

Construcción y validación de un reactor de pirólisis para la obtención de biocarbón

Construction and testing of a pyrolysis reactor for the production of biochar

Castillo-Paredes, Diego (estudiante)
Universidad Técnica de Machala
Código ORCID 0000-0002-7414-9401
dcastillo5@utmachala.edu.ec
Machala - Ecuador

Gaona-Chanalata, José (estudiante)
Universidad Técnica de Machala
Código ORCID 0000-0002-8602-8084
jgaona_est@utmachala.edu.ec
Machala – Ecuador

Barrezueta-Unda, Salomon (profesor)
Universidad Técnica de Machala
Código ORCID 0000-0003-4147-9284
sabarrezueta@utmachala.edu.ec
Machala - Ecuador

RESUMEN

El propósito de la investigación fue construir y validar un reactor para obtener biocarbon de los restos cosechados de maíz (biomasa). Se construyó un reactor con dos cámaras (combustión y pirólisis) de estructura metálica y de forma cilíndrica con las dimensiones de 0,90 m de altura y 0,57 m de diámetro. La incineración de la biomasa fue a 300-350 °C por 3 horas (E1), 400 °C por 2 horas (E2) y 450-500 °C por 2 horas (E3). La mayor cantidad de biocarbon fue de 3,67 Kg y el rendimiento de 30,61%, obtenidos en E2. El pH medido en agua destilada en todos los ensayos fue altamente alcalino (9,11-11,30) con una baja conductividad eléctrica (<1,05 dS/m). El reactor es de poca complejidad y económico, permitiendo obtener un biocarbon en un rango de entre 21-35% de rendimiento a 400 °C por 2 horas.

Palabras clave: pirólisis, biocarbon, restos de maíz, estructura metálica

ABSTRACT

The aim of the research is to build a reactor for the pyrolysis of maize crop stover a reactor using two chambers (combustion and pyrolysis) was fabricated with a metallic structure and a cylindrical shape with the dimensions of 0.90 m height x 0.57 m diameter. The reactor was then tested with corn stover, biomass which was incinerated at: 300-350 °C for 3 hours (E1); 400 °C for 2 hours (E2), 450-500 °C for 2 hours (E3). The highest amount of biochar obtained was 3.67 kg and yield of 30.61%, values obtained in E2. The pH measured in distilled water in all tests was highly alkaline with low electrical conductivity. The proposed equipment is of low complexity and economical, allowing biochar to be obtained in the range of 21-35% yield at 400 °C for 2 hours.

Keywords: pyrolysis, biochar, corn stover, metallic structure.

Introducción

El aumento de la población mundial ha generado un incremento en la necesidad de alimentos en todo el planeta, y la agricultura está considerada el sector más importante para suplir esta demanda (Fetjah et al., 2021). Esto significa que ser más productivos conlleva a explotar varios recursos de una forma no racional, entre estos el suelo, el cual cumple varias funciones en los sistemas agrarios como la de disponibilidad de los nutrientes y de sumideros de CO₂. La degradación de este recurso ocasiona un impacto directo sobre el cambio climático, por ejemplo, por la pérdida de los tenores de carbono orgánico en el suelo, se afecta el almacenamiento de gases efectos invernaderos como el CO₂ (Barrezueta-Unda et al., 2017).

Una alternativa para suplir la necesidad alimentaria y mitigar el cambio climático, es la reutilización de los restos de biomasa bruta que se genera de la cosecha y poscosecha (Ortiz-Ulloa et al., 2021). Pero la gestión de este tipo de biomasa puede ser compleja si no se realizan los procesos de forma adecuada como la buena fermentación anaeróbica o con una combustión adecuada, que permita incorporar de los nutrientes del suelo que son absorbidos por las plantas (Ortiz-Ulloa et al., 2021; Roberts et al., 2010). Entre las alternativas están el uso de los biocarbones, también denominados biochar, carbón vegetal, charcoal, char, carbón negro derivado de la biomasa o carbón pirogénico (Hilbert y Soentgen, 2021).

Las formas de obtener el biocarbón y su utiliza sea como fuente de energía o como enmiendas en los suelos agrícolas es conocida desde hace muchos siglos. El registro histórico más reciente es el descrito por Schmidt et al., (2014), que explica el uso biochar por las tribus brasileñas que habitaron los márgenes del Río Amazonas, donde se enterraban los restos carbonizados de las cosechas, dando origen siglos después a las denominadas Terras Pretas do Indio (Hilbert y Soentgen, 2021). El biocarbón se obtiene por pirólisis de la biomasa vegetal a diferentes temperaturas y en reducidas condiciones de oxígeno (Roberts et al., 2010).

