

## **Caracterización física y química de dos biocarbones obtenidos en diferentes condiciones de pirolisis**

*Characterization of the physical and chemical properties of two  
biochars in different pyrolysis conditions*

**Gaona-Chanalata, José (estudiante)**  
Universidad Técnica de Machala  
Código ORCID 0000-0002-8602-8084  
[jgaona\\_est@utmachala.edu.ec](mailto:jgaona_est@utmachala.edu.ec)  
Machala – Ecuador

**Barrezueta-Unda, Salomón (profesor)**  
Universidad Técnica de Machala  
Código ORCID 0000-0003-4147-9284  
[sabarrezueta@utmachala.edu.ec](mailto:sabarrezueta@utmachala.edu.ec)  
Machala – Ecuador

## RESUMEN

El propósito de esta investigación fue comparar las propiedades físicas y químicas de dos biocarbones en diferentes condiciones de pirólisis. En un reactor pirolítico se obtuvieron los biocarbones a partir de cáscara de cacao (BCA) y estiércol bovino (BSB). Las condiciones de pirólisis fueron: 200°C/60 minutos; 250°C/30 minutos(E2); 300°C/30 minutos. El biocarbón se dejó enfriar, para luego tamizar, proceder con los análisis. El mayor rendimiento del BCA fue de 35,56% y del BSB de 71,11%. Los valores de pH de todos los ensayos fueron altamente alcalinos con rangos de 8,23 – 10,04. En la prueba de hidrofobicidad los valores fueron: 65,73 s biocarbón de cacao y 228,3 s biocarbón de bovino. El mayor porcentaje de ceniza fue el estiércol bovino con 89,94 %. El análisis de Infrarrojo indicó picos de grupos funcionales carboxílicos en ambos biocarbones a 300°C por 30 minutos.

**Palabras claves:** análisis proximal, grupos funcionales, hidrofobicidad, FTIR.

## ABSTRACT

The aim of this research was to compare the physical and chemical properties of two biochars under different pyrolysis conditions. In a prolific reactor, biochars derived from cocoa shells (BCA) and bovine manure (BSB) were obtained. The pyrolysis conditions were: 200°C/60 minutes; 250°C/30 minutes (E2); 300°C/30 minutes. The biochar was allowed to cool, then sieved and analyzed. Higher yields of BCA were 35.56% and of BSB 71.11%. The pH values of all the tests showed strong alkalinity with ranges of 8.23 - 10.04. In the hydrophobicity test the values were: 65.73 s cocoa biochar and 228.3 s bovine biochar. The highest percentage of ash was bovine manure with 89.94 %. Infrared analysis indicated peaks of carboxylic functional groups in both biochars at 300°C for 30 minutes.

**Keywords:** proximate analysis, functional groups, hydrophobicity, FTIR

## Introducción

Una alternativa a esta problemática a la degradación de los suelos por la excesiva aplicación de pesticidas es la utilización de abonos orgánicos como el compost (humus de lombrices) o el biocarbón (biochar). Este último, es el resultado de la conversión termoquímica de la biomasa vegetal o animal que tiene lugar a temperaturas superiores a los 300 °C en ausencia de oxígeno, proceso que se conoce como pirólisis. El uso de los biocarbones tiene el potencial para compensar la pérdida de fertilidad y de otras propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos. Además, la mayoría de los biocarbones tienen un pH extremadamente alcalino (> 9,0), por tanto, se puede utilizar para la enmienda de los suelos cuando se mezclan con otros abonos u otros materiales como el yeso o la cal.

La mayoría de los biocarbones poseen una estructura porosa y diversos grupos funcionales que favorecen la adsorción. Su eficacia en las enmiendas agrícola del biocarbon ha sido demostrada en diversos estudios. Sin embargo, es fundamental comprender los factores que influyen en la preparación y las características del biocarbón para garantizar su viabilidad en este proceso (Li et al., 2023). El biocarbón es valorado por su alto contenido de carbono y sus propiedades fisicoquímicas, como la superficie específica, el volumen de poros, el valor calorífico bruto, los grupos funcionales superficiales, la capacidad de intercambio catiónico y la estabilidad estructural (Kamarudin et al., 2022). Estas propiedades están estrechamente relacionadas con las condiciones de pirólisis y la composición de las materias primas utilizadas en su producción (Li et al., 2023).

