

Obtaining biochar as a strategy for sustainable management of waste derived from the industrial process of oil palm (*Elaeis Guineensis*)

Obtención de biocarbón como estrategia para el manejo sostenible de residuos derivados del proceso industrial de palma aceitera (*Elaeis Guineensis*)

SUERO DÍAZ, H. D.¹; MEJÍAS MONSALVE, M. O.²; GONZÁLEZ GARCÍA, H.³; MOJICA SÁNCHEZ, L.F.⁴;

¹**Ing. Hidekel Daniel Suero Díaz. Centro de Cuesta Nacional, Santo Domingo, República Dominicana, e-mail: hidekelsuerodiaz@gmail.com
ORCID. <https://orcid.org/0009-0008-5963-6624>**

²**MSc. Mabel Onedís Mejías Monsalve. Profesora Investigadora, Programa académico de Ingeniería de Alimentos, Coordinadora de Laboratorios, Universidad Nacional Experimental Sur del Lago “Jesús María Semprúm” (UNESUR), Santa Bárbara de Zulia, estado Zulia, Venezuela, e-mail: mejiasm@unesur.edu.ve
ORCID. <https://orcid.org/0009-0005-4436-0029>**

³**Ph.D. Hebandreyna González García. Profesora Investigadora, Programa académico de Ingeniería Agroindustrial, Corporación Universitaria del Meta (UNIMETA), Villavicencio, Meta, Colombia, e-mail: hebandreyna.gonzalez@unimeta.edu.co
ORCID. <https://orcid.org/0000-0001-9622-1139>**

⁴**MSc. Lina Fernanda Mojica Sánchez. Profesora Investigadora, Programa de Ingeniería Ambiental, Escuela de Ingenierías, Corporación Universitaria del Meta, e-mail: lina.mojica@unimeta.edu.co
ORCID. <https://orcid.org/0000-0003-1972-4642?lang=en>**

Entidad¹

Centro de Cuesta Nacional, Santo Domingo, República Dominicana.
Tel: +1 809-537-5017
E-mail: info_casacuesta@ccnt.net.do

Entidad²

Universidad Nacional Experimental Sur del Lago “Jesús María Semprúm” (UNESUR), Santa Bárbara de Zulia, estado Zulia, Venezuela.
Tel: 58 (275)- 5551036
E-mail: produccionagropecuaria@unesur.edu.ve

Entidad^{3,4}

Corporación Universitaria del Meta (UNIMETA), Villavicencio, Meta, Colombia.
Tel: +57 318 8021072
E-mail: decanaturaingenierias@unimeta.edu.co

Recibido: 10/01/2024 / Aceptado: 04/05/2024

Resumen

El desarrollo industrial en palma ha conducido a una mayor generación de residuos, por lo que esto se ha convertido en una problemática ambiental y económica. Por tal motivo, se implementó el método adecuado para la obtención del biocarbón a partir del raquis de palma aceitera. De esta manera, se realizó una investigación descriptiva, no experimental, en tres muestras de raquis homogeneizado de 500 gramos cada una, donde se les determinó: contenido de humedad del raquis, contenido de aceite del raquis, y rendimiento del biocarbón en base a materia seca. Se obtuvo una humedad promedio de 2,58 %, un contenido de aceite de 16,13 % y rendimientos en el biocarbón entre 76,96 y 79,24 %. Así, se evidencia que el método de obtención del biocarbón a partir del raquis de palma es satisfactorio, debido a los altos rendimientos alcanzados; generando mejor disposición de residuos al ofertar el biocarbón como fertilizante.

Palabras claves: Pirolisis; Biocarbón; Sostenibilidad; Palma de aceite.