El uso del biocarbon en la agricultura se incluye la alimentación para animal, como aditivo para el tratamiento del estiércol, como componente de fertilizante o en sustrato que bioabsorbe metales pesados como el cadmio (Cd), el plomo (Pb) o el arsénico (Ar), en suelos contaminados (Tabla 1) (Schmidt et al., 2014). El biocarbon, también se recomienda como una enmienda orgánica para mejorar la capacidad de retención de agua de los suelos y neutralizar los suelos ácidos (Fetjah et al. 2021). Pero, se debe tener en cuenta que la aplicación de biocarbón tiene varios efectos sobre el contenido de nutrientes del suelo como: aumentar la disponibilidad del fósforo (P) que se incrementa hasta un 45%, pero disminuye el nitrógeno (N) en de 11 a 12% (Zhang et al., 2016). Estos efectos se explican porque la biomasa después del pirólisis se transforma en un material altamente poroso (> 5 cm³ g⁻¹ de superficie específica), esto permite absorber cantidades significativas de agua y nutrientes disueltos (Ronsse et al., 2013). También promueve en capacidad de campo la captura de partículas de nitrato, principal elemento que ocasiona la acidez del suelo (Schmidt et al., 2014; Verheijen et al., 2019).

Tabla 1.
Resumen de las diferentes especies vegetales utilizadas en la producción de biocarbón por pirólisis. Las especies están agrupadas según el metabolismo fotosintético.

Tipo de Metabolismo Fotosintético	Tipo de planta	Especie	Biomasa pirolisada	Resultados obtenidos
C3	Cereal	Trigo	Paja de trigo	Aumento del contenido de elementos como B, Cu, Cr y Mo
		Arroz	Cáscaras de arroz	Biochar modificado para la eliminación de tetraciclina. La capacidad de adsorción (58,8 mg g ⁻¹) atribuida a su estructura porosa y a su gran superficie específica.
	Fibra y madera	Algodón	cáscaras de semillas	Mayor contenido de elementos como: Na, Ca, K, Mg, P y S.
		Pino	astillas y madera	Pirólisis a 100 °C: 50,87% C, 0,71% N, 6,15% H. Pirólisis a 700 °C: 86,51% C, 1,13% N, 1,28% H
		Roble	madera	Superficie específica entre 1 - 3 m ² g ⁻¹ . Rico en óxidos de elementos como Ba, Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, Si, Sr y Ti.
	Cultivos perennes	Coco	Cascara de coco	Capacidad de adsorción de metales pesados como el cobre y el plomo.
		Café	Restos de cosecha y plantas viejas	Contenido de C (51 - 76%), H (5,0 - 7,2%), N (2,4 - 4,3%), S (0,05 - 0,17%), P (0,18 - 0,48%), K (0,81 - 1,94%), Ca (0,17 - 0,56%), Mg (0,20 - 0,60%) y Na (0,06 - 0,17%).
		Cacao	cáscara de la mazorca	Mayor contenido de C, N, H, Ca, P, S.
	C3	Cereal	Maíz	Mazorca y hojas
Pastos		Pastos	paja seca	Contenido en cenizas (5,7 - 19,3%), C (47,2 - 94,2%), N (0,61 - 1,24%), H (1,53 - 7,25%), O (3,6 - 45,1%) y una superficie específica entre 1,8 - 139 m ² g ⁻¹ .
CAM	Fruta	Piña	Piel de piña	73% C, H (1,37 - 3,36%), O (9,88 - 12,05%) y N (0,99 - 1,23%).
	Cactus	Cactus	Desechos vegetales	Eliminación del cobre en aguas contaminadas, ya que presenta estructuras laminares con residuos carboxílicos en la superficie externa superior

Nota: Tomado de Sanchez-Reinoso et al. (2020)

Aunque el uso de biocarbon es una alternativa que favorece las condiciones de cultivos; sin embargo, para lograr efectos significativos en la disponibilidad de agua del suelo o en la regulación del pH del suelo, se necesitan grandes cantidades de biocarbón (>10 t ha⁻¹) (Schmidt et al., 2014; Yeboah et al., 2016).

