

Evaluación de lodos orgánicos carbonizados para mejoramiento de suelos

Evaluation of carbonized organic sludge for soil improvement

Graciela C. Sánchez¹, Joisleen M. Ramírez¹, Arthur James^{2*}, Euclides Deago³, José Villarreal⁴

¹Licenciatura en Ingeniería de Energía y Ambiente, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá,

²Departamento de Energía y Ambiente, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá, ³Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas, Departamento de Hidráulica, Sanitaria y Ciencias Ambientales, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá, ⁴Laboratorio de Fertilidad de Suelo, IDIAP CIA Divisa- Carretera Panamericana

Resumen Los lodos orgánicos son el desecho sólido de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Actualmente, la PTAR de la ciudad de Panamá vierte al relleno sanitario Cerro Patacón 70 Tm/día de este. La carbonización de estos residuos en un gasificador de flujo ascendente se presenta como una alternativa para el aprovechamiento de estos en aplicaciones agrícolas. El biocarbón obtenido podría mejorar las características fisicoquímicas del suelo, ya que en el país 27 % de estos se encuentran degradados. Este estudio tiene como objetivo evaluar la carbonización de lodos orgánicos para su utilización en los suelos. Se pudo identificar que los lodos orgánicos solos no se lograron carbonizar, debido al poco material volátil que poseen. Se observó que al agregar 25 % de cascarilla de arroz, se aportó materia volátil para que las reacciones exotérmicas liberaran suficiente energía para la carbonización de los residuos orgánicos. El proceso de carbonización presentó una productividad promedio de 46.83 wt%. La caracterización mostró el aumento de nutrientes esenciales en el carbón, como calcio, fósforo y potasio. Sin embargo, el nitrógeno, carbono y materia orgánica disminuyeron. Los resultados de este estudio demostraron que una mezcla carbonizada de lodos orgánicos y cascarilla de arroz podría contribuir a mejorar las propiedades del suelo.

Palabras clave Biocarbón, biomasa, carbonización, cascarilla de arroz, gasificador de flujo ascendente, lodos orgánicos, TLUD.

Abstract Organic sludge (WWTP) is the solid waste from wastewater treatment plants. Currently, the Panama City WWTP discharges 70 Mt/day of this to the Cerro Patacon sanitary landfill. The carbonization of these residues in an updraft gasifier is presented as an alternative material for agricultural applications. The biochar obtained could improve the physicochemical characteristics of the soil, since 27% of these are degraded in the country. This study aims to evaluate the carbonization of organic sludge for use in soils. It was possible to identify that the organic sludge alone could not be carbonized due to the little volatile material. It was observed that when adding 25% of rice husk, the volatile matter of the organic sludge and rice husk mixture increased. As a result, the exothermic reactions received enough fuel for the carbonization of the organic residues. The carbonization process presented average productivity of 46.83 wt%. The characterization showed an increase in essential nutrients in biochar, such as phosphorus and potassium. However, nitrogen, carbon, and organic matter decreased. The results of this study showed that a carbonized organic sludge and rice husk mixture could contribute to improving the properties of the soil.

Keywords Biochar, biomass, carbonization, rice husk, top-lit updraft gasifier, organic sludge, TLUD.

* Corresponding author: arthur.james@utp.ac.pa

1. Introducción

El uso de biocarbón con propósitos agrícolas se remonta a cientos de años. Se evidencia su uso en la Amazonia, la cual posee un tipo de suelo muy fértil, llamado Terra Preta [1]. Dichas tierras eran utilizadas para cultivo y observaron que la productividad era mayor que en las regiones aledañas. Los análisis indicaron que estos suelos poseían un alto contenido de carbono (C), fósforo (P), calcio (Ca) y potasio (K) [1]. El biocarbón es capaz de mejorar las propiedades del suelo, la

retención de agua, disminuyendo metales pesados y contaminantes. Este material rico en carbono aumenta el intercambio de nutrientes entre la planta y los microorganismos. A través de su aplicación, se puede incrementar el contenido de carbono orgánico (C.O), fósforo (P) y potasio (K), esto contribuye a la restauración de los suelos no fértiles [1],[2]. El calcio (Ca), sílice (Si), y magnesio (Mg), contenidos en el biocarbón protegen a la planta de la degradación y mejoran su sistema respiratorio [1]. La subsecuente captura de carbono es uno de los aportes más

significativos que este realiza [1]. El biocarbón es obtenido al carbonizar la biomasa, la cual es la materia orgánica que se encuentra en las plantas, animales y seres humanos, que puede ser aprovechada para extraer energía mediante diferentes procesos termoquímicos como la pirólisis y la gasificación [3]. En el caso de la gasificación, la biomasa, mediante un agente oxidante, realiza una combustión incompleta, en donde se somete a una serie de etapas, como secado, pirólisis, oxidación y reducción. Los productos de esta reacción son: biocarbón, gas de síntesis y alquitrán [3]. La carbonización también se puede dar mediante la pirólisis lenta en limitada presencia de oxígeno y por medio del calor, se fragmenta la biomasa, permitiendo su conversión a un material granulado y rico en carbono [3], [4].

