

OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE BIOCHAR A PARTIR DE HUESOS DE ORIGEN BOVINO

Natalia A. H. Aguilar¹; Leidy R. Niño¹; Edier H. Pérez¹; Claudia F. V. Raigoza²; Diego M. Sandoval²

¹ Grupo de Agroquímica, Departamento de Química, Facultad de Ciencias Naturales y de la Educación, Universidad del Cauca, Popayán, Cauca, Colombia.

² Grupo de Ciencia y Tecnología en materiales (Cytemac) Departamento de Física, Facultad de Ciencias Naturales y de la Educación, Universidad del Cauca, Popayán, Cauca, Colombia.

nataliaha@unicauca.edu.co

Palabras clave: Pirólisis, Biocarbón, Calcio y Fósforo.

Introducción

La degradación progresiva de los suelos agrícolas en Colombia ha reducido de manera significativa su capacidad productiva, afectando la seguridad alimentaria como el sustento económico de las comunidades rurales, en especial de pequeños productores¹. Este deterioro se relaciona con la perdida de materia orgánica, la disminución de nutrientes esenciales como calcio y fosforo indispensables para el óptimo desarrollo de los cultivos y en especial con el deterioro de las propiedades fisicoquímicas del suelo, todo esto afectando directamente la sostenibilidad agrícola².

De manera paralela, el país enfrenta una problemática ambiental que se asocia al manejo de residuos de la industria cárnica, que a nivel global genera aproximadamente 130×10^9 kg de residuos óseo anuales. Estos residuos suelen ser desechados en vertederos o eliminados mediante prácticas que liberan lixiviados contaminantes, generando olores desagradables y favoreciendo la proliferación de vectores³. Sin embargo, estos residuos constituyen un recurso mineral estratégico, debido a que contienen en promedio 120 g kg⁻¹ de fosforo y de 300 g kg⁻¹ de calcio, nutrientes esenciales para el desarrollo vegetal y de gran importancia para la seguridad alimentaria^{2,4}.

En este contexto, la obtención de biochar a partir de huesos bovinos mediante procesos de pirólisis, se plantea como una alternativa de valorización de residuos y de aporte a la agricultura sostenible. El biochar óseo presenta una elevada estabilidad estructural, con contenidos de hidroxiapatita en rangos de 57-80% y sales como carbonato de calcio entre 6-10%^{1,4}. Además puede alcanzar superficies específicas de hasta 90 m²g⁻¹, lo que confiere una alta capacidad de retención de fosforo, superior a la de biochar de tipo lignocelulósicos, actuando como fertilizante fosfatado de liberación lenta². Su aplicación en suelos agrícolas ha mostrado incrementos del 18-35% en el rendimiento de cultivos como maíz y sorgo, asociados a una mayor disponibilidad de fósforo y mejora de la capacidad de intercambio catiónico².

Mas allá de su función como fuente de nutrientes esenciales, el biochar de origen óseo actúa como sumidero de carbono estable. Se ha reportado que su incorporación en suelos agrícolas puede inmovilizar entre 0,5 y 1,2 t C ha⁻¹ año⁻¹, reduciendo las emisiones de CO₂ asociadas a la descomposición de biomasa fresca⁵. Adicionalmente, su elevada capacidad de adsorción le permite inmovilizar metales pesados como plomo, cadmio y arsénico, disminuyendo su biodisponibilidad y toxicidad para los cultivos⁴.

La valorización de residuos óseo, provenientes de la res, mediante proceso de pirólisis, permite obtener un biochar con alto contenido de minerales estratégicos como calcio y fosforo, además de una estructura estable y porosa que favorece su aplicación agrícola^{2,4}. En este sentido, el presente trabajo se orienta a la obtención y caracterización integral de un biochar derivado de huesos bovinos, con el fin de establecer las condiciones optimas de producción y maximizar su calidad y funcionalidad. Para ello, se caracteriza sus propiedades estructurales y fisicoquímicas empleando técnicas analíticas (espectroscópicas y ópticas). Esta aproximación permitirá determinar no solo las características mas relevantes del biomaterial, sino también su potencial como enmienda para suelos, efectos en la fertilidad del suelo y estrategias de manejo de nutrientes para la recuperación de suelos degradados.