En este contexto, explotaciones agrícolas de ciclo corto como el maíz, generan cantidades significativas de biomasa residual que se puede reutilizar (Yeboah et al.,

2016; Roberts et al., 2010). Pero el maíz es uno de los cultivos con mayor incidencia en la degradación de los suelos y en el calentamiento global; por tanto, es necesario establecer mecanismos que utilicen la biomasa residual para que se integre al suelo (Iglesias et al., 2018). Para esto es necesario realizar estudios del tiempo de pirólisis, temperatura y nivel de oxígeno para recomendar una dosis que genere un efecto positivo en los suelos, siendo un factor importante el diseño de un reactor o horno que garantice la obtención de un biocarbón altamente poroso y de pH entre 8.5 a 9.5. Por todo lo anteriormente expuesto, el presente trabajo investigativo persigue el siguiente objetivo: construir un reactor para realizar el pirólisis de restos de la cosecha del maíz y caracterizar el producto obtenido mediante ensayos de manera proximal el biocarbón obtenido para su uso agrícola.

Materiales y Métodos

Ubicación de los ensayos experimentales

El trabajo de diseño y construcción del reactor pirolítico y de los ensayos experimentales se llevaron a cabo en los predios de la Granja Experimental Santa Inés, localizada en la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Técnica de Machala (Longitud: 9635786 W. Latitud: 620484 S, 5 msnm.). El clima de la zona es tropical cálido, con un promedio de temperatura anual que oscila entre 24 a 26 °C y una precipitación acumulada de 550 mm. (Villaseñor et al, 2015).

Diseño de la investigación

El trabajo tiene un enfoque cuantitativo, con un nivel de investigación descriptivo-experimental, donde se aplicó el método teórico de análisis-síntesis, por tanto, la investigación se conformó de cuatro etapas, que se detallan a continuación.

Búsqueda de información

Para poder realizar modificaciones y adaptaciones al modelo tradicional de un reactor de doble fondo fue necesario realizar la búsqueda sistemática en la base de datos Scopus y WOS de artículos científicos sobre modelos de reactores pirolíticos para obtener biocarbón También se buscó información en relación con volúmenes biocarbones de biomasa vegetal a obtener.

Requerimientos mínimos de los agricultores

La segunda etapa consistió en conocer los requerimientos mínimos que necesita el agricultor para obtener un biocarbón para sus plantaciones. En este contexto, se diseñó de un cuestionario conformada por cuatro preguntas que fueron: tipo de material utilizado (de metal reciclado, metal nuevo); movilidad (portátil o fijo), valor referencial (\leq \$100, \$ 150; $>$ \$150); peso (50 kg, 100 kg, $>$ 100 kg). El cuestionario fue diseñado en google forms y enviado a 12 agricultores con un nivel de preparación profesional (agrónomos/técnicos agropecuarios).

Diseño del reactor de pirólisis

La tercera etapa fue la construcción del reactor y su posterior validación del biocarbón obtenido. En este marco, el equipo se diseñó para trabajar con una capacidad para 14 kg de biomasa seca. Los materiales utilizados para la construcción fueron: chapas laminadas de acero y seguros con cadena, tubo cuadrado metálico de dimensiones 0,10

m x 0,10 m, 1 m de tubo metálico redondo de $\frac{3}{4}$, termómetro de acero inoxidable graduado de 0° a 900°C (Fig. 1a). El reactor fue diseñado según las medidas especificadas por Fuentes-Hernández & Recio-Recio (2005) y Marín et al (2018): cuerpo cilíndrico, fondo cónico y tapa elíptica, altura total 0,90 m, diámetro 0,57 m, contorno de tapa 1,85 m. A partir de estas dimensiones se realizó una modificación del horno de doble fondo, que fue dividir reactor en su interior en dos zonas: La primera es la zona de combustión que inicia con la conducción del calor desde la base del tanque metálico donde se genera la energía calórica, que luego es transportado por un tubo de metal que cumple la función de chimenea ubicado en el centro del tanque, implemento que sobrepasa la tapa del tanque y tiene un largo total de 1,12 m (Fig. 1b). La segunda zona es la de pirólisis, que comprende el ingreso del calor al interior del tanque por varias perforaciones de media pulgada que se ubican en el tubo de metal antes de sobrepasar la tapa del tanque, la altura total de esta zona es de 0,64 m. La biomasa seca que es el material a pirolizar no debe sobrepasar las perforaciones del tubo, debido que la intención es generar en la zona de pirólisis es una presión de gases que ocasionan el consumo del oxígeno (Fuentes Hernández y Recio Recio, 2005). El reactor también está provisto de una salida para los gases de la zona de pirólisis, que luego serán condensados en agua y analizados en posteriores estudios.