Los lodos orgánicos son biomasa residual de origen biológico, estos son el desecho sólido de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Estos, al ser carbonizados podrían liberar nutrientes y minerales al suelo en menos tiempo, comparado con biomasa residual de origen vegetal carbonizada, como los troncos de madera y paja [3]. Los lodos orgánicos están compuestos de materia orgánica y nutrientes importantes como zinc (Zn), níquel (Ni), cobre (Cu), cromo (Cr) y selenio (Se) [5].

En Panamá, se vierten aproximadamente 70 Tm/día de lodos orgánicos al relleno sanitario Cerro Patacón, proveniente de la PTAR de la Ciudad de Panamá [5]. Por lo tanto, existe una creciente preocupación, ya que estos al ser mezclados con otros desechos no degradables, generan un problema de gestión de residuos, contaminan el suelo, aguas subterráneas y superficiales. Por tanto, al incinerarse incrementan las emisiones de gases efecto invernadero [6]. En Panamá, 25 % del total de los lodos orgánicos es aprovechado como abono, 38 % es vertido al relleno sanitario Cerro Patacón, 13 % es incinerado y el resto es depositado en el terreno de las PTAR [7]. Aproximadamente, 40% del territorio panameño posee suelos alisoles y acrisoles, los cuales presentan alta acidez y elevadas proporciones de aluminio (Al). Por ende, como una de las alternativas para mejorar la fertilidad del suelo se incide en malas prácticas de producción agrícola. Esto sucede al utilizar productos químicos para tratar de enmendar la carencia de nutrientes del suelo que a largo plazo son perjudiciales [8]. Siendo los lugares más críticos, Cerro Punta, la Comarca Ngöbe Buglé, la Sabana Central Veraguense y el Arco Seco [9].

El objetivo de este trabajo es carbonizar los lodos orgánicos de la PTAR de la Ciudad de Panamá en un gasificador de flujo ascendente tipo top-lit updraft (TLUD) para producir biocarbón y evaluar sus propiedades para ser utilizados en el mejoramiento de los suelos de Panamá.

2. Materiales y métodos

En esta sección se presentarán los materiales y la metodología utilizada para la recolección y procesamiento de los lodos orgánicos. De igual manera, se indicarán los equipos

utilizados para la carbonización de la materia prima y los análisis realizados al biocarbón.

2.1 Materia prima

2.1.1 Lodos orgánicos

Los lodos orgánicos fueron obtenidos de la PTAR de La Ciudad de Panamá (Figura 1A). Estos residuos son estabilizados en su etapa de disposición final y de esta manera son vertidos al relleno sanitario Cerro Patacón. La estabilización consiste en agregar óxido de calcio (CaO) en dosificación de 0.30 lb CaO/lb de lodo seco [5]. El óxido de calcio es un compuesto que elimina los organismos patógenos y tiene la capacidad de aumentar el pH. En un análisis realizado por el Laboratorio Water and Wastewater Treatment, se utilizó la metodología SM 2540 G [10] para determinar la disminución de los sólidos volátiles, esta mostró que estos se reducen de 67.1% a 37.9%. Además, los metales pesados contenidos en el lodo orgánico disminuyeron significativamente. Por lo que, al ser vertidos, son seguros y apropiados para utilizarlos como abono o producto agrícola según la norma DGNTI-COPANIT 47-2000 de Panamá [5]. Los lodos orgánicos estabilizados fueron secados 15 días a temperatura ambiente (Figura 1B) y luego llevados a un horno a una temperatura de 250°C por 2 horas (Figura 1C).



Figura 1. Recolección y pretratamiento del lodo orgánico.
Fuente: Propia.

2.1.2 Cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz se obtuvo del Molino Doferra S.A., ubicado en Panamá, corregimiento de la 24 de diciembre. Este es un desecho agroindustrial generado en grandes cantidades. Aproximadamente 1,534,610 Tm/año, de un área cultivada de 93,200 Ha. En la actualidad este residuo es de poco aprovechamiento.

La cascarilla de arroz posee propiedades como sustrato orgánico de baja tasa de descomposición, es liviano, de buen drenaje y aireación. Además, contiene 85 % de materia orgánica, compuesta principalmente de celulosa, lignina y silosa [11].

2.2 Ensayo experimental

Para los experimentos se utilizó una mezcla de 25 % de cascarilla de arroz y 75 % de lodos orgánicos estabilizados, previamente secados. Además, se utilizaron tamizadores de 4 mm y 2 mm para reducir el tamaño de los lodos orgánicos. La masa promedio que se vertió en el gasificador fue de 1.9 kg. Se realizaron dos réplicas de este experimento.

El gasificador de flujo ascendente (TLUD) cuenta con un diámetro interno de 10.16 cm y una altura de 123.19 cm. En el esquema del gasificador utilizado (figura 2A), se muestran las partes que conforman el equipo y el proceso de conversión de la materia prima en biocarbón. El gasificador utilizado en el laboratorio, se muestra en la figura 2B.