Abstract

Industrial development in palm has led to greater waste generation, so this has become an environmental and economic problem. For this reason, the appropriate method was implemented to obtain the biochar from the oil palm rachis. In this way, a descriptive investigation was carried out, not experimental, in three samples of homogenized rachis of 500 grams each, where they were determined: rachis moisture content, rachis oil content, and biochar yield based on dry matter. An average humidity of 2,58 % was obtained, an oil content of 16,13 % and yields in the biochar between 76,96 and 79,24 %. Thus, it is evident that the method of obtaining the biochar from the palm rachis is satisfactory, due to the high yields achieved; generating better waste disposal by offering the biochar as fertilizer.

Keywords: Pyrolysis; Biochar; sustainability; oil palm.

1. INTRODUCCIÓN

Con el pasar de los años, el desarrollo industrial ha conducido a una mayor generación de residuos, por lo que esto se ha convertido en una problemática ambiental y económica, ya que las industrias deben asumir la responsabilidad de los altos costos que genera la disposición final de sus residuos. El proceso industrial de la palma aceitera no escapa de esta realidad, en ella se generan residuos como los racimos o más conocido como tusas, la fibra, el cuesco, la ceniza y los lodos. Jones *et al.*, (2011) dieron a conocer que se generan 4 kg de residuos por cada kilogramo de aceite de palma producido y demostraron que solo el 10% del racimo de fruta es utilizado para

producir aceite y el resto se convierte en residuo.

Debido a las propiedades orgánicas, los raquis o tusas poseen potencial como materia prima en la producción de biocarbón. Por ello, su uso como materia en la producción de energía neutra va desde el compost rico en CO₂, hasta la producción de biocarbón. A partir de estos señalamientos, Lehmann y Joseph (2009) definen el biocarbón como un producto rico en carbono que se produce cuando la biomasa (tales como la madera, el estiércol o los residuos de cultivos) se calienta en un recipiente cerrado con poco o ningún aire disponible.

No obstante, en Venezuela las tecnologías en el aprovechamiento del raquis de palma aceitera para la obtención de biocarbón son muy bajas, no solo en cantidad sino también en infraestructura, ya que los proyectos que las impulsan se están trabajando muy lentamente. Sin embargo, las empresas aceiteras han venido buscando soluciones para el aprovechamiento de los subproductos generados, no solo para obtener ingresos adicionales, sino también para dar respuesta a una responsabilidad ambiental (Leyva *et al.*, 2019).

En este marco se destaca la empresa Aceite's C.A, donde a través de observaciones preliminares efectuadas en diferentes momentos a dicha planta procesadora, y en conversaciones informales con algunos trabajadores, se evidencia que el raquis de palma es el subproducto más voluminoso de la planta. De la misma manera, según datos aportados por la oficina de producción en el 2023 se estimó que en la empresa se procesaron unas 53.542.540 toneladas de fruta de palma, con picos de 145.680 por día.

De esta manera, se confirma que en la empresa Aceite's C.A, la mayor cantidad de residuos generados en la extracción del aceite de la palma africana es el raquis, también genera otros residuos como lo son: la nuez, pulpa molida, raquis, cuesco y el lodo, pero el raquis, es el residuo más duro y de difícil descomposición. Este aspecto se debe probablemente al inadecuado manejo que posterior al proceso de extracción primaria se acumula, y pasa a convertirse en un desperdicio el cual al no ser tratado de manera adecuada se convierte en un elemento contaminante.

En estas circunstancias, en la planta procesadora aun cuando los volúmenes de raquis producidos anualmente son muy altos, no existe una infraestructura tecnológica para generar valor a este subproducto, así mismo, pareciera que el personal que allí se desempeña posee escasos conocimientos para el desarrollo de métodos y técnicas adecuadas para el aprovechamiento de los subproductos generados durante la extracción del aceite. Lo anterior podría acarrear potenciales efectos negativos tales como: contaminación visual, así como también malos olores, lixiviados y lugar para insectos y gusanos, además, contaminación de las aguas subterráneas, ocasionando impactos negativos para el ambiente debido al tiempo de descomposición y al volumen de espacio que ocupan en el lugar del proceso.