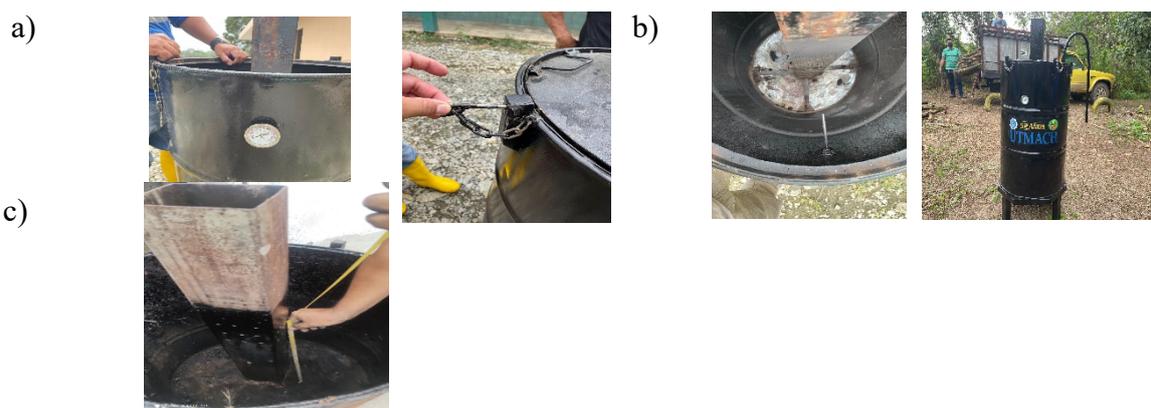


Figura 1.
 Horno pirolítico: a) seguro y termómetro, b) Vista de la zona de combustión, c) vista de la zona de pirólisis.

Conformación de los ensayos experimentales

Otro factor importante en el proceso de pirólisis es la temperatura. En primera instancia, se recomienda un rango de 250 a 550 °C, para obtener carbón como producto final y alquitrán como subproducto, este tipo de pirólisis se denomina lenta (Tabla 2). Con este fundamento y para corroborar que el reactor pirolítico proporciona un biocarbón adecuado en relación con el porcentaje de pérdida de la biomasa, se conformaron tres ensayos, donde las variables independientes fueron: el tiempo de incineración y el rango de temperatura; que se combinaron para formar tres ensayos (Tabla 3).

Tabla 2.
 Tipos de pirólisis en relación con rangos de temperatura

Tipos	Temperatura	Principales productos
Lenta (horas)	250 a 550 °C	30 - 35 % Peso de bioabono sólido/ bio-oil
Convencional (minutos)	600 a 800 °C	20 - 25 % Peso bioabono sólido 10-15 % Peso bio-oil

Rápida (segundos)	> 900 °C	40-60 % Peso bio-oil/gas
-------------------	----------	--------------------------

Tabla 3.
 Diseño de los ensayos para obtener biocarbón

Ensayos	Temperatura (°C)	Tiempo (horas)
E1	300-350	3
E2	400	2
E3	500	2

La materia prima utilizada en los ensayos fueron tuzas o cañotes del *Zea maíz L.* (híbrido Pioneer 30F53), obtenidas después de la cosecha, biomasa residual proviene de la parroquia rural Federico Paez, Pindal (provincia de Loja-Ecuador). La biomasa recolectada fueron 3 sacos de 40 kg que fueron secada por varios días al aire, sobre una superficie de concreto y cubierto por las noches, una vez seco el material fueron ensacadas otra vez para su posterior traslado a la UTMACH, para la transformación en biocarbón. El calor suministrado para generar la energía calorífica fueron trozos de madera seca, obtenida de la granja Experimental Santa Inés. Luego de transcurrido el tiempo por cada ensayo se procedió a enfriar el reactor retirando la fuente calorífica y aplicando agua con una manguera, luego de transcurrida tres horas se retiraron los seguros y la tapa metálica del cilindro, y se procedió a pesar el producto resultante.

Análisis proximal

Concluido los ensayos en campo, fueron tomadas varias muestras por experimento para realizar determinaciones en laboratorio como fueron: cantidad de biocarbón cuantificado en kilogramos en una balanza romana, el porcentaje de biocarbón obtenido (*Ecuación 1*), el pH en una pasta de saturación relación 1:2.5 y el color comparado en una tabla Munsell de colores para suelo. Todas las variables fueron medidas por triplicado.

$$\% \text{ de biochar} = (pf/pi) \times 100\% \text{ de biochar} = (pf/pi) \times 100 \quad (1)$$

Donde: pf es el peso final de la biomasa después del pirólisis; pi es el peso inicial de la biomasa antes del pirólisis. Para corroborar el grado la presencia de carboxílicos e hidroxilos, principales grupos funcionales que permiten la retención de agua y la disponibilidad de nutrientes, se pesó 5 g de biocarbón que se disolvió en 150 ml de peróxido de hidrógeno, luego en un agitador magnético a 1000 revoluciones por minuto se mantuvo la solución por 15 minutos, a continuación, se agregó 10 ml de KCL, se agitó con una varilla de vidrio por 1 minuto y se midió el pH. Este proceso se repite para cada ensayo por triplicado. También se realizó la determinación del pH pero sin agregar KCL, solo en peróxido de hidrógeno, también por triplicado.