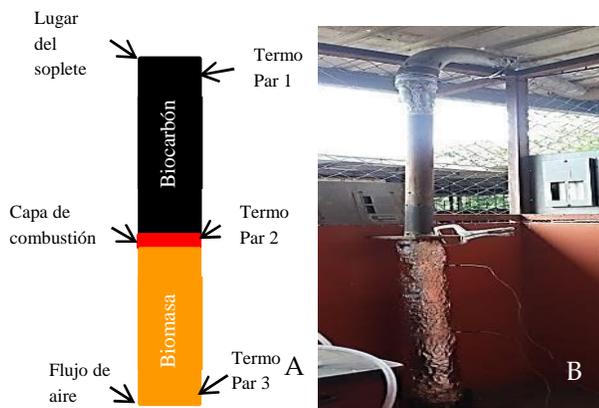


Figura 2. Gasificador de flujo ascendente (top-lit updraft) ubicado en el Laboratorio de Biodiésel de la Universidad Tecnológica de Panamá.
Fuente: Propia.

Se suministró aire con un compresor de 1,5HP – 150 psi de presión de operación máxima y de 6 galones de reserva (BRIGSS & STRATTON). El flujo de aire se evaluó a 20 L/min y se controló con un medidor de flujo de área montado en aluminio RITEFLOW® FLOWMETERS de BEL-ART (Wayne, NJ, EE. UU.), escala 150 mm, tamaño N°4 a una presión de 200 psi. Se utilizó un termopar tipo K (diámetro de 1/8 pulg) en la parte superior del gasificador. Las temperaturas se registraron con un sistema de adquisición de datos (Onset, modelo UX120) y para la obtención de estas, se utilizó el software HOB0® (3.7.19, Bourne, MA, EE. UU).

Las mezclas se vertieron en el gasificador hasta cubrir la parte superior del mismo, procurando una pequeña inclinación que facilitará el encendido de la biomasa con un soplete de propano durante 1 min la biomasa. El calor del soplete proporciona la energía para la combustión y pirólisis que inician la conversión de la biomasa en biocarbón. El aire se induce desde la parte inferior a la superior del gasificador. La zona de combustión desciende y la biomasa se fragmenta a causa del calor y posteriormente se carboniza [12]. Cuando la llama llega al fondo del gasificador, se detiene el experimento y se procede a la recolección del biocarbón.

La productividad del biocarbón húmedo (PHB) se obtiene a partir de la siguiente ecuación

$$PBH = \frac{\text{Masa del biocarbón}}{\text{Masa de la biomasa}} * 100\% \quad (1)$$

2.3 Técnicas de análisis

A los lodos orgánicos y cascarilla de arroz se le realizaron distintas técnicas de análisis entre ellas, análisis próximo. Este consiste en medir los parámetros de humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo. Este análisis se efectuó en el Laboratorio de Análisis Industriales y Ciencias Ambientales (LABAICA), utilizando la metodología del libro Métodos estándar “para el examen de agua y aguas residuales”, 23 RD edición. Otros análisis fueron realizados en el Laboratorio de Fertilidad de Suelo del Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá (IDIAP). Estos correspondieron a pH, carbono orgánico (C.O), nitrógeno (N), óxido de fósforo (P2O5), óxido de potasio (K2O), óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO), Manganeseo (Mn), hierro (Fe), cobre (Cu) y zinc (Zn), los cuales fueron determinados por medio de un espectrofotómetro de absorción atómica de fuente continua, marca Analytik Jena (AA300, Alemania).

La materia orgánica de la muestra se analizó a través de la metodología de digestión húmeda de Walkley-Black, determinada colorimétricamente en un espectrofotómetro de luz visible, en el cual, la muestra es oxidada con una solución establecida de dicromato de potasio y ácido sulfúrico. La materia orgánica que no ha sido capaz de reducir el dicromato es cuantificada por medio de un indicador de difenilamina y una solución de sulfato ferroso, y por colorimetría se cuantifica el color del ácido crómico reducido [13]. Los cambios morfológicos en la superficie de la muestra se analizaron con la tecnología de microscopía electrónica de barrido (SEM, ZEISS, EVO 40, Alemania) a 22kV. La composición química del biocarbón en base a la masa molar de cada elemento que lo conforma fue analizada con la tecnología de espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (EDX) Bruker Nano GmbH (Zeiss Evo 40 VP, Alemania) [14]. Estos análisis se realizaron en el Laboratorio Earl S. Tupper del Smithsonian Panamá.

3. Resultados y discusión

Los lodos orgánicos solos (100 % lodos orgánicos), dificultaron las reacciones exotérmicas que liberan energía térmica para carbonizar la biomasa, por lo que no se logró la combustión de estos. Estos mantenían en la superficie un color oscuro, mientras que en el interior un color marrón. Se infiere, que esto fue debido a la baja cantidad de sólido volátil que contiene el lodo estabilizado. Además, los grandes tamaños del lodo orgánico (antes de ser tamizados) dificultaron la transferencia de calor en el proceso [3]. Por lo tanto, se

seleccionó la cascarilla de arroz para mezclarse con el lodo orgánico y carbonizarse debido a la gran generación de este residuo en Panamá. La cascarilla de arroz posee un alto contenido de materia volátil. Por lo tanto, se realizó la mezcla de 25% cascarilla de arroz y el resto lodos orgánicos, para dar lugar a que las reacciones exotérmicas liberaran suficiente calor para carbonizar la biomasa.

3.1 Análisis próximo

En el análisis próximo (tabla 1), el lodo orgánico presentó un alto contenido de cenizas de 41.28 %, mientras que la cascarilla de arroz de 23.78%. Las cenizas indican la presencia de materia orgánica [12].