Por estas razones, resulta pertinente realizar este estudio el cual diseñó métodos y protocolos tecnológicos para la utilización de los subproductos de la palma aceitera generados durante su proceso productivo, específicamente el aprovechamiento del raquis de palma aceitera para la obtención de biocarbón en la empresa Aceite's C.A durante el año 2023, ya que para esta empresa la disposición de los residuos representa un gran desafío (Munar- Flórez, *et al.*, 2022) los cuales deben ser reaprovechados o tener algún tratamiento antes de ser desechados.

2. METODOLOGIA

2.1 Área de Investigación

La investigación se desarrolló en la Aceite's C.A, la cual está dirigida al procesamiento de palma aceitera. Esta es una empresa

joven, con amplia experiencia, responsables ante el entorno (responsabilidad social) de mantener productos de alta calidad, a fin de satisfacer las necesidades de sus clientes. Se mantiene un alto nivel de exigencia con los proveedores, lo cual redundará en mayor satisfacción para con los clientes, la misma se encuentra ubicada en Santa Bárbara de Zulia, municipio Colón, estado Zulia, Venezuela.

2.2 Enfoque y Diseño de la Investigación

Esta investigación se desarrolló desde un enfoque cuantitativo el cual aporta sus resultados en medidas numéricas y estadísticas para probar hipótesis o solucionar problemas, cuantifica respuestas, realiza extrapolaciones estadísticas e inferencias para soporte de soluciones (Rosario y Camacho, 2015). Por lo tanto, en la empresa Aceite's C.A. se tomó una muestra del raquis de forma aleatoria en la que se obtuvo datos medibles sobre los diferentes elementos que lo componen, también se estableció una caracterización de los residuos con el fin de conocer la composición de este para luego aplicar el método correcto y obtener el biocarbón.

Del mismo modo, la investigación se realizó bajo el diseño no experimental el cual es sistemático y empírico en las que las variables independientes no se manipulan porque ya han sucedido, las interferencias sobre las relaciones entre variables se realizan sin intervención o influencia directa.

2.3 Tipo de Investigación

Según los tipos de investigación podemos considerar que esta fue de tipo descriptiva (Arias, 2012), ya que consistió en la caracterización de la muestra tomada del raquis con el fin de establecer su estructura o comportamiento, también se describió los métodos mediante los cuales se puede obtener el biocarbón.

2.4 Población y Muestra

En esta investigación, la población involucrada correspondió a la empresa Aceite's C.A., lo cual es una planta extractora de aceite de palma donde será escogida la muestra la cual es una parte representativa de una población. En la presente investigación, se tomaron tres muestras de 500 gramos cada una de raquis pulverizado que correspondió al área de producción de aceite, donde se llevó a cabo la investigación.

2.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Se implementó la técnica de observación de campo, esta técnica de recolección de datos nos permite: tomar los datos tal y como se presentan en la realidad, tener un ojo crítico para realizar preguntas precisas que nos permitan conocer mejor la situación. De esta forma se tomaron los datos necesarios para evaluar los desechos derivados del proceso industrial de la palma aceitera y así considerar el más factible para la obtención del biocarbón.

Durante el proceso de investigación se utilizó para la recolección de información, la observación como fuente primaria para la identificación de la problemática y obtención de datos relevantes para diseñar una propuesta en la empresa Aceite's C.A.

y como fuente secundaria la consulta de libros y documentos relacionados con la industria procesadora de aceite de palma y producción de biocarbón.

Como instrumento de la observación se utilizó un formato de diagnóstico o levantamiento de datos con tablas caracterizadas por presentar una serie de

aspectos a corroborar y facilitar el detalle sobre el fenómeno estudiado. En la tabla 1, 2 y 3 se presentan los formatos de la observación para determinar la humedad, contenido de aceite del raquis y rendimiento del carbón en base a la materia seca.