Procedimiento estadístico

Los resultados de la muestra la cual fue al azar sin reemplazo se evaluó Excel y se realizó un recuento de frecuencia. Los valores obtenidos de peso final y porcentaje de ceniza, así como del pH fueron ingresados en una hoja de Excel para ser tabulados y luego estimado la media y la desviación típica. Los resultados del color se ingresaron en una

tabla donde se detalla el recuento de frecuencia de los tonos y matices obtenidos. También se realizó un análisis de varianza al 5% de significancia para contratar valores obtenidos en los ensayos.

Resultados y Discusión

Reactor pirolítico

Los resultados de la encuesta sobre las características mínimas para fabricar el reactor se presentan en la Figura 2. El equipo fue fabricado con materiales accesibles en la zona, con criterios de material reciclado y resistentes para su óptimo funcionamiento, esto se debe a que los encuestados indicaron que el reactor tiene que ser construido de los tanques de metal donde se transporta el combustible y que son reutilizables (Figura 2a). En cuanto a la movilidad del reactor el 100% respondieron, que este debe ser en una sola estructura y portátil (2b). Estos criterios fueron muy importantes para realizar el diseño, debido a la necesidad de mover el reactor a otros predios donde la materia prima sea abundante, por tanto, de fácil operación cuando se incinere la materia prima, sin representar un riesgo durante su operación. En cuanto al costo del reactor este no debe superar \$150 USD (2c), en este prototipo además del cilindro principal y la tapa metálica que fueron reciclados su precio al igual que los seguros y termómetros no sobrepasaron los 20 dólares. Otro criterio consultado fue el peso del equipo, el cual no debe ser excesivo para el traslado por dos personas cuando el reactor esté vacío, esto es que el peso no debe sobrepasar el rango de 50 a 100 kg vacío (Figura 2d).

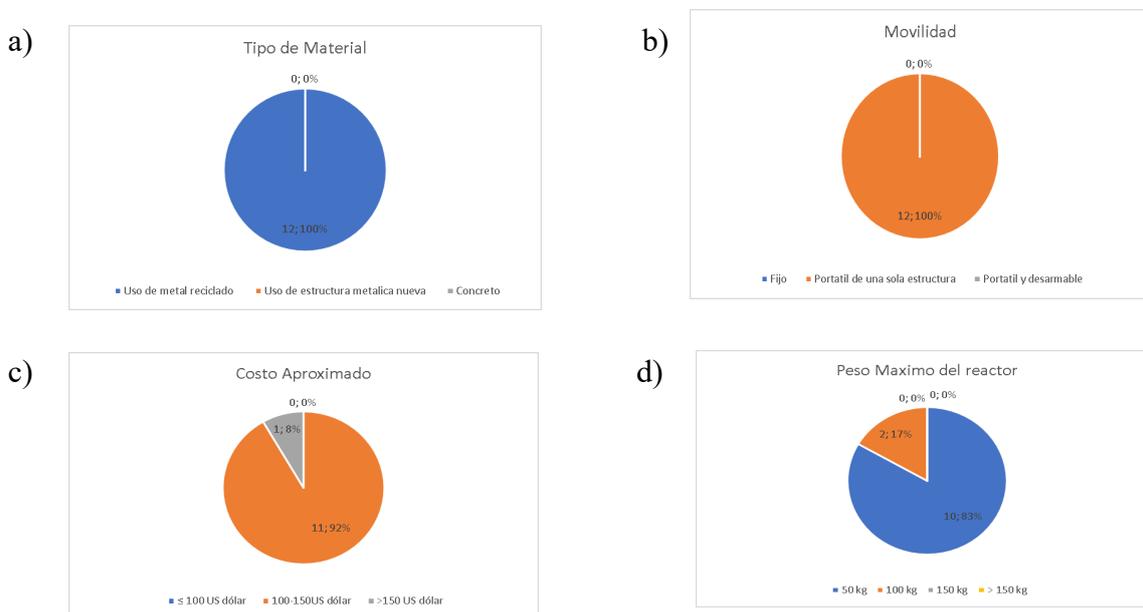


Figura 2

Requerimientos básicos del reactor de pirólisis consultado a los agricultores: a) Tipo de material, b) movilidad, c) Costo aproximado (valor referencial en dólares), d) peso máximo del reactor