La composición de las materias primas juega un papel esencial en la producción de biocarbón y determina las características y calidad del producto final (Li et al., 2023). Existen tres análisis principales para los restos orgánicos (biomasa) de cultivos: el proximal, final y lignocelulósica. La composición proximal de la biomasa incluye rendimiento del biocarbon, carbono fijo (CF), materia volátil (MV), cenizas y contenido de humedad (CM). En la mayoría de los residuos de cultivos, los porcentajes de CF, MV, cenizas y CM varían entre 3-26%, 65-90%, 1-15% y 0-10%, respectivamente (Li et al., 2023) . La temperatura de pirólisis afecta principalmente el contenido de MV y el rendimiento del biocarbón, mientras que el tipo de materia prima influye en los contenidos de CF y cenizas del biocarbón (Pérez-Cabrera et al., 2021; Barrezueta Unda et al., 2022). Para aplicaciones de enmienda del suelo, los contenidos de cenizas y MV son factores críticos en el biocarbón, mientras que un alto contenido de cenizas en el biocarbón muestra un gran potencial como catalizador en varias reacciones, como la descomposición de compuestos orgánicos, la reducción de contaminantes y la transformación de sustancias tóxicas (Li et al., 2023; Wang et al., 2022).

Se han desarrollado diversos procesos de conversión termoquímica, como la torrefacción, la pirólisis y la carbonización, para producir biocarbón o residuos carbonosos a partir de biomasa. La pirólisis lenta se destaca como la tecnología más utilizada para obtener biocarbón, permitiendo alterar sus propiedades mediante ajustes en las condiciones del proceso (Wang et al., 2022). Durante la pirólisis lenta, la biomasa se degrada y se convierte en un sólido rico en carbono, junto con la generación de productos volátiles condensables y no condensables (Wang et al., 2022; Kamarudin et al., 2022).

En este contexto., un biocarbón con una alta superficie específica e hidrocarburos alifáticos pueden ocasionar a corto plazo problemas de compactación del suelo y biosorción de metales pesados que se acumularán en los primeros centímetros de suelo, esto probablemente ocasione una toxicidad en las plantas y acumulación del suministro hídrico. Ante esta situación, es importante caracterizar a los biocarbones para realizar una correcta recomendación del tiempo y temperatura de la pirólisis.

El objetivo de la investigación fue analizar las propiedades físicas y químicas de dos biocarbones obtenidos en un reactor pirolítico artesanal a partir de restos orgánicos de la cascara del cacao y del estiércol de bovino a diferentes temperaturas y tiempo de incineración.

## **Materiales y métodos**

### **Ubicación de los ensayos**

La investigación se realizó en una finca del cantón Santa Rosa, provincia de El Oro, Ecuador, ubicada en las coordenadas: 79°54'59.5573'' O y 3°27'40.0270'' S a 10 m.s.n.m

### **Recolección y tratamiento de la biomasa**

Se utilizó dos tipos de biomasa. Cascara de mazorca de cacao (CC) de varios días de cosechada y estiércol bovino seco (EB). La biomasa de cacao se recolectó de forma manual de fincas próximas al lugar del ensayo. La cantidad obtenida fue de 100 kg de cáscara de la mazorca de cacao, la cual fue secada por 12 días en un lugar sin cubierta. Al final se obtuvo 28,5 kg de biomasa seca. La segunda biomasa, el estiércol de bovino se obtuvo de un establo ganadero y se recolectó con ayuda de una pala. La cantidad recolectada fue de 150 kg de biomasa fresca. La biomasa recolectada tuvo el mismo proceso que el secado del cacao, obteniendo 75 kg de materia seca. A continuación, las biomásas se trituraron y se colocaron en sacos para luego ser trasladada al sitio delimitado para el ensayo y proceder a obtener el biocarbón.

## Obtención de biocarbon

Para obtener el biocarbón se utilizó el diseño de reactor de doble fondo Fuentes Hernández & Recio Recio, (2005) y Marín-Armijos et al. (2018). El proceso inició, colocando 3 kg de biomasa en el interior del reactor. El combustible para generar el calor fue un cilindro de gas doméstico, con el cual se regula la temperatura. Las temperatura y los rangos de tiempo de incineración fueron: 200 °C por 60 min y de 250°C y 300°C por 30 min (Tabla 1).