Tabla 1. Contenido de humedad del raquis en base a materia seca

Raquis	Volumen de la muestra (g)	Humedad de la muestra	Peso cápsula vacía	Peso cápsula + volumen de la muestra	Peso muestra seca	Peso cápsula + muestra seca	%Humedad
Muestra 1							
Muestra 2							
Muestra 3							
Promedio							

Fuente: Autores.

Tabla 2. Contenido de aceite del raquis en base a materia seca

Raquis	Cantidad de la muestra (g)	Peso del balón vacío (g)	Peso balón con aceite (g)	Aceite extraído	%Aceite (BS)
Muestra 1					
Muestra 2					
Muestra 3					
Promedio					

Fuente: Autores.

Tabla 3. Porcentaje del rendimiento del biocarbón en base a materia seca

Muestras		% Rendimiento del biocarbón sobre masa seca al horno	
T(100-320)°C	T(280)°C	T(100-320)°C	T(280)°C

Peso raquis (g)	Peso carbón (g)	Peso raquis (g)	Peso carbón (g)	(0% de humedad)	(0% de humedad)
-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------

Fuente: Autores.

2.6 Fases de la investigación

A continuación, se describen las fases que se realizaron para alcanzar los objetivos planteados en la investigación:

Fase I. Inspección del buen funcionamiento de la planta y de los equipos y accesorios del laboratorio. Se realizó la inspección de toda la planta y del laboratorio, evaluando el estado de los equipos y accesorios, se observó el funcionamiento del secador, pulverizador, horno, entre otros., encontrándose estas en buen estado.

Fase II. Determinación y recolección de la muestra. El raquis utilizado fue proporcionado por la empresa Aceite's C.A. Era necesario acondicionar la muestra y homogeneizarla para realizar las Posteriormente cada media hora se hizo un conteo de 100 racimos de los que salen de la planta, separando dos racimos vacíos al azar los cuales se depositaron en un recipiente limpio y seco destinado exclusivamente para este uso, al finalizar los racimos vacíos se cortaron en cuadros con ayuda de un hacha, luego se mezclaron cuidadosamente entre sí hasta obtener tres muestras de 500 gramos cada una la cual se llevó al laboratorio, y posteriormente, se colocaron en cada cápsula 10 gramos aproximadamente de cada muestra raquis obtenida, para así identificarlas registrando los valores en un formato respectivo. Este procedimiento se

pruebas, en tal sentido, se realizaron procedimientos de picado, secado y pulverizado de elementos, para procesos de caracterización y carbonización.

Fase III. Realización de las pruebas de caracterización de la materia prima (raquis de palma aceitera) muestra en base seca. Para la caracterización de la muestra se realizó el siguiente orden:

✓ Humedad en el raquis: Para dicho procedimiento analítico antes de utilizar las cápsulas, fueron lavadas y puestas en el horno a 100°C por 1 hora para su respectiva esterilización, luego fueron enfriadas en el desecador por el espacio de 30 minutos, para así de tal forma poder pesarlas.

realizó tres veces para mayor precisión de la muestra. La humedad se determinó según las especificaciones del manual de laboratorio en plantas de beneficio para fruto de palma de aceite, que consistió en pesar muestras de raquis de 10 gramos aproximadamente, secándolas en el horno a 105 ° C hasta peso constante y determinar el peso final.

Se determinó por triplicado de la muestra en racimos vacíos, a través de la siguiente ecuación:

$$\% \text{Humedad} = \frac{\text{peso muestra inicial} - \text{peso muestra seca}}{\text{peso muestra inicial}} \times 100$$

Dónde:

Peso muestra seca= peso cápsula con muestra seca - peso cápsula vacía.