Materiales y Métodos

Obtención de materia prima (Hueso blanco de origen bovino).

El hueso blanco de res se obtuvo de la plaza de mercado del municipio de Popayán, departamento del Cauca, Colombia, posteriormente se procesó en un biorreactor de tanque agitado, con el fin de eliminar el colágeno y tejidos blandos. Se dispuso en horno de convección a una temperatura de 105°C por 24 horas para deshidratar la muestra, por ultimo se trituraron los huesos en un procesador de alimentos.

Producción de Biochar de origen de hueso bovino

La muestra, previamente deshidratada, triturada y tamizada, fue sometida a un proceso de pirólisis a 350, 450, 550 y 650 °C, durante 1 y 2 horas para cada temperatura. Para ellos, se utilizó crisoles alúmina con tapa, los cuales fueron dispuestos en el interior de la mufla, asegurando en cada procedimiento una atmósfera con presencia reducida de oxígeno.

Caracterización del Biochar

La caracterización del biochar se abordó en dos niveles complementarios:

- a) Caracterización fisicoquímica: se determinaron parámetros como contenido de humedad, cenizas, capacidad de retención de agua, conductividad eléctrica, pH, rendimiento, con el fin de evaluar las propiedades iniciales del material.
- b) Caracterización estructural y composicional: se aplicaron técnicas instrumentales avanzadas FTIR-ATR, SEM-EDS, con el propósito de identificar los grupos funcionales presentes, la morfología superficial y la composición elemental. Esta información es clave para establecer la relación entre las condiciones de pirolisis y la calidad del producto final.

Esta caracterización en conjunto permite determinar el biochar de alta calidad fisicoquímica, estructural y con aporte significativo de nutrientes, para su posterior aplicación en el suelo y en el desarrollo vegetativo de una plántula de frijol calima.

Resultados y Discusión

Tabla N°1. Caracterización fisicoquímica de biochar obtenidos a diferentes condiciones de pirólisis

Biochar	Tiempo (horas)	% Rendimiento	% Humedad	% Capacidad de retención de agua	pH	Conductividad ms/cm	%Cenizas
350°C	1	24,06	6,24	83,86	6,679	2,39	0,67
	2	12,50	7,72	97,00	7,563	0,89	0,74
450°C	1	22,54	6,34	87,73	7,301	2,23	0,78
	2	10,08	7,82	85,79	7,777	0,88	0,79
550°C	1	39,84	5,57	108,48	8,237	2,13	0,82
	2	44,71	7,04	121,28	8,973	0,66	0,88
650°C	1	39,21	4,17	106,32	8,719	1,03	0,91
	2	42,93	6,61	109,36	9,102	0,45	0,95

Humedad: el contenido de humedad osciló entre 4,17 y 7,82%, mostrando una tendencia a disminuir a medida que aumenta la temperatura de pirolisis, especialmente en el biochar obtenido a 650°C (4,17% a 1 hora). Esto es consistente con la eliminación progresiva de agua y de compuestos volátiles a medida que se incrementa la temperatura. Los valores ligeramente más altos a 2 horas, por ejemplo (350 y 450°C) se podría asociar a una reabsorción higroscópica posterior al proceso.