**Tabla 1.** Diseño de los ensayos para obtener biocarbón, donde ECC: Ensayo de cáscara de cacao; EEB: Ensayo de estiércol bovino

Ensayos	Temperatura(°C)	Tiempo(min)
ECC1	200	60
ECC2	250	30
ECC3	300	30
EEB1	200	60
EEB2	250	30
EEB3	300	30

Una vez que se llegó al tiempo establecido se colocó el reactor a un costado para así poder enfriarlo con agua por el lapso de unos 45 min. Una vez frío, se procedió a sacar la biomasa pirolizada, se la colocó sobre una placa de metal para que se enfríe y luego se constató el peso final y concluir el proceso con el triturado en un molino artesanal y el respectivo tamizado con una malla de 2 mm.

## Análisis proximal

En esta investigación se tomó varias muestras por ensayo para luego ser llevados a laboratorio y poder determinar: cantidad de biocarbón medido en kilogramos en una balanza, el rendimiento de biocarbón en porcentaje (Ecuación 1).

$$R(\%): \frac{MBO}{MES} * 100 \quad (1)$$

Donde R: Rendimiento expresado en porcentaje; MBO: Masa de biocarbón obtenido (kg); MES: Masa inicial en estado seco (kg).

El pH fue medido con un potenciómetro (Hanna, Rumania) primero con agua desionizada y en Cloruro de potasio (KCl), en una relación 1:50. La conductividad eléctrica (CE), se medido en agua desionizada relación 1:2.5 (biocarbon/agua) con la ayuda de un potenciómetro. También se obtuvo el alfa pH, que es la resta del valor obtenido en agua y en KCL.

El test de hidrofobicidad se realizó con agua desionizada (0,05~ mL), se colocó 2 g de biocarbon en una luna de reloj de 5 cm de diámetro y se agrega 3 fotos de agua y se procede a contar el tiempo que se absorba. La ceniza se obtuvo por diferenciade peso antes de la incineración en una estufa a 900 °C por 30 minutos y al salir de la estufa. Todas las variables fueron medidas cinco veces.

### **Determinación de grupos funcionales**

En la caracterización de los biocarbones se utilizó un equipo ATR de diamante, para obtener los espectros IR por transformación Fourier (FTIR). Las muestras de biocarbón se analizaron de forma directa entre la región de 4500 cm<sup>-1</sup> - 450 cm<sup>-1</sup>, con 12 scans por espectro y resolución de 4 cm<sup>-1</sup>. Los datos de los espectros IR fueron exportados en formato texto y se analizaron utilizando Originpro 6.

### **Procedimiento estadístico**

Los valores obtenidos de cada ensayo con diferentes biocarbón fueron ingresados en una hoja de Excel para ser tabulados e ingresados en el Software estadístico SPSS versión 22 para su análisis estadístico descriptivo (mínimo, media, máximo y desviación estándar). También se utilizó ANOVA de una vía y comparación de medias mediante la prueba Tukey al 95% de confiabilidad (alfa = 0,05) y poder determinar las diferencias estadísticas entre los ensayos que se presentan con tablas y figuras. Los valores de contenido de nitrógeno y grupos funcionales fueron llevados a laboratorios privados.

## **Resultados y Discusión**

### **Obtención de biocarbón**

En la tabla 2 se presenta un rendimiento de 35,56% en cacao y un peso total de 1,07 kg de biocarbón. Los valores mínimos y máximos de rendimiento fueron entre 23,33 % (ECC2) a 33,33 % (ECC1; ECC3) y de 33,33 % (ECC2) a 36,67 % (ECC1; ECC3), respectivamente; en cuanto al total de biocarbón fueron muy ajustados y variaron entre 0,70 kg (ECC2) a 1,10 kg (ECC1 y ECC3).

Para el biocarbón de estiércol bovino el valor más alto de rendimiento y el total de biocarbon corresponden al ensayo EEB2 con 71,11% y 2,13 kg. El rendimiento de biocarbón indicó valores mínimos y máximos de: 63,33 % (EEB3) a 66,67 % (EEB1 y EEB2) y 66,67 % (EEB1) a 76,67 % (EEB2), respectivamente. En cuanto a los rangos obtenidos de menor a mayor para el total de biocarbón fueron: 1,9 kg (EEB3) a 2,0 kg (EEB1; EEB2) y de 2,0 kg (EEB1) a 2,3 kg (EEB2).