No obstante, la cascarilla de arroz presentó un alto contenido de materia volátil de 58.17 %, mientras que el lodo orgánico 50.26 %, lo que coincide con los resultados obtenidos por Hong, et al. 2013 [15]. Además, el lodo orgánico presentó un bajo contenido de humedad de 0.40 % debido al pretratamiento de secado que se realizó, no obstante, la cascarilla de arroz presentó 8.48 %.

Tabla 1. Análisis próximo de la materia prima: lodo orgánico y cascarilla de arroz.

Parámetros	Lodo orgánico Estabilizado (%)	Cascarilla de arroz [11] (%)
Humedad	0.40	8.48
Cenizas	41.28	23.78
Materia Volátil	50.26	58.17
Carbono Fijo	8.06	9.57

3.2 Productividad del biocarbón

La productividad promedio del biocarbón obtenido de la mezcla de 75 % de lodos orgánicos y 25 % cascarilla de arroz fue 46.83 wt %. En la figura 3A, se presenta la mezcla de cascarilla de arroz y lodos orgánicos tamizados. La figura 3B muestra el biocarbón obtenido.

La temperatura máxima promedio fue de 833.61°C. En la figura 4 se muestra el perfil de temperaturas con respecto al tiempo del biocarbón de 75% lodos orgánicos y 25% cascarilla de arroz.

La temperatura de carbonización es de gran importancia para determinar los nutrientes del biocarbón [1], ya que estos pueden disminuir en el proceso de volatilización. La temperatura de volatilización para el carbono es de 100°C, para el nitrógeno hasta 200°C, mientras, P y K pueden volatilizarse hasta 800°C y los nutrientes como Mn, Mg y Ca se volatilizan a temperaturas mayores a 1000°C [16]. Un estudio demostró que, en el biocarbón de lodos orgánicos, el contenido de N, M.O y la productividad disminuyó, al aumentar las temperaturas de 300°C a 700°C. No obstante, el contenido de K, P, Zn, Mn, Mg, Cu, Ca, Fe aumentó con la carbonización [17].



Figura 3. Lodos orgánicos y cascarillas de arroz antes (3A) y después (3B) de ser carbonizados con una composición de 75 % lodos orgánicos y 25 % cascarilla de arroz.

Fuente: Propia.

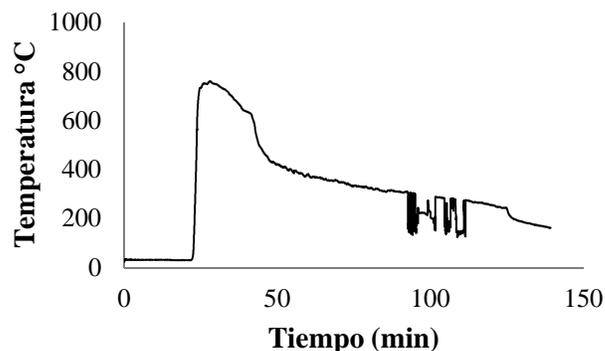


Figura 4. Perfil promedio de temperaturas de la carbonización de 75 % lodos orgánicos y 25 % cascarilla de arroz, obtenida mediante el sistema de adquisición de datos.

Fuente: Propia.

3.3 Caracterización química del biocarbón respecto al suelo

Los análisis realizados para identificar propiedades beneficiosas del biocarbón en el suelo se encuentran en la Tabla 2. En esta se presenta la composición de la cascarilla de arroz, el lodo orgánico deshidratado (L. deshidratado), el lodo orgánico estabilizado (L. estabilizado) al cual se le agregó CaO y el biocarbón obtenido de la mezcla de 75% lodos orgánicos y 25% cascarilla de arroz (Biocarbón).

En el lodo orgánico estabilizado el pH aumentó de 6.7 a 10.8 comparado con el L. deshidratado, debido a que se agregó el agente estabilizador (CaO) al (L. Estabilizado). En el biocarbón el pH se mantuvo a 10.8. El óxido de calcio (CaO) en los lodos estabilizados es mayor que en los lodos deshidratados (16.79% y 1.54%, respectivamente). Asimismo, CaO aumentó en el lodo orgánico estabilizado de 1.54 % a 16.79 % comparándolo con el lodo deshidratado. En la carbonización, la cantidad de este compuesto aumentó por lo que el biocarbón presentó 27.5 % de CaO.

Tabla 2. Composición química de biocarbón, lodos orgánicos y cascarilla de arroz

No. Muestra	pH	C.O (%)	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	MgO (%)	M. O (%)	Mn mg/l	Fe mg/l	Zn mg/l	Cu mg/l
Cascarilla de Arroz	5.8	4.60	0.64	0.05	0.44	0.24	0.06	7.94	147	1170	78	15
L. Estabilizado	10.8	3.15	4.90	3.06	0.25	16.79	1.68	5.43	38	1840	550	110
L. Deshidratado	6.7	4.35	6.14	2.48	0.25	1.54	0.90	7.50	32	3070	750	160
Biocarbón	10.8	1.34	0.36	3.47	0.39	27.5	3.67	2.30	68	2120	1040	150

El contenido de P₂O₅ en el L. estabilizado fue de 3.06 %, mientras que en el biocarbón aumentó a 3.47 %. De igual manera, el contenido de K₂O en el L. deshidratado y L. estabilizado se mantuvo en 0.25 %. No obstante, incrementó a 0.39 % en el biocarbón.