Capacidad de retención de agua: se observó un incremento en esta variable con el aumento de la temperatura, alcanzando valores superiores al 120% en biochar de 550°C a 2 horas y 109% a 650°C a 2 horas. Esto sugiere que la mayor porosidad y superficie específica que se desarrolla a temperaturas intermedias-altas favorecen la absorción de agua. El incremento que se observa a 550°C indica que en este rango de temperatura se optimizan tanto la apertura de poros como una estabilidad estructural, lo que beneficia una retención hídrica en suelos agrícolas. La temperatura de pirolisis controla de forma sistemática la hidrofobicidad/hidrofilia y la capacidad de retención de agua de los biochar, siendo la temperatura una variable clave en retención de agua para distintos materiales de partida, incluida la madera y residuos agrícolas, y mostrando tendencia a mayor capacidad de retención de agua con aumento de temperatura hasta ciertos umbrales.⁶

pH: este aumentó progresivamente con la temperatura, pasando de valores ligeramente ácidos, cerca de la neutralidad (6,67 en 350°C a 1 hora) hasta fuertemente alcalinos (9,10 en 650°C a 2 horas). Este comportamiento es típico del biochar óseo, debido a la mayor concentración relativa de carbonatos, óxidos de calcio y fosfatos a medida que incrementa la temperatura. Un pH alcalino en este biomaterial ayuda a enmendar los suelos ácidos, contribuyendo con la neutralización y mejora de la disponibilidad de nutrientes.

Conductividad: los valores de CE oscilaron entre 0,45 y 2,39 mS/cm, con tendencia disminuir a mayores temperaturas y tiempo de pirolisis. El menor valor de conductividad en biochar 650°C, sugiere una reducción de sales solubles debido a la volatilización y estabilización de compuestos inorgánicos como sales. En cambio, los valores más altos en 350°C y 550°C (2,39 y 2,13 mS/cm) indican la presencia de sales más disponibles, sugiriendo un balance entre aporte de nutrientes y estabilidad química.

Cenizas: el contenido de cenizas aumentó con la temperatura y el tiempo, pasando de 0,66% (350°C a 1 hora), a 0,94% (650°C a 2 horas), reflejando la concentración progresiva de la fracción inorgánica (calcio, fosforo) a medida que se eliminan compuestos volátiles, su alto contenido de cenizas refleja su rol como fuente de nutrientes minerales, aunque en exceso puede reducir la fracción carbonosa servible.

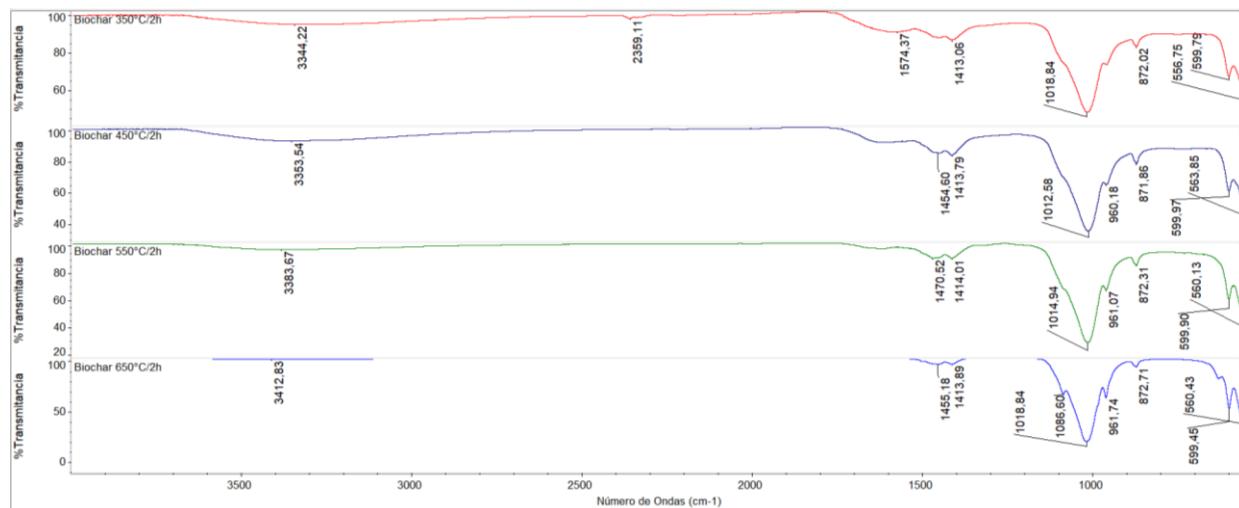


Figura N°1. Espectro FTIR-ATR, muestra de Biochar a 350, 450, 550°C a 2 horas.