Esta variación en los rendimientos y total de biocarbon obtenido está en relación con la pirólisis lenta. La pérdida de masa es porque la biomasa se degrada y se convierte en un sólido rico en carbono, junto con la generación de productos volátiles condensables y

no condensables (Wang et al., 2022; Kamarudin et al., 2022). Los estudios previos han demostrado que al aumentar la temperatura y el tiempo de incinera se reduce la cantidad de biocarbón, pero se crementan el área superficial y la microporosidad, mejorando su eficacia en la remediación de la contaminación del suelo y del agua (Kamarudin et al., 2022). Sin embargo, el biocarbón producido con una baja tasa de calentamiento ( $\leq 250$  C) presenta una menor superficie debido a la deformación, agrietamiento o bloqueo de los microporos (Kamarudin et al., 2022).

**Tabla 2.** Rendimiento y total de biocarbón obtenido de cáscara de cacao y estiércol bovino.

Variables	Ensayos	Cáscara de Cacao				Ensayos	Estiércol Bovino			
		Mínimo	Media	Máximo	P-valor		Mínimo	Media	Máximo	P-valor
Rendimiento (%)	ECC1	33,33	34,44	36,67	0,23	EEB1	66,67	66,67	66,67	0,23
	ECC2	23,33	30,00	33,33		EEB2	66,67	71,11	76,67	
	ECC3	33,33	35,56	36,67		EEB3	63,33	67,78	70,00	
Total Biocarbon (kg)	ECC1	1,00	1,03	1,10	0,37	EEB1	2,00	2,00	2,00	0,37
	ECC2	0,70	0,90	1,00		EEB2	2,00	2,13	2,30	
	ECC3	1,00	1,07	1,10		EEB3	1,90	2,03	2,10	

### Características químicas del biocarbón obtenido de cáscara de cacao y estiércol bovino.

La tabla 3, muestra los valores de las propiedades químicas: CE, pH medido en agua destilada, pH medido en KCL y alpha pH.

En el ensayo ECC1 obtenido a 200°C se registró el pico más alto de CE (1,22 dS/cm), mientras que en el ensayo ECC3 obtenido a 300°C, la CE fue menor (0,85 dS/cm). Para el caso del estiércol bovino, sucedió lo contrario el ensayo EEB1 registró un valor de 0,57dS/cm, menor a la CE de EEB3 (1,27 dS/cm). Esta diferencia de valores que indican presencia de sales relacionadas en el caso del cacao a las ligninas y para el estiércol a la urea, la incidencia de la temperatura ocasiona que se degraden en el caso del banano y en el estiércol se concentren. Pero en general los valores fueron similares a los obtenidas en otras investigaciones, aunque los valores de CE tienen una relación directa con el tipo de biomasa como es el caso de la madera de los árboles que por lo general sobrepasan los 10 dS/cm (Karim et al., 2015; Wang et al., 2015; Nanganoa et al., 2019). Por otro lado, Pérez Salas et al. (2013) expresan que el valor  $\leq 0,2$  dS/cm indica ausencia de sales en especial de elementos como el sodio.

Los valores de pH obtenidos del biocarbon de cacao oscilaron entre 9,04 (ECC3) a 10,51 (ECC1), rango considerado altamente alcalino. Efecto que se corrobora al medir el pH en KCL, donde los valores fueron entre 9,10 (ECC3) a 10,04 (ECC1). Mientras que los

valores de pH en estiércol bovino oscilaron entre 8,16 (EEB3) a 8,29 (EEB1), rango considerado altamente alcalino, valores que se repiten al medir el pH del biocarbón en KCL (8,23 en EEB3 y 8,37 en EEB1). Esto explica que a una temperatura mayor a 300 °C se produzca la reducción de compuestos ácidos (ácidos húmicos) y aumento de las bases alcalinas (K, Ca y Mg), este efecto incrementa el pH de las muestras (Yeboah et al. 2016). Los pH obtenidos de menor valor fueron en los biocarbones ECC3 y EEB3; esto explica, porque las ligninas se degradan a partir de los 450 °C y se produce un aumento de los grupos funcionales como los hidroxilos, que está relacionado la alcalinidad.

Los valores de alpha pH para ECC a temperaturas de 200°C y 250°C dieron valores de carga líquida electronegativas de -0,47 y -0,17, mientras que para la temperatura de 300°C dio un valor electropositivo de 0,06. En el caso de EEB a temperaturas de 200°C y 300°C fluctuaron valores de carga líquida electropositivas de 0,14 y 0,07, mientras que para la temperatura de 250°C dio un valor electronegativo de -0,04.