La cantidad de MgO en el biocarbón aumentó respecto a los lodos estabilizados de 1.68 % a 3.67 %. Sin embargo, la cantidad de carbono orgánico, nitrógeno y materia orgánica, disminuyó.

Estos se encuentran en mayor cantidad en el lodo deshidratado, se infiere que al agregar el agente estabilizador se eliminó gran cantidad de elementos orgánicos. Además, de la desvolatilización de estos elementos durante la combustión.

La cascarilla de arroz en su composición presentó 4.60 % de C.O y 7.94 % de M.O, mientras que el lodo estabilizado presentó 3.15 % C.O y 5.43 % de M.O. En cambio, el biocarbón obtuvo 1.34 % de C.O y 2.3 % de M.O con lo que se observa una disminución. Sin embargo, este resultado es de gran importancia, ya que la materia orgánica contribuye a la fertilidad al suelo [18].

El N es el macronutriente que disminuyó en mayor proporción de 4.90 % en el L. estabilizado a 0.36 % en el biocarbón. Las bajas temperaturas de carbonización aumentan la disponibilidad de N en el biocarbón.

La nitrificación del suelo puede mejorar en presencia de biocarbón comparado con otros productos que realizan esta función [19].

La cantidad de Mn aumentó en el biocarbón (68 mg/L), en comparación con el lodo estabilizado (38 mg/L). Se infiere que se debe al aporte de la composición de la cascarilla de arroz, el cual contiene 147 mg/L de Mn. Por otro lado, el contenido de Fe, Zn y Cu aumentó en el biocarbón en cantidades de 2120 mg/L, 1040 mg/L, 150 mg/L, respectivamente, comparado con el lodo estabilizado que presentó 1840 mg/L, 550 mg/L, 110 mg/L de Fe, Zn y Cu, respectivamente.

La cantidad de Fe que presentó la cascarilla de arroz en su composición fue de 1170 mg/L, la cual fue elevada respecto a los demás micronutrientes. Además, el lodo orgánico deshidratado obtuvo una disposición de 3070 mg/L que disminuyó a 1840 mg/L al estabilizar el lodo. La cascarilla de arroz como el lodo orgánico presentaron gran cantidad de este

micronutriente, por lo que el biocarbón presentó mayor cantidad de este comparado con los demás microelementos. Este no es perjudicial al suelo si se suministra en pequeñas cantidades, ya que es un micronutriente esencial [20]. El segundo microelemento en mayor cantidad es el Zn, el cual se encontró en niveles altos comparado con Mn y Cu. Este favorece al suelo, ya que es un fertilizante natural [21]. Además, mapas de fertilidad de los suelos de Panamá elaborados en IDIAP por Villarreal et al. [22], demostraron que el Zn es un micronutriente deficiente en casi 90% de los suelos del país. El biocarbón obtenido podría ser utilizado como abono o para usos agrícolas según la norma DGNTI-COPANIT 47-2000 de Panamá [5].

Un estudio realizado por el IDIAP sobre la fertilidad de los suelos de Panamá, indica la importancia del pH respecto a los nutrientes que se encuentren en él. Los suelos con pH bajos tienen mayor disponibilidad de Al, Fe, Mn, Cu y Zn, mientras que carecen de K, Ca, Mg, M.O, y P [22].

El P del biocarbón, provoca que las raíces aumenten su tamaño y se adhieran al suelo, lo que incrementa la absorción de nutrientes [19]. Sin embargo, actualmente los suelos ácidos fijan P por medio de fertilizantes químicos, los cuales poseen altas proporciones de Fe y Al. Estos elementos actúan sobre el suelo y logran reaccionar químicamente con el ion fosfato de hidrógeno (H₂PO₄) provocando una disminución de pH [23]. Cabe destacar que en los suelos de Panamá la M.O es escasa y esto coincide en las regiones donde hay mayor uso de la tierra para el cultivo [22]. Esto se debe a el uso excesivo de fertilizantes y sustancias químicas, que a largo plazo inhiben la capacidad del suelo de retener nutrientes. Sin embargo, el biocarbón puede incrementar la presencia de nutrientes y retenerlos por periodos largos [19].

El CaO y el P₂O₅ presentes en el biocarbón al complementarse inhiben la formación de fosfatos complejos de Fe y Al, los cuales actúan en contra del crecimiento de la raíz de la planta [18]. El CaO reacciona con el P del suelo, resultando fosfatos de calcio, el cual neutraliza y aumenta el pH del suelo [18], [19], [24]. El uso del biocarbón podría ahorrar costos, ya que no se requeriría técnicas agropecuarias adicionales, como ocurre actualmente [19].

El Mg, al igual que el Ca, se utiliza como correctivo de acidez, ya que es neutralizador [24]. El biocarbón obtenido presenta un aumento significativo de estos macroelementos, por lo que su uso podría ser una forma transitable para el cambio del pH. Además, al estar presentes como óxidos, tienden a reaccionar de forma más rápida en contacto con la humedad de los suelos [24], por lo que se podría obtener el resultado de una mejora a corto plazo.