La Tabla 4, indica las medidas de resumen de datos que se obtienen y la estadística inferencial con el ANOVA ($p\text{-valor} \leq 0,05$), de un factor intergrupos, entre la cantidad de biocarbón obtenido y el rendimiento de este por cada ensayo, obteniendo valores que

indican diferencias significativas, pero sí diferencia numérica. Los valores más altos de total y de rendimiento del biocarbón corresponden a E2, con 3,63 kg y 30,61 % de biocarbón respectivamente. En cuanto a los rangos obtenidos de menor a mayor para el total de biocarbón fueron: 1,50 kg (E1) a 2,90 kg (E3) y de 3,10 kg (E3) a 5,62 kg (E2); mientras que el rendimiento de biocarbón indicó valores mínimos y máximos, respectivamente de: 18,75 % (E1) a 20,83 % (E2) y de 22,14 % (E3) a 47,25 % (E1). Esto se explica a que la pérdida de masa está en relación con el tiempo de incineración, resultados explicados en otros estudios (Marín-Armijos et al., 2018; Omulo et al., 2019). Lynch y Joseph (2010) recomiendan que el rendimiento de un biocarbón proveniente de plantas C4 como el maíz fluctúan entre 25 a 30% de rendimiento con relación al total de biomasa seca introducida en un reactor pirolítico.

Tabla 4
Resumen estadístico descriptivo y análisis de varianza (sig. p-valor ≤0,05) de biochar obtenido de restos de maíz.

Variables	Ensayos	Mínimo	Media (±DS)	Máximo	Sig. 0,05
Total biochar(Kg)	E1	1,50	2,33 ±1,26	3,78	0,45
	E2	2,50	3,67 ±1,70	5,62	
	E3	2,90	3,00 ±0,10	3,10	
Rendimiento Biochar (%)	E1	18,75	29,08 ±15,78	47,25	0,64
	E2	20,83	30,61 ±14,15	46,83	
	E3	20,71	21,43 ±0,72	22,14	

En la Figura 3, los diagramas de cajas y bigotes del total del rendimiento del biocarbón muestran una dispersión de datos mayor en los ensayos E1 y E2 con respecto a E3, pero con una mayor dispersión de valores de E1 y E2, donde el valor más alto se ubica sobre los 5 kg, mientras que en E3, los valores obtenidos oscilan próximos a los 3 kg (Figura 3a). En el rendimiento de biocarbón se observa un sesgo hacia valores superiores a 3 kg en E1 y E2 (Figura 3b), mientras que en E3 la dispersión de los valores fue menor similar a lo mostrado en la Figura 3a. Varias investigaciones describen valores entre 35 % hasta 75% de carbono en un rendimiento de 21 a 35% de biocarbón (Yeboah et al., 2016). Por otra parte, Marín-Armijos et al. (2018), expresan que el pirólisis lento a temperatura mayor a 400 grados se logra una mejor distribución de calor en hornos tipo doble fondo, contrario a temperaturas inferiores en tiempo cortos donde la biomasa seca puede no incinerar por completo, generando valores atípicos dentro de la investigación.

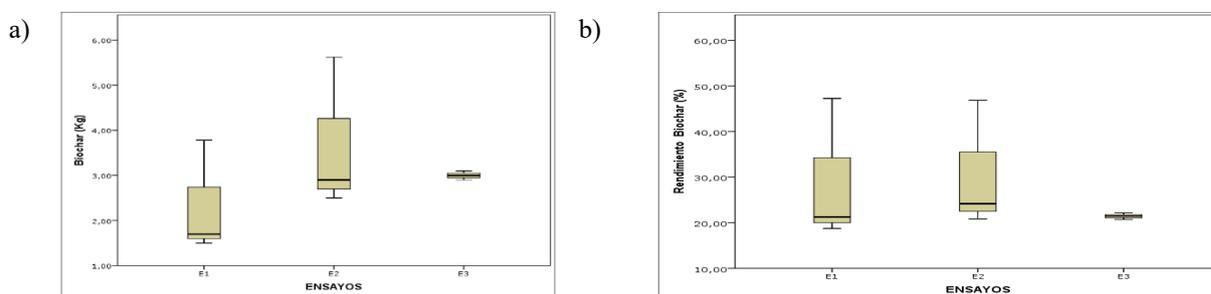


Figura 3.
Diagrama de cajas y bigotes: a) total de biocarbón (kg); b) rendimiento de biocarbón (%)