**Tabla 3.** Valores estimados de CE, pH medida en agua desionizada y en KCL, Alpha pH de biocarbón, donde CC: Cáscara de cacao; EB: Estiércol bovino y E: Ensayo

Ensayos	CC				EB			
	CE (dS/cm)	pH en H2O	pH en KCL	Alpha pH	CE (dS/cm)	pH en H2O	pH en KCL	Alpha pH
E1	1,22	10,51	10,04	-0,47	0,57	8,23	8,37	0,14
E2	0,90	9,14	8,97	-0,17	0,76	8,29	8,25	-0,04
E3	0,85	9,04	9,10	0,06	1,27	8,16	8,23	0,07

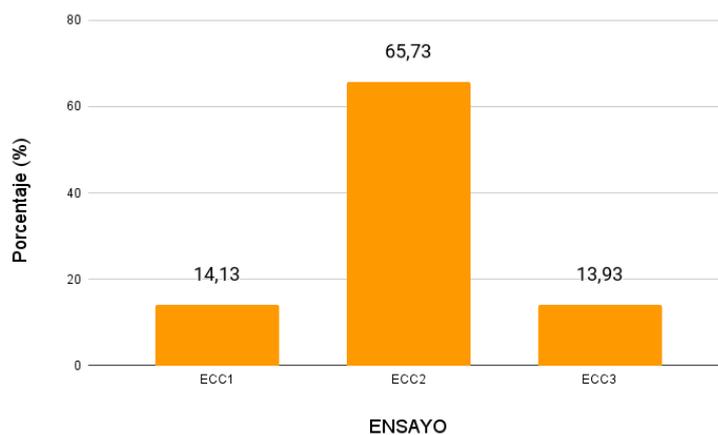
### Hidrofobicidad

Los valores de hidrofobicidad que se presentan en la Figura 1, fueron de menor a mayor fueron: 13,93 segundos (ECC3), 14,13 segundos (ECC1) y 65,73 segundos (ECC2) (Figura 1A). En el estiércol bovino los valores de menor a mayor fluctuaron de la siguiente manera: 10,80 segundos (EEB3), 23,00 segundos (EEB2) y 228,13 segundos (EEB1) (Figura 1B).

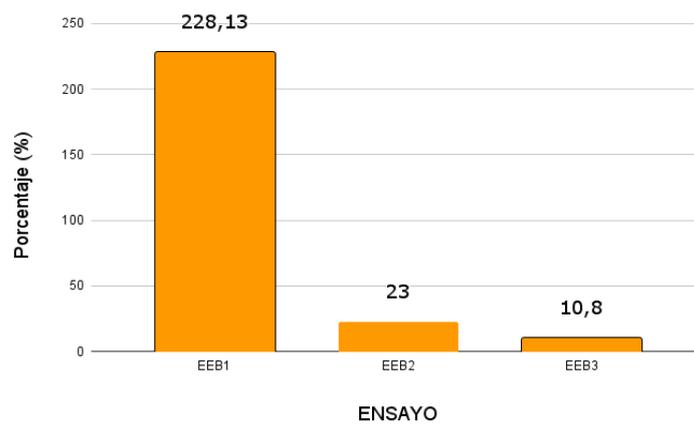
La composición de la biomasa que tiene una relación directa con el transporte del agua dentro de los vegetales es: celulosa, hemicelulosa y lignina (Darmayanti et al., 2019). La cantidad y estructura de estos componentes varían naturalmente entre diferentes materiales de biomasa, tanto entre especies como dentro de ellas, influenciadas por las condiciones de crecimiento y el estrés ambiental (Wang et al., 2022). Por ejemplo, se observó que la mazorca de maíz y la tuza de maíz presentaban menor contenido de lignina

y celulosa en ellas, así como diferencia en la comparación con el tallo de trigo, que en su composición contiene un alto porcentaje de hemicelulosa. En este caso la variación de las fibras lignocelulósicas es decisivo en la hidrofobicidad (Wang et al., 2022). Al ser la celulosa un polímero de glucosa, forma fibras estructurales en la pared celular de las plantas y de la biomasa, lo que significa que tiene afinidad por el agua y tiende a interactuar con ella. Por otro lado, la lignina es un polímero complejo y amorfo que proporciona rigidez y resistencia a la pared celular. La lignina es menos hidrofílica que la celulosa y tiene una mayor tendencia a ser hidrofóbica, lo que significa que repela el agua. En el caso del estiércol, pudo tener menos ligninas y la celulosa se degradó a los 300 grados de temperatura siendo menor hidrofóbica.

