



Diseño conceptual de una planta de pirólisis lenta para la producción de biocarbón derivado de residuos de cultivos y residuos agroindustriales de yuca

Conceptual design of a slow pyrolysis plant for producing biochar derived from crop residues and agro-industrial cassava wastes

Projeto conceitual de uma planta de pirólise lenta para a produção de biochar derivado de resíduos de culturas e resíduos agroindustriais de mandioca

Daniel D. Celis-Carmona¹
Yulitza F. Rodríguez-Sánchez²
Leonardo Alexis Alonso-Gómez^{3*}

*Autor de correspondencia: lalonso@unillanos.edu.co

Recibido: 21 de agosto de 2024 Aceptado: 10 de febrero de 2025

Resumen

El biocarbón, producido a partir de residuos agrícolas o agroindustriales se está perfilando como un subproducto agroindustrial de interés. Las diversas aplicaciones que puede tener el biocarbón pueden ofrecer alternativas lucrativas para los productores colombianos. En el presente trabajo se analiza la posibilidad de producir biocarbón a partir de residuos de yuca (ramas y cáscaras). Se muestran posibles aplicaciones del biocarbón y se evalúa su potencial técnico con datos de la región de la Orinoquia. El diseño conceptual parte de análisis de laboratorio realizados en el laboratorio de pirolisis de la universidad de los Llanos, se probaron diferentes tratamientos de pirólisis lenta y las muestras de biocarbón se caracterizaron teniendo en cuenta el pH, la conductividad y las propiedades térmicas. La biomasa con la que se obtuvieron mejores resultados en cuanto a rendimientos de biocarbón fueron las ramas

- 1 Estudiante programa de Ing. Agroindustrial. Universidad de los Llanos, Villavicencio, Meta, Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8732-9098>
- 2 Estudiante programa de Ing. Agroindustrial. Universidad de los Llanos, Villavicencio, Meta, Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9500-2364>
- 3 Ing. Agroindustrial, MSc., PhD. Universidad de los Llanos, Villavicencio, Meta, Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9745-2529>

La Revista Sistemas de Producción Agroecológicos es una revista de acceso abierto revisada por pares. © 2012. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la Licencia Internacional Creative Commons Attribution 4.0 (CC-BY 4.0), que permite el uso, distribución y reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se acredite el autor y la fuente originales.

Consulte <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

OPEN ACCESS



de yuca (41.22%, b. s.). Los resultados del análisis técnico indican que el montaje de una planta de pirolisis de ramas y cáscaras es viable en la Orinoquia. El biocarbón entonces, se presenta como una alternativa técnicamente posible, ya que en la cadena productiva de la yuca se dispone fácilmente de una gran cantidad de biomasa residual. Esta biomasa tiene aplicaciones potenciales como biocombustible, enmienda del suelo, agente de captura de carbono, e incluso electrodos de supercondensadores en el ámbito electrónico.

Palabras claves: Orinoquia; Proceso termoquímico; Residuos agrícolas; Valorización de biomasa.

Abstract

Biochar, which is produced from agricultural or agro-industrial waste, is becoming an increasingly interesting by-product. It has various potential applications that could provide profitable alternatives for Colombian producers. This article assesses the feasibility of producing biochar from cassava waste, specifically branches and peels. It explores the potential uses of biochar and evaluates its technical feasibility based on data from the Orinoquia region. The conceptual project is based on laboratory analyses conducted in the pyrolysis laboratory at the *Universidad de los Llanos*. Different slow pyrolysis treatments were tested, and the biochar samples were evaluated for pH, conductivity, and thermal properties. The results showed that cassava branches produced the highest biochar yield at 41.22%. The technical analysis indicates that establishing a pyrolysis plant for processing branches and peels is feasible in Orinoquia. Thus, biochar is considered a technically viable alternative, as a significant amount of residual biomass is readily available in the cassava production chain. This biomass has potential applications as a biofuel, soil improver, carbon capture agent, and even as electrodes for supercapacitors in the electronics field.

Keywords: Agricultural waste; Biomass valorisation; Orinoquia; Thermochemical process.

Resumo

O biochar, produzido a partir de resíduos agrícolas ou agroindustriais, está surgindo como um subproduto agroindustrial de interesse. As várias aplicações que o biocarvão pode ter podem oferecer alternativas lucrativas para os produtores colombianos. Este artigo analisa a possibilidade de produzir biocarvão a partir de resíduos de mandioca (ramos e cascas). As possíveis aplicações do biocarvão são mostradas e seu potencial técnico é avaliado com

base em dados da região de Orinoquia. O projeto conceitual baseia-se em análises laboratoriais realizadas no laboratório de pirólise da *Universidad de los Llanos*. Foram testados diferentes tratamentos de pirólise lenta e as amostras de biocarvão foram caracterizadas levando em conta o pH, a condutividade e as propriedades térmicas. A biomassa com os melhores resultados em termos de rendimento de biocarvão foi a de ramos de mandioca (41,22%, b. s.). Os resultados da análise técnica indicam que a instalação de uma planta de pirólise de ramos e cascas é viável na Orinoquia. O biocarvão é, portanto, apresentado como uma alternativa tecnicamente viável, já que uma grande quantidade de biomassa residual fica prontamente disponível na cadeia de produção da mandioca. Essa biomassa tem aplicações potenciais como biocombustível, corretivo de solo, agente de captura de carbono e até mesmo eletrodos para supercapacitores no campo eletrônico.