En la tabla 5, se presentan los valores cualitativos obtenidos para el color y croma mediante una tabla Munsell de color para suelo. El color predominante fue de 10YR con un matiz e intensidad entre 2/1 a 3/2, esto se clasifica en un croma de negro parduzco

(E1 y E3) y negro (E2). La mínima variación en el color está relacionada con la cantidad de carbono presente en el biocarbon, caso contrario cuando se incinera biomasa por largos periodos de tiempo donde el color que predomina es el gris indica de la oxidación de los compuestos hidrocarburos elementales que proporciona el color negro al biocarbon de pirolisis lenta.

Tabla 5.
 Valores estimados de color y croma obtenido de biocarbón obtenido de restos de maíz.

Ensayos	Color	Croma
E1	10 YR 3/1	negro parduzco
E2	10 YR 2/1	negro
E3	10 YR 3/2	negro parduzco

La tabla 6, muestra los valores de las propiedades químicas: CE, pH medido en agua destilada, pH medido en peróxido de hidrógeno (H₂O₂) con agitación en KCL y en agua destilada. Los niveles de CE fueron bajos al ser comparados con los valores de suelos agrícolas, en este caso a mayor temperatura la CE disminuyó a 0,19 dS/cm, mientras que en E2 fue el pico más alto con 1,05 dS/cm, valores similares fueron obtenidas en otras investigación excepto en biocarbón de estiércol y subproducto de árboles maderables que por lo general sobrepasan los 10 dS/cm (Karim et al., 2015; Nanganoa et al., 2019; Wang et al., 2015). Pérez Salas et al. (2013) expresa que el valor ≤ 2 dS/cm indica ausencia de sales en especial de elementos como el sodio. Por otra parte, los valores de pH medidos en agua destilada oscilaron entre 9,61 (E3) a 11,30 (E2), rango considerado altamente alcalino. Esto explica qué 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). El menor valor de pH en E3, se explica a que las ligninas que se degrada a partir de los 450 grados centígrados y se produce un aumento de los grupos funcionales como los hidroxilos, que está relacionado con los valores obtenidos. Efecto que se corrobora al medir el pH en KCL en una solución acuosa de biocarbón más H₂O₂, donde los valores variaron de 5,98 en E3 que indica una tendencia ácida a 8,59 en E2 (valor alcalino); por tanto, una mayor cantidad de hidroxilos afecta la disponibilidad de nutrientes. Pero cuando se realizó la lectura de la solución de biocarbón más H₂O₂, el valor obtenido en E3 varió de forma significativa incrementando a 6,32 (prácticamente neutro), mientras que en los ensayos uno y dos los valores de pH fueron 7,41 y 8,63 respectivamente.

Tabla 6.
 Valores estimados de Conductividad eléctrica, pH medida en agua destilada, KCL y H₂O₂ en de biocarbon obtenido de restos de maíz.

Ensayos	CE (dS/cm)	pH en agua destilada	pH en H ₂ O ₂ MAS KCL	pH en H ₂ O ₂
E1	0,40	10,64 ± 0,03	7,03 ± 0,11	7,41 ± 0,09
E2	1,05	11,30 ± 0,01	8,59 ± 0,19	8,63 ± 0,2
E3	0,19	9,61 ± 0,10	5,98 ± 0,07	6,32 ± 0,05

Conclusiones

El reactor fue construido bajo los requerimientos de necesidad de los agricultores consultados y en función de las especificaciones técnicas de dimensiones de 0,90 m de altura x 0,57 m de diámetro. El equipo operó de forma discontinua sin problemas. La cámara de combustión y de pirólisis diseñada en el interior del reactor permitió que se realice el pirólisis, lo cual se confirmó por los porcentajes de carbón que también fueron obtenidos por otros investigadores. En cuanto al mayor porcentaje de rendimiento de biocarbón la temperatura de 400 °C del ensayo dos es la recomendada, porque la utilidad de una biomasa residual debe fluctuar entre el 25 al 35% de carbón; por tanto, se recomienda incinerar los restos de maíz a esta temperatura durante 2 horas. Los ensayos realizados muestran un biocarbón medido en agua de altamente alcalino, pero al ser oxidado los hidrógenos con H₂O₂, se verificó que a 450-500 °C (E3) las bases de cambio se desprenden y obtiene un producto ácido, efecto contrario que mostró E2 con valores próximos a la neutralidad. La tecnología utilizada garantiza la calidad del producto obtenido y el equipo que se propone es de poca complejidad, económico y responde a la tendencia mundial de diseño de instalaciones de este tipo.