Contenido de aceite en el raquis: Luego se realizó un procedimiento de extracción de aceite en el equipo Soxhlet, esto es debido a que el raquis viene impregnado de aceite del proceso de producción de este. Para ello, se tomaron tres muestras de 15 gramos de raquis, estas se llevaron a un horno a 150 °C y se dejó por un espacio de 5 horas. Transcurrido se retiraron las cápsulas y se colocaron en una campana desecadora dejando enfriar por 30 min, luego de ello en 3 dediles de extracción, con el tamaño adecuado para el equipo Soxhlet utilizado, se ubicó la muestra de cada cápsula cuidadosamente, evitando tener pérdidas de muestra seca. El contenido de aceite se obtuvo por el método estándar de aceite en racimos vacíos o tusas (Cala *et al.*, 2011). A través de la siguiente ecuación:

$$\%BS = \frac{\text{peso aceite extraído}}{\text{peso muestra inicial}} \times 100$$

Dónde:

Aceite extraído= peso balón con aceite - peso balón vacío.

Fase IV. Descripción del método de obtención del biocarbón a partir del raquis de palma aceitera (*Elaeis guineensis*). Se seleccionó, como método para la obtención del biocarbón una mezcla de pirolisis lenta con carbonización, la pirolisis lenta es el proceso termoquímico usado para transformar biomasa y otros materiales orgánicos de baja densidad energética a líquidos de alta densidad energética, conocidos como bio – aceites, a sólidos de alta densidad energética como biocarbón.

En primer lugar, se eligió el precursor, en este caso es el raquis de palma, se realizó una recolección (del proceso de desfrutamiento) y preparación. Esta preparación consistió en un secado a vapor (100°C) del raquis, por aproximadamente 24h, un picado y luego un pulverizado.

El método se fundamentó en envolver cantidades entre 2 gramos de material en papel aluminio, de modo que quedase sellado dentro de la envoltura. La muestra se llevó al horno a una temperatura usualmente cercana a los 320 °C. A esta temperatura ocurre la carbonización, observándose el desprendimiento de sustancias volátiles en abundancia. Cuando cesa la liberación de sustancias volátiles el carbón se encuentra listo. De esta forma, durante el proceso de carbonización se producen dos fracciones que son carbón fijo (carbón) y gases. La carbonización del raquis de palma aceitera se llevó a cabo en el laboratorio. El método fue evaluado en cuanto a su repetitividad, realizando más de 10 repeticiones a fin de determinar el rendimiento. Se dividió la muestra en dos paquetes, una de ellas se llevó al horno a 100°C por 60 minutos o bien el tiempo necesario para que cesara la emisión de humo, luego se elevó la temperatura a 320°C y se mantuvo durante 45 minutos. La segunda parte se tomó la misma cantidad de paquetes se colocaron en el horno, el cual se encendió y llevó a 280°C. Se mantuvo a esa temperatura por 120 minutos. Y luego de ello los paquetes fueron pesados al alcanzar nuevamente la temperatura ambiente.

Fase V. Evaluar el rendimiento de la carbonización del raquis de palma aceitera (*Elaeis guineensis*). Este se realizó experimentalmente por un análisis de

diferenciación de peso de la muestra que consiste en tomar el peso de las muestras antes y después de carbonizarla, a fin de realizar posteriormente los cálculos pertinentes.

3.1 Contenido de Humedad del Raquis en Base a Materia Seca

En esta se buscó determinar el contenido de agua en los racimos vacíos o tusas. La muestra para este análisis fue almacenada en recipientes cerrados para evitar pérdida de agua por contacto con el medio ambiente. En la tabla 4, se observa que para la muestra 1 obtuvo un 2,67% de humedad, la muestra número 2 un 2,68% y para la muestra 3 un 2,39% obteniendo así un promedio de 2,58%, y con valores menores a lo obtenido por Guangasig (2022) de 3,13 % de humedad. El

3. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

porcentaje de humedad en este tipo de materia prima varía debido a los distintos procedimientos a los cuales se somete. El contenido ideal de humedad para que exista el proceso de extracción completa de aceite se ubica entre el 2 y 3% (Anaya, 2018).