En Panamá, los suelos contienen cantidades elevadas de Al, esto indica los niveles de acidez en lo que se encuentran los suelos. Al mismo tiempo, posee en niveles medios Fe y Mn, los cuales son controlados utilizando la técnica de encalado, utilizada para aumentar el pH del suelo y corregir efectos negativos por [22]. Además, en el territorio panameño existe una deficiencia de Zn. Asimismo, de macronutrientes como Ca y P son muy bajos en toda la región, esto indica la poca fertilidad del suelo, mientras que K y Mg se encuentran en niveles medios [22].

En un estudio se encontró una fuerte evidencia de la eficiencia del biocarbón obtenido de lodos orgánicos, cuando este se aplicó a un “césped urbano” se obtuvo un aumento en el N del, el C, O, P y K en el suelo. Además, la biodisponibilidad de los metales pesados presentes en el suelo disminuyó al agregar el biocarbón, debido a sus componentes inorgánicos que inducen a la precipitación de estos y el incremento de la descomposición microbiana del suelo [25].

3.4 Caracterización de espectroscopia de dispersión de rayos X

En la figura 5, se presenta la caracterización emitida por espectroscopia de dispersión de energía de rayos X, donde se observó que el mayor elemento del biocarbón obtenido fue el oxígeno. Se deduce que este resultado se debe al alto contenido de CaO en los lodos orgánicos estabilizados y las cantidades de óxido de silicio (SiO_2), presentes en la cascarilla de arroz. Asimismo, el Ca alcanzó un 36.62 %, C un 9.68 %, Mg 1.34 % y Si 1.02 %. Este último proveniente de la composición de la cascarilla de arroz, ya que está compuesta principalmente de Si [11].

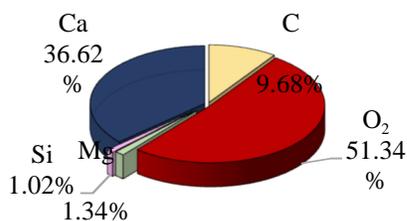


Figura 5. Gráfica de caracterización de biocarbón por espectroscopia de dispersión de energía de rayos X.

Fuente: Propia obtenida de “Laboratorio de Microscopía Electrónica y Confocal”, Smithsonian Tropical Research Institute.

La espectroscopia de dispersión de rayos X (EDX), se basa en el peso molecular de los elementos. Es por ello, que en este análisis realizado al biocarbón el macroelemento C presentó

mayor cantidad debido peso molecular (figura 6). Este componente, al ser aplicado al suelo, aumenta su fertilidad y la mantiene por periodos más largos que un fertilizante artificial [1]. Por otra parte, el Ca, Si y Mg tienen la capacidad de absorber metales pesados y contaminantes [1].

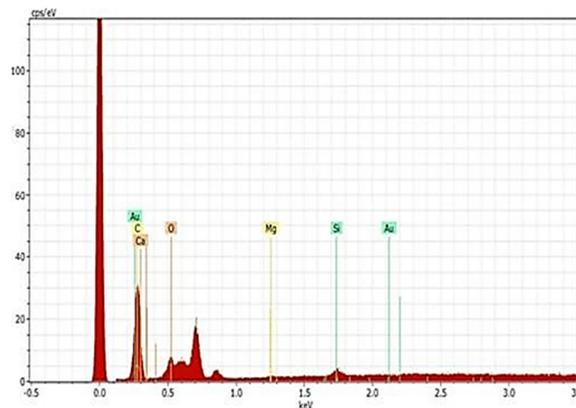


Figura 6. Espectroscopia de dispersión de rayos X (EDS) del biocarbón 75% lodos orgánicos y 25% cascarilla de arroz.

Fuente: Propia.

3.5 Análisis espectrográfico (SEM) de la composición del biocarbón

La estructura microporosa indica la morfología del biocarbón y las micropartículas que podrían estar presentes en el área superficial (figura 7). Esto es de gran importancia para el suelo y la planta, ya que estas permiten el movimiento de las raíces, albergan comunidades microbianas que facilitan el intercambio de nutrientes. De igual forma, la porosidad en el biocarbón mantiene la humedad del suelo por más tiempo, cuanto más pequeño sea el poro. El CO_2 y O_2 disueltos en el agua ocuparán el espacio del poro donde actualmente se encuentra aire, estos pueden ser absorbidos por la superficie del biocarbón, lo que aumenta la captación de CO_2 y la retención de agua, mitigando el efecto de la sequía [1]. Además, aumenta la oxidación de amoníaco (NH_3) y metano (CH_4), a través de organismos aeróbicos [19].

En la figura 7A, se observa la formación de microporos y se deduce, según la literatura, que la estructura de la cascarilla de arroz persiste después de ser carbonizada a altas temperaturas [26].

La densidad aparente, la cual es el peso del suelo en un volumen determinado, es un parámetro utilizado para determinar la salud del suelo y el nivel de compactación. Una alta densidad aparente impide el crecimiento de las raíces y la actividad microbiana, en donde la acumulación de agua y la porosidad disminuyen. Sin embargo, la estructura macroporosa del biocarbón permite disminuir la densidad aparente del suelo y comparado con el estiércol resulta más eficiente [19]. Conjuntamente, la capacidad de retención de líquidos aumenta, ya que los macroporos están relacionados con la capacidad de infiltración del suelo y este es de mayor importancia en los suelos arenosos, seguidamente en suelos arcillosos [19]. En

Panamá, los suelos predominantes son los franco arcillosos y franco arenosos [22].

