.com/consumo-de-aceite-de-palma-en-venezuela/>
- Cohen, E. 2024. En: <https://ultimasnoticias.com.ve/general/la-palma-aceitera-tiene-futuro-en-la-industria-local/>
- Contreras, N. 2025. en: <https://bitacoraeconomica.com/consumo-de-aceite-de-palma-envenezuela/>
- Gómez, K. Quevedo, N. 2020. Evaluación del biochar obtenido por pirólisis del retamo espinoso para remover cromo del agua. Trabajo de Ascenso Publicado, Universidad de La Salle, Bogotá.
- Guangasig Morocho, C. J., 2022. Obtención y caracterización de Biochar a partir de residuos de palma africana mediante pirólisis. [Trabajo de titulación Ingeniero Químico]. Universidad Central Ecuador.
- Hernandez, L. Gerra, J. 2020. Diseño y construcción de un reactor de pirolisis a escala de laboratorio para la obtención de carbón activado utilizando grano de caucho reciclado-gcr “Un análisis experimental”. Trabajo de grado publicado, Universidad de Córdoba. Montería, Córdoba.
- Navarrete, L. F., Giraldo, L., Baquero, M. C. y Moreno, J. C. 2005. Carbón activado: efecto del lavado con ácido sulfúrico del precursor lignocelulósico, cuesco de palma africana, sobre los procesos de carbonización y activación. Revista Colombiana de Química, 34(1), 67–78.
- Peralta Arroyo, J., Sun Kou, M. del R., Bendezú Montes, S. 2008 Preparación, caracterización de carbones activados con KOH y H₃PO₄ y su aplicación en la adsorción de Cd (II). Rev. Soc. Quím. Perú v.74 n.4 Lima, Perú