Es deseable que la humedad del raquis sea lo menos posible ya que la vía de valorización como la carbonización requiere el material seco para que el proceso no requiera mucho consumo de combustible y este se desarrolle con un tiempo óptimo (Guangasig, 2022)

Tabla 4. Contenido de humedad del raquis de palma de aceite en la empresa Aceite's, C.A, ubicada en la localidad de Santa Bárbara de Zulia, estado Zulia, Venezuela, 2023.

Raquis	Volumen de la muestra (g)	Humedad de la muestra	Peso cápsula vacía	Peso cápsula + volumen de la muestra	Peso muestra seca	Peso cápsula + muestra seca	%Humedad
Muestra 1	10,11	0,27	69,95	80,06	9,84	79,79	2,67
Muestra 2	10,07	0,27	90,67	100,74	9,8	100,47	2,68
Muestra 3	10,04	0,24	66,67	76,71	9,8	76,47	2,39
Promedio							2,58

Fuente: Aceite's, C.A., 2023.

3.2 Contenido de Aceite del Raquis en Base a Materia Seca

La determinación del contenido de aceite es muy importante ya que este es uno de los

materiales constituyentes prioritarios de la materia prima utilizada. La cantidad de aceite

presente en el raquis de palma corresponden a un promedio de 16,13% (Tabla 5), valor similar a lo señalado en la literatura consultada, al respecto Woittiez *et al.*,

(2018), señalan que la variedad dura tiene una cáscara gruesa y una tasa de extracción de aceite promedio entre 16 % y 18%.

Tabla 5. Contenido de aceite del raquis de palma de aceite en la empresa Aceite's, C.A, ubicada en la localidad de Santa Bárbara de Zulia, estado Zulia, Venezuela, 2023.

Raquis	Cantidad de la muestra (g)	Peso del balón vacío (g)	Peso balón con aceite (g)	Aceite extraído	%Aceite (BS)
Muestra 1	15	97,04	99,42	2,38	15,86
Muestra 2	15	110,34	112,73	2,39	15,93
Muestra 3	15	100,34	102,83	2,49	16,6
Promedio					16,13

Fuente: Aceite's, C.A., 2023.

3.3 Obtención del Biocarbón

En este método de obtención del biocarbón las temperaturas y tiempos pueden variar por el funcionamiento del horno, el tamaño de la muestra y en las temperaturas de descomposición de los componentes de materiales biomásicos. El método permite desarrollar una óptima carbonización, a la vez que permite simplificar la comprensión del mismo. El diseño del método se basó en datos experimentales propios y en datos para materiales lignocelulósicos de Slopiecka *et al.*, (2011), que indican que la pirolisis de la hemicelulosa inicia cerca de los 275°C, mientras la celulosa y la lignina se descomponen aproximadamente a 350°C.

3.4 Rendimientos de la Carbonización del Raquis

El rendimiento del biocarbón producido en escala de laboratorio tiende a ser mayor debido a una serie de características (Tabla 6), en cuanto a los parámetros para la carbonización, puede variar por diversas razones, por ejemplo, de su contenido de humedad, del tipo de horno y de los parámetros de tiempo y temperatura de operación del horno. Es deseable que la humedad sea la menor posible para que el proceso de carbonización no requiera mucho consumo de combustible y que el proceso se desarrolle en el tiempo óptimo. Al obtener el biocarbón del raquis de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*), se pueden evaluar las diferentes aplicaciones de este para un manejo sostenible de los desechos producidos en la industria procesadora de palma aceitera. Los

valores obtenidos son mayores a los presentados por Guangasig (2022), con rendimientos de biocarbón entre 43% y

56% y una temperatura en el proceso de pirólisis de 300°C.