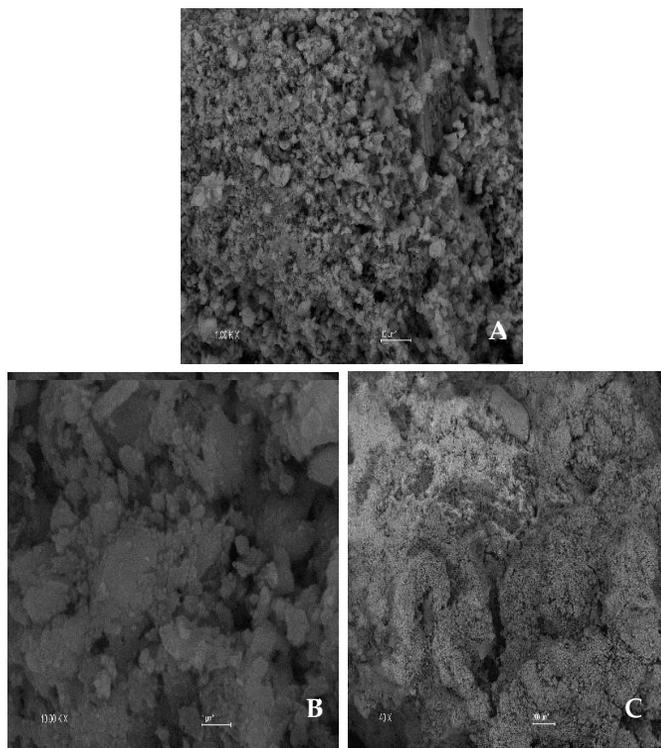


Figura 7. Análisis espectrográfico (SEM) de la composición de biocarbón. La figura 6a fue tomada a 1.0 KX, la figura 6b a 10.00 KX y la figura 6c fue tomada a 40 KX.

Fuente: Propia.

4. Conclusiones

Con esta investigación se logró demostrar que los lodos orgánicos estabilizados pueden ser carbonizados en un gasificador de flujo ascendente tipo top lit. Sin embargo, es necesario el uso de una biomasa que aporte materia volátil para la carbonización adecuada de la biomasa. El biocarbón obtenido de la mezcla de 75% lodos orgánicos y 25% cascarilla de arroz presentó altos contenidos de carbono orgánico, materia orgánica y nutrientes como, calcio, nitrógeno, manganeso, hierro, zinc, silicio. Además, presentó porosidad, lo que indica que podría contribuir a la retención de agua y a la transferencia de nutrientes entre el suelo y las plantas. Por consiguiente, estos nutrientes y características podrían mejorar las propiedades del suelo. Se concluye que el uso de estos residuos podría contribuir a la fertilidad del suelo y al crecimiento óptimo de los cultivos en áreas degradadas. Además, a una gestión adecuada de los residuos y al desarrollo sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestros queridos amigos del taller de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Panamá, al señor Reynaldo Mc Dermott y

Edward Ragel por su ayuda incondicional. A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Facultad de Ingeniería Eléctrica por su apoyo en el uso de laboratorios y equipos.

Agradecemos a la gerencia de Suez por el apoyo logístico y a Saneamiento de Panamá por la gestión para el acceso al muestreo. Agradecemos al Laboratorio de Análisis Industriales y Ciencias Ambientales (LABAICA) y al Laboratorio de Biosólidos por su apoyo incondicional en esta investigación.

Agradecemos al personal del Laboratorio de Suelos de la Universidad Tecnológica de Panamá por facilitarnos los tamizadores utilizados en la experimentación. De igual forma, agradecemos al Laboratorio de Suelos de CIA Divisa del Instituto De Investigación Agropecuaria de Panamá por su apoyo en el análisis de muestras de biocarbón.

Se agradece al técnico Jorge Ceballos del Laboratorio Earl S. Tupper del Smithsonian Panamá por los análisis en el Microscopio de Barrido Electrónico.