Las figura N°1 muestran la evolución estructural del biochar óseo en función de la temperatura y tiempo. Se observa la claridad de las bandas características del grupo fosfato (PO_4^{3-}) propias de apatitas: ($1000\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$), ($\approx 960\text{ cm}^{-1}$) y ($\approx 560\text{--}600\text{ cm}^{-1}$). Estas bandas persisten en las cuatro temperaturas, indicando que la fase apatítica se mantiene tras la pirolisis a 2 horas. También se observan bandas carbonatadas claramente visibles ($\sim 1413\text{--}1470\text{ cm}^{-1}$ y $\sim 872\text{ cm}^{-1}$), lo que indica que hay carbonatos sustituidos en la estructura de la apatita. La presencia de la banda $\sim 872\text{ cm}^{-1}$ sugiere predominio de carbonato tipo B, CO_3^{2-} sustituyendo a PO_4^{3-} . Las señales de agua (-OH), banda ancha alrededor de $3340\text{--}3415\text{ cm}^{-1}$ y trazas de materiales orgánicos a temperaturas bajas $\sim 1570\text{ cm}^{-1}$ que disminuyen al aumentar la temperatura). Con el aumento de la temperatura las bandas de PO_4 tienden a afinarse y volverse más definidas, mejora aparente de la cristalinidad y las bandas orgánicas/trazas de agua disminuyen.

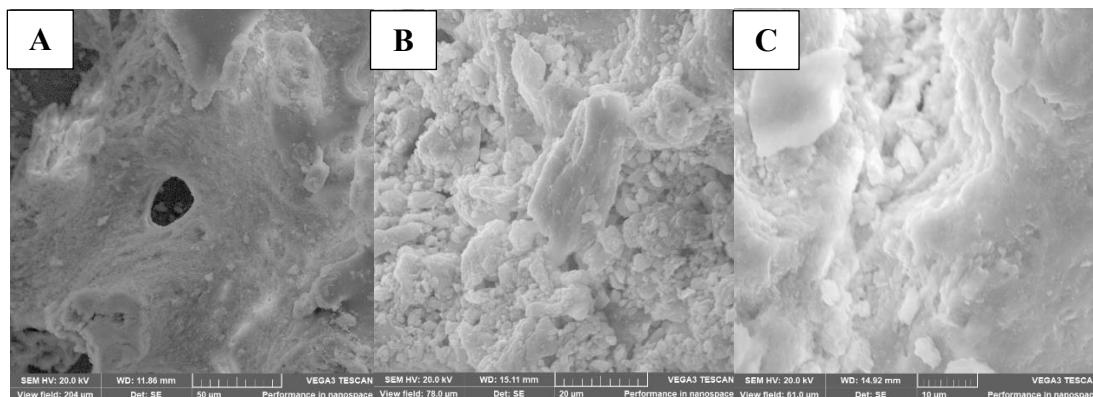


Imagen N°3. Espectroscopia electrónica de barrido SEM, muestra de Biochar obtenido en 2 horas a **A.** 350°C, **B.** 450°C y **C.** 550°C.

En las micrografías SEM se observa que a baja temperatura de pirolisis (A) el biochar presenta geometría irregular, superficie rugosa y cavidades incipientes sin desarrollo de una red de poros definida. A temperatura intermedia (B) la morfología se fragmenta en partículas más angulosas, con aparición de micro canales conectados y cavidades abiertas, lo que sugiere un inicio de desarrollo poroso. Finalmente, a mayor temperatura y tiempo de residencia (C), la superficie evidencia mayor rugosidad y formación de micro-mesoporos, asociados a la liberación de gases y degradación de materia orgánica, junto con zonas colapsadas que reflejan una transformación progresiva de la matriz carbonosa.