A)



B)

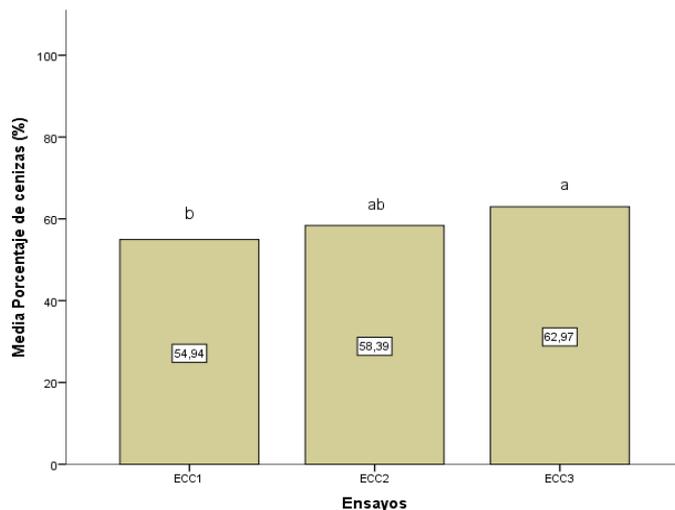


**Figura 1.** Hidrofobicidad por ensayos: a) Ensayo Cáscara de cacao (ECC); b) Ensayo Estiércol bovino (EEB).

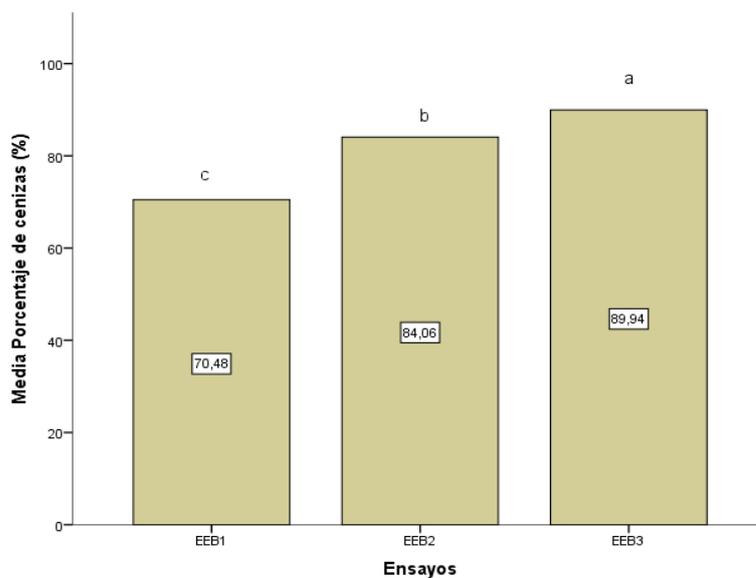
## Porcentaje de ceniza

Se muestra el porcentaje de ceniza de biocarbón de cacao y bovino por cada ensayo en la figura 2. Dada la Prueba de HSD de Tukey indicó diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) en biocarbón de cacao. Los valores de mayor a menor varían de la siguiente manera: 62,97% (ECC3), seguido de 58,39% (ECC1) y 54,94% (ECC2) (Figura 2a). En el biocarbon de bovino también se obtuvo diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) entre los ensayos, pero con valores superiores y que fluctuaron de la siguiente manera: 89,94% (EEB3), seguido de 84,06% (EEB2) y 70,48% (EEB1) (Figura 2b).

A)



B)



**Figura 2.** Porcentaje de ceniza por ensayos: a) Cáscara de cacao; b) Estiércol bovino.

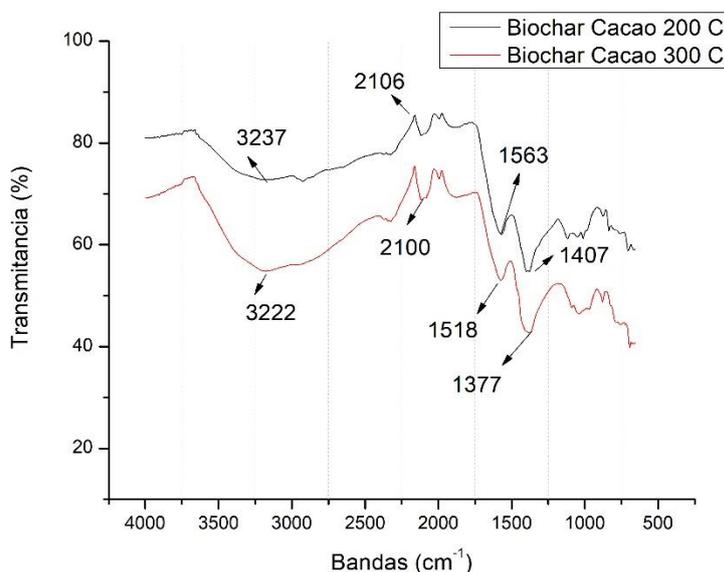
Nota: Las letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ )

### Análisis FTIR.

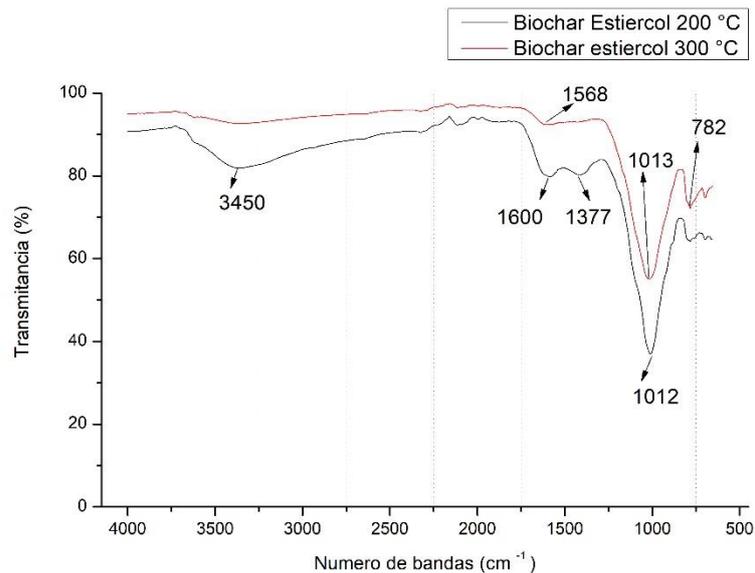
El análisis de IF de las muestras del biocarbón de cacao muestran en la Figura 3a. La vibración entre el rango de 3500 a 3000 indica un estiramiento característico de grupos funcionales -OH y -NH (grupos hidroxilos y amoniacal). Pico que está ausente en el biocarbón de estiércol obtenido a 300°C. Esta elongación del espectro también se relaciona con el contenido de humedad en las muestras (Figura 3b). En el caso del EEB 300°C, la pendiente se aplana, indicando que posee una menor cantidad de humedad y mayor cantidad de ceniza.

Entre las bandas de 1600-1580, indican picos de estiramiento de C = C y C = O, que corresponden a sustancias aromáticas como aminas y cetonas. En la banda de 1377, se obtuvo un estiramiento de COO (grupo carbonilo); mientras en 1080-1030, se encontró polisacáridos. La firma espectral corresponde a los determinados por (Tsai et al. 2020). Los espectros IR del biocarbón de estiércol fue similar al de cacao, entre la banda 1010 - 1050, el pico detectado puede estar asociado a la materia inorgánica (por ejemplo, enlace P-O y sulfatos inorgánicos PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), y también se encuentran estrechamientos con carbohidratos y alcoholes.

A)



B)



**Figura 3.** Espectros infrarrojos obtenidos por FTIR: a) Biocarbón de cáscara de cacao; b) Biocarbón de estiércol bovino.

### Conclusiones y recomendaciones

El mayor rendimiento de biocarbón se obtuvo a 250 °C obtenido de la biomasa de Estiércol Bovino. En todos los ensayos los biocarbón fueron altamente alcalino con una baja CE. El test de hidrofobicidad de la cáscara de cacao tuvo baja permeabilidad del biocarbón. Se obtuvo el mayor porcentaje de ceniza en el estiércol bovino a una temperatura de 300 °C. Se corroboró con el análisis de Infrarrojo que las muestras de cacao mostraron grupos funcionales carboxílicos.

En conclusión, la pirólisis de la cáscara de cacao y del estiércol bovino condujo a la producción de biocarbones con diferentes rendimientos, propiedades alcalinas, hidrofobicidad y grupos funcionales. Estas características pueden influir en las aplicaciones potenciales de los biocarbones en diversos campos, como la agricultura, la remediación ambiental o la producción de energía

Se recomienda el proceso de pirólisis a 300 °C por 30 minutos en reactores de pirólisis de doble fondo.