Referencias bibliográficas

- Barrezueta-Unda, S., Paz-González, A., & Chabla-Carrillo, J. (2017). Revisión de criterios para medir la sostenibilidad agraria: adaptación de marcos de trabajo y propuesta de indicadores. *Universidad Y Sociedad*, 9(1), 77–84.
- Fetjah, D., Ainlhout, L. F. E., Ihssane, B., Houari, A., Idardare, Z., & Bouqbis, L. (2021). Biological, Physico-Chemical and Morphological Analyses of Four Biochars Derived from Agricultural Waste. *Journal of Ecological Engineering*, 22(4), 36–46.
- Fuentes Hernández, A., & Recio Recio, R. (2005). Propuesta de diseño de un horno-reactor para realizar la pirólisis de la cáscara de arroz. *Tecnología Química*, 25(2), 87–98.
- Hilbert, K., & Soentgen, J. (2021). Terra Preta Nova – Where to from Here? In *Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision* (pp. 473–488).
- Iglesias, S., Alegre, J., Salas, C., & Egüez, J. (2018). Corn yield (*Zea mays* L.) improves with the use of eucalyptus biochar. *Scientia Agropecuaria*, 9(1), 25–32.
- 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.
- Lynch, J., & Joseph, S. (2010). Guidelines for the development and testing of pyrolysis plants to produce biochar. *International Biochar Initiative, London, UK*. https://www.biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/04/IBI_Pyrolysis_Plant_Guidelines.pdf

- Marín-Armijos, J., García-Batista, R., & Barrezueta-Unda, S. (2018). Elaboración de biocarbón obtenido a partir de la cáscara del cacao y raquis del banano. *Revista Científica Agroecosistemas*, 6(3), 75–81.
- 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>
- Omulo, G., Banadda, N., Kabenge, I., & Seay, J. (2019). Optimizing slow pyrolysis of banana peels wastes using response surface methodology. *Environmental Engineering Research*, 24(2), 354–361.
- Ortiz-Ulloa, J. A., Abril-González, M. F., Pelaez-Samaniego, M. R., & Zalamea-Piedra, T. S. (2021). Biomass yield and carbon abatement potential of banana crops (*Musa spp.*) in Ecuador. *Environmental Science and Pollution Research International*, 28(15), 18741–18753.
- 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.
- Roberts, K. G., Gloy, B. A., Joseph, S., Scott, N. R., & Lehmann, J. (2010). Life cycle assessment of biochar systems: estimating the energetic, economic, and climate change potential. *Environmental Science & Technology*, 44(2), 827–833.
- Ronsse, F., van Hecke, S., Dickinson, D., & Prins, W. (2013). Production and characterization of slow pyrolysis biochar: influence of feedstock type and pyrolysis conditions. *Global Change Biology. Bioenergy*, 5(2), 104–115.
- Sanchez-Reinoso, A. D., Ávila-Pedraza, E. A., & Restrepo, H. (2020). Use of Biochar in agriculture. *Acta Biológica Colombiana*, 25(2), 327–338.
- Schmidt, H.-P., Kammann, C., Niggli, C., Evangelou, M. W. H., Mackie, K. A., & Abiven, S. (2014). Biochar and biochar-compost as soil amendments to a vineyard soil: Influences on plant growth, nutrient uptake, plant health and grape quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 191, 117–123.
- Verheijen, F. G. A., Zhuravel, A., Silva, F. C., Amaro, A., Ben-Hur, M., & Keizer, J. J. (2019). The influence of biochar particle size and concentration on bulk density and maximum water holding capacity of sandy vs sandy loam soil in a column experiment. *Geoderma*, 347, 194–202.
- Villaseñor, D., Chabla, J., & Luna, E. (2015). Caracterización física y clasificación taxonómica de algunos suelos dedicados a la actividad agrícola de la Provincia de El Oro. *Cumbres*, 1(2), 28 - 34. <https://doi.org/10.48190/cumbres.v1n2a5>
- 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.
- 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.

Zhang, D., Yan, M., Niu, Y., Liu, X., van Zwieten, L., Chen, D., Bian, R., Cheng, K., Li, L., Joseph, S., Zheng, J., Zhang, X., Zheng, J., Crowley, D., Filley, T. R., & Pan, G. (2016). Is current biochar research addressing global soil constraints for sustainable agriculture? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 226, 25–32.