Tabla 6. Rendimiento de la carbonización del raquis de palma de aceite en la empresa Aceite's, C.A, ubicada en la localidad de Santa Bárbara de Zulia, estado Zulia, Venezuela, 2023.

Muestras				% Rendimiento del biocarbón sobre masa seca al horno	
T(100-320)°C		T(280)°C		T(100-320)°C	T(280)°C
Peso raquis (g)	Peso Carbón (g)	Peso raquis (g)	Peso Carbón (g)	(0% de humedad)	(0% de humedad)
2,21	1,36	2,04	1,57	61,53	76,96
2,31	1,29	2,12	1,68	55,84	79,24
2,20	1,44	2,08	1,61	65,45	77,40

Fuente: Aceite's, C.A., 2023.

4. CONCLUSIONES

Al caracterizar el raquis de palma aceitera (*Elaeis guineensis*) para la obtención de biocarbón en la empresa Aceite's, C.A. se indica que el contenido de humedad es ideal para la extracción total del aceite en el racimo vacío.

El método de obtención del biocarbón a partir del raquis de palma aceitera es satisfactorio pues que se evidenciaron rendimientos del mismo, superiores a los de otras investigaciones; esto representa una ganancia para la empresa ya que se logró convertir un residuo en un potencial subproducto el cual podrá agregarse al catálogo de productos comercializados por la empresa como fertilizante para plantaciones de palma.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anaya, A. (2018). Análisis de la eficiencia, pérdida total y costos para la optimización del proceso de extracción de aceite de palma en las empresas de

la zona central palmera de Colombia (Trabajo de grado). Universidad Autónoma de Bucaramanga, Colombia. Arias, F. (2012). El Proyecto de Investigación. Introducción a la metodología científica. Caracas: Editorial Episteme.

Cala, S. L., Yáñez, E.E., & García, J. A. (2011). Manual de procedimientos de laboratorio en plantas de beneficio. Colombia: CENIPALMA.

Guangasig, C. (2022). Obtención y caracterización de Biochar a partir de residuos de palma africana mediante pirólisis (Trabajo de grado). Universidad Central de Ecuador, Ecuador.

Jones, D.L., Murphy, D.V., Khalid, M., Ahmad, W., Edwards-Jones, G. & DeLuca, T.H. (2011). Short-term biochar-induced increase in soil CO₂ release is both biotically and abiotically mediated. *Soil Biology & Biochemistry*, 43, 1723 - 1731. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.018>.

- Lehmann, J. & Joseph, S. (2009). Biochar for environmental management. UK-USA: Science and technology.
- Leyva, S., Rodríguez, Y., Mendoza, T., & Cadena, J. (2019). Manejo del raquis generado en las extractoras de palma aceitera para la elaboración de compost. *Revista científica ECOCIENCIA*, 6 (4), 1-17.
<https://revistas.ecotec.edu.ec/index.php/ecociencia/article/view/196/160>.
- Munar- Flórez, D.A., Ramírez-Contreras, N.E., & García- Núñez, J.A. (2022). Biocarbón como producto de la biomasa residual de palma de aceite en un concepto de economía circular. *Boletín Técnico N°41*. Colombia: CENIPALMA.
<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/boletines/article/view/13709>
- Rosario, M., & Camacho, C. (2015). Apuntes de metodología de la investigación. Santa Bárbara de Zulia, Venezuela: Dirección de publicaciones UNESUR.
- Slopiecka, K., Bartocci, P. & Fantozzi, F. (2011). Thermogravimetric analysis and Kinetic study of poplar wood pyrolysis. *Applied Energy*, 97, 491-497.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.056>
- Woittiez, L. S., van Wijk, M. T., Slingerland, M., van Noordwijk, M., & Giller, K. E. (2018). (2018). Brechas de rendimiento en el cultivo de palma de aceite: una revisión cuantitativa de factores determinantes. *Revista Palmas*, 39 (1), 16 - 68.
<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/12400>