## Referencias bibliográficas

- Barrezueta Unda, S., & Sisalima Morales, P. (2021). Effects of biochar on plant development of *Theobroma cocoa L.* Revista Científica Agroecosistemas, 9(2), 86–91.
- Darmayanti, R.F. *et al.* (2019) «Lignocellulosic material from main Indonesian plantation commodity as the feedstock for fermentable sugar in biofuel production», *Journal of engineering and applied sciences* [Preprint]. Disponible en: [http://www.arpnjournals.org/jeas/research\\_papers/rp\\_2019/jeas\\_1019\\_7961.pdf](http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2019/jeas_1019_7961.pdf) (Accedido: 14 de diciembre de 2022).
- Fuentes Hernández, A. C., & Recio Recio, Á. (2005). Propuesta De Diseño De Un Horno–Reactor Para Realizar La Pirólisis De La Cáscara De Arroz. *Tecnología Química*, XXV(2), 87–98. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543747013>.
- Karim, A., Kumar, M., Mohapatra, S., Panda, C., & Singh, A. (2015). Banana Peduncle Biochar: Characteristics and Adsorption of Hexavalent Chromium from Aqueous Solution. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 7(1), 1–10.
- Kamarudin, N. S., Dahalan, F. A., Hasan, M., An, O. S., Parmin, N. A., Ibrahim, N., Hamzah, M., Zain, N. A. M., Muda, K., & Wikurendra, E. A. (2022). Biochar: A review of its history, characteristics, factors that influence its yield, methods of production, application in wastewater treatment and recent development. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 12, 7914–7926. <https://doi.org/10.33263/BRIAC126.79147926>
- Nanganoa, L. T., Yinda, G. S., Ndande, E. J., Mounoumeck, P. V., Levai, L. D., Okolle, J. N., & Ngosong, C. (2019). Integrated application of banana peduncle-derived biochar and fertilizer affect soil physicochemical properties and plant nutrient uptake. *Fundamental and Applied Agriculture*, 4(4). <https://doi.org/10.5455/faa.64828>.
- Li, Y., Gupta, R., Zhang, Q., & You, S. (2023). Review of biochar production via crop residue pyrolysis: Development and perspectives. *Bioresource Technology*, 369, 128423. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128423>
- Pérez Salas, R. A., Tapia Fernández, A. C., Soto, G., & Benjamin, T. (2013). The BioCarbon effect on *Fusarium oxysporum f. sp. cubense* and the banana plant development (Musa AAA). *InterSedes*, 14(27), 66–100.
- Tsai, W. T., Hsu, C. H., Lin, Y. Q., Tsai, C. H., Chen, W. S., & Chang, Y. T. (2020). Enhancing the pore properties and adsorption performance of cocoa pod husk (CPH)-Derived biochars via post-acid treatment. *Processes*, 8(2), 144.
- Unda, S. B., Muñiz, J. R., & Loaiza, H. A. (2022). Efecto del uso de abono orgánico con biocarbón sobre las características morfológicas de mazorca de *Theobroma cacao cv CCN51*. *Ciencia y Agricultura*, 19(2). <https://doi.org/10.19053/01228420.v19.n2.2022.14265>

- Wang, S., Gao, B., Zimmerman, A. R., Li, Y., Ma, L., Harris, W. G., & Migliaccio, K. W. (2015). Physicochemical and sorptive properties of biochars derived from woody and herbaceous biomass. *Chemosphere*, 134, 257–262.
- Wang, L., Olsen, M. N. P., Moni, C., Dieguez-Alonso, A., de la Rosa, J. M., Stenrød, M., Liu, X., & Mao, L. (2022). Comparison of properties of biochar produced from different types of lignocellulosic biomass by slow pyrolysis at 600° C. *Applications in Energy and Combustion Science*, 12, 100090. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666352X22000334>
- Yeboah, E., Asamoah, G., Kofi, B., & Abunyewa, A. A. (2016). Effect of Biochar Type and Rate of Application on Maize Yield Indices and Water Use Efficiency on an Ultisol in Ghana. *Energy Procedia*, 93, 14–18.
- Zheng, J., Wang, S., Wang, R., Chen, Y., Siddique, K. H. M., Xia, G., & Chi, D. (2021). Ameliorative roles of biochar-based fertilizer on morpho-physiological traits, nutrient uptake and yield in peanut (*Arachis hypogaea* L.) under water stress. *Agricultural Water Management*, 257, 107129. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2021.107129>