Agradecemos al Sistema Nacional de Investigación (SNI) y a la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) de la República de Panamá por su contribución económica en la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] J. Lehmann, and S. Joseph, (Eds.). "Biochar para la gestión ambiental: Ciencia, tecnología e implementación", Routledge, 2015.
- [2] A. Escalante Rebolledo, G. Pérez López, C. Hidalgo Moreno, J. López Collado, J. Campo Alves, E. Valtierra Pacheco, and J. D. Etchevers Barra, "Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo," *Terra Latinoamericana*, vol. 34, no. 3, pp. 367-382, 2016.
- [3] J. F. González, F. G. Martin, P. D. R. González, G. S. M. Alfaro, A. B. Ruiz, J. M. S. Hervas, J. A. Mira, "Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética", Ediciones Paraninfo, SA. 2015.
- [4] F. Ronsse, RW. Nachenius, and W. Prins, "Carbonización de la biomasa," En *Avances recientes en la conversión termoquímica de biomasa*, Elsevier, pp. 293-324, 2015.
- [5] Programa de saneamiento de Panamá, Planta de tratamiento de aguas residuales de Panamá. Revisión y actualización del estudio de impacto ambiental aprobado para los tres módulos de la PTAR en el marco de la preparación del Programa de Saneamiento de la Ciudad y la Bahía de Panamá II, PN-L1109.
- [6] H. Lu, W. Zhang, Sh. Wang, L. Zhuang, Y. Yang, R. Qiu, "Characterization of sewage sludge-derived biochars from different feedstocks and pyrolysis temperatures," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 102, pp. 137-143, 2013.
- [7] Deago, E. (2018). Benchmark de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales de las Provincias de Panamá y Coclé, APANAC. Senacyt.
- [8] J. Villarreal, L. Agudo, J. Villalaz, *Clasificación de suelos de Panamá y equivalencias, según la taxonomía de los suelos*, con el World ReferenceBase of Soil Resources (WRB). IDIAP, 2010.

- [9] ANAM. "Proyecto construcción de indicadores de sequía y degradación de tierras en Panamá." Secretaría nacional de ciencia, tecnología e innovación (SENACYT) programa de apoyo a la dinamización de los procesos de investigación e innovación tecnológica IV convocatoria del programa de estímulo a las actividades de ciencia y tecnología, 2009.
- [10] B. Vallerie, "Physical & aggregate properties (2000)," *La Nouv. Rev. l'adaptation la scolarisation*, vol. 51, no. 3, p. 271, 2010.
- [11] J. E. Rodríguez-Páez, D. Macías-Pinto, and C.A. Arcos, "La cascarilla de arroz como fuente de SiO₂," *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 41, pp. 7-20, 2007.
- [12] R., A., M. James, "Simultaneous Biochar and Syngas Production in a Top-Lit Updraft Biomass Gasifier", tesis doctoral, North Caroline University, North Caroline, USA, 2015.
- [13] J.G. Galvis and M.I.B González, "Evaluación de parámetros de calidad para la determinación de carbono orgánico en suelos," *Revista Colombiana de Química*, vol. 34, no. 2, pp. 201-209, 2005.
- [14] GS. Mary, P. Sugumaran, S. Niveditha, B. B. Ramalakshmi, P. Ravichandran, S. Seshadri, "Producción, caracterización y evaluación de biochar de desechos de vaina (*Pisum sativum*), hoja (*Brassica oleracea*) y cáscara (*Citrus sinensis*)," *Revista Internacional de Reciclaje de Residuos Orgánicos en la Agricultura*, vol. 5, no. 1, pp. 43-53, 2016.
- [15] H.-S. Ding and H. Jiang, "Self-heating co-pyrolysis of excessive activated sludge with waste biomass: Energy balance and sludge reduction," *Bioresour. Technol.*, vol. 133, pp. 16–22, Apr. 2013.
- [16] T.H. DeLuca, M.J. Gundale, M.D. MacKenzie and D.L. Jones, "Biochar effects on soil nutrient transformations", *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*, vol. 2, pp. 421-454, 2015.
- [17] M. K. Hossain, V. Strezov, K. Y. Chan, A. Ziolkowski and P. F. Nelson, "Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar", *Journal of environmental management*, vol. 92, no. 1, pp. 223-228, 2011.
- [18] D. Abenza. Evaluación de efectos de varios tipos de biochar en suelo y planta., 2008.
- [19] C. Peiris, SR. Gunatilake, JJ. Wewalwela and M. Vithanage, "Biochar para una agricultura sostenible: dinámica de nutrientes, enzimas del suelo y crecimiento de cultivos", *Biochar de Biomass and Waste*, Elsevier, pp. 211-224, 2019.
- [20] E.C. Luque, "Propiedades magnéticas de óxidos de hierro en suelos mediterráneos," tesis doctoral, Universidad de Córdoba, España, 2008.
- [21] D. Luis, S.R. Drago, P. Adriana, H. Sánchez, R. González, V. Edda and M.E. Valencia, "Composición y aporte potencial de hierro, calcio y zinc de panes y fideos elaborados con harinas de trigo y amaranto," *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, vol. 57, no. 1, 2007.
- [22] J. Villarreal, B. Name and R. García, "Zonificación de suelos de Panamá en base a niveles de nutrientes", *Ciencia Agropecuaria*, vol. 21, pp. 71-89, 2013.
- [23] L.E.S. Soto, "Con la respuesta del maíz a la fertilización fosfatada," *Acta Agronómica*, vol. 3, no. 3-4, pp. 187-209, 1961.
- [24] J. Espinosa, E. Molina, "Acidez y encalado de los suelos, IPNI", vol. 1, pp. 42, 1999.
- [25] Y. Yue, L. Cui, Q. Lin, G. Li and X. Zhao, "Efficiency of sewage sludge biochar in improving urban soil properties and promoting grass growth", *Chemosphere*, vol. 173, pp. 551-556, 2017.
- [26] J. Lehman, M.C. Rilig, J. Thies, C.A. Masiello, W.C. Hockaday and D. Crowley, "Biochar effects on soil biota—a review. Soil biology and biochemistry", vol. 43, no. 9, pp. 1812-1836, 2011.