Tabla N°2. Composición Elemental por EDS de biochar de hueso bovino a diferentes condiciones de pirolisis

Biochar	Tiempo	P	Ca	C	O
350°C	1H	5,23	26,52	26,95	20,12
	2H	8,29	18,61	43,2	25,52
450°C	1H	9,44	22,61	30,77	27,71
	2H	14,46	35,87	14,96	25,37
550°C	1H	14,50	35,93	14,91	25,34
	2H	13,75	29,34	11,96	40,36

El análisis EDS evidencia que la composición del biochar varía significativamente con la temperatura y el tiempo, el aumento de estas dos variables reduce la fracción carbonosa y enriquece la matriz en contenido de calcio, fosforo y oxígeno, confirmando la progresiva transformación del biochar en un material con características más minerales y potencial para aplicaciones en suelos como enmienda rica en fosforo y calcio.

Conclusión

La caracterización del biochar de origen óseo, permite establecer la calidad del biochar en función de los requerimientos del suelo que se busca enmendar. En términos generales, se evidencia que la pirolisis a temperaturas entre 450 y 550°C y tiempos de 1 y 2 horas, permite obtener materiales con propiedades fisicoquímicas y estructurales adecuadas para su aplicación como enmiendas agrícolas.

En este contexto, el biochar producido a 450°C por 2 horas se destaca por su mayor contenido de fosforo, lo que lo convierte en una alternativa prometedora para mejorar la fertilidad del suelo, mientras que a 550°C (1 y 2 horas) predomina la estabilidad estructural, el incremento de pH y la mayor porosidad, son características deseables para la corrección de suelos ácidos y la mejora de sus propiedades fisicoquímicas. Estos resultados permiten concluir que el biochar óseo presenta alto potencial como enmienda sostenible, combinando capacidad de aporte de nutrientes y mejora en la calidad del suelo.

Agradecimientos

Vicerrectoría de Investigaciones (VRI) de la Universidad del Cauca y Laboratorio de biotecnología y microbiología de la red Tecnoparque SENA- Popayán, Colombia

Referencias

- [1] BAYATA, A.; MULATU, G. Effect of Bone Char Application on Soil Quality, Soil Enzyme and in Enhancing Crop Yield in Agriculture: A Review. *American Journal of Chemical Engineering*, 12, 13–28, 2024. <https://doi.org/10.11648/j.ajche.20241202.11>.
- [2] AMIN, A. E. E. A. Z. Using Bone Char as a Renewable Resource of Phosphate Fertilizers in Sustainable Agriculture and its Effects on Phosphorus Transformations and Remediation of Contaminated Soils as well as the Growth of Plants. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24, 6980–6998, 2024.
- [3] OKAFOR, O. C.; NJOKU, C.; NWOJJI, M.; AKWUEBU, A. N. Evaluation of Pollution Potentials of Slaughterhouse Effluents on Groundwater Qualities in Ebonyi State Southeast Nigeria. *Environmental Forensics*, 2024. <https://doi.org/10.1080/15275922.2024.xxxxxx>.
- [4] CASTRO, G. F. de; DUARTE, V. G. de O.; BALLOTIN, F. C.; ROCHA, B. C. P.; REZENDE, I. F.; MATTIELLO, E. M.; VALE, L. P. R. do; OLIVEIRA, G. S. de; SILVA, R. C. da; TRONTO, J. Bone Char: Characterization and Agronomic Application as an Alternative Source of Phosphorus. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 48, e0230165, 2024.
- [5] KUSMAN, H.; MULYATI, M.; SUWARDJI, S. El uso de biochar para mejorar la calidad del suelo y servicios ambientales. *Jurnal Biologi Tropis*, 24(4), 147–156, 2024.
- [6] MARSHALL, J. A.; MUHLACK, R. A.; MORTON, B. J.; DUNNIGAN, L.; CHITTLEBOROUGH, D. J.; KWONG, C. W. Effects of Pyrolysis Temperature on Biochar–Water Interactions and Their Application for Improving Soil Water Holding Capacity in Vineyards. *Soil Systems*, 3(2), 27, 2019.