Palavras-chave: Orinoquia; Processo termoquímico; Resíduos agrícolas; Valorização de biomassa.

Introducción

A medida que crece la población mundial, aumenta la demanda de recursos para alimentarla. Esta situación ha llevado a un mayor uso de los residuos agrícolas y agroindustriales. La yuca, un cultivo perenne de las regiones tropicales, es muy apreciada porque sus rizomas tienen un alto contenido de almidón. La yuca se utiliza para diversos fines, entre ellos alimento humano, pienso animal y bioetanol. Para 2020, la producción de yuca en Colombia era de aproximadamente 2,4 millones de toneladas en un área total sembrada de 205.118 ha en todo el territorio nacional (Rivera et al., 2021). En Colombia, el 4% se utiliza como yuca industrial en más de 5.000 ha cultivadas (Cárdenas, 2022). El departamento del Meta es el quinto productor de yuca, con una producción de 126.220 toneladas (MinAgricultura, 2021).

La producción y procesamiento de yuca se ha incrementado en los últimos años. Por lo tanto, la producción de residuos agronómicos y agroindustriales está aumentando. En la etapa de producción se generan ramas sin calidad para multipli-

cación vegetativa. En la etapa agroindustrial, se generan cáscaras después del proceso de pelado. Ambos residuos (cáscaras y ramas) son generalmente desperdiciados, generando problemas de contaminación asociados a lixiviación, contaminación de fuentes de agua y generación de plagas. El aprovechamiento comercial de estos residuos puede ser una alternativa para el desarrollo de economías rurales basadas en este cultivo.

La producción de biocarbón puede ser una alternativa de economía circular, porque se puede usar para tratar las aguas residuales de las rallanderías de yuca, o para enmendar oxisoles degradados (pobres y con alto contenido de aluminio) comunes en la Orinoquia colombiana donde están los cultivos de yuca. Devolver el biocarbón al suelo contribuye también con la fijación de carbono, pues este se queda en el suelo por años sin ser degradado por los microorganismos.

Así mismo, la incorporación de estos procesos a las empresas de yuca existentes mejoraría significativamente el balance económico, ampliando el

portafolio de productos de las empresas y la sostenibilidad e independencia de la estacionalidad de este cultivo. Teniendo en cuenta que gran parte de la Orinoquia no está interconectada a la red eléctrica nacional, el uso de calderas de carbón es frecuente, y la sustitución del carbón por biocarbón contribuiría significativamente a la descarbonización. Además, el uso de agroquímicos es una práctica común en Colombia. Entonces, se deben investigar nuevas alternativas para reducir el uso de compuestos de base química en la agricultura.

El biocarbón, un material muy poroso, se produce mediante la pirólisis de diversas fuentes, como residuos agrícolas (Gopal et al., 2020), hojas (Gartner et al., 2023), lodos (Mian et al., 2023) y residuos agroindustriales (Alonso-Gómez et al., 2016). Tiene diversas aplicaciones, como enmienda del suelo, combustible sólido, secuestro de CO₂ y suplemento de la dieta animal (Bhattacharya et al., 2024). La industria mundial del biocarbón tenía un valor aproximado de 1,8 millones de dólares en 2023 (Grand View Research, 2023). El biocarbón se compone de carbono, cenizas y otros elementos, y sus propiedades pueden variar en función del método de producción (Tepecik et al., 2024). La caracterización adecuada de la biomasa antes de la producción de biocarbón es crucial para la producción óptima y la identificación de usos potenciales.

La pirólisis lenta de biomasa a temperaturas comprendidas entre 350 y 600 °C se considera el mejor método para la producción de biocarbón (Tan et al., 2024). Para ello se utilizan diferentes reactores, como lechos fluidizados y hornos de paletas (Yaashikaa et al., 2020). El rendimiento del biocarbón viene determinado por la temperatura de pirólisis y el tamaño de las partículas de biomasa. Factores como la velocidad de calentamiento, el tiempo de calentamiento, el tiempo que se mantiene la temperatura más alta y el tipo de biomasa también determinan las características del biocarbón en pirólisis lenta (Zhang et al., 2024). El uso de biomasa lignocelulósica, como residuos agrícolas, forestales y agroindustriales, como materia prima en el proceso de pirólisis lenta tiene el potencial de añadir valor a residuos que actualmente no

tienen un uso específico. Estudios anteriores han informado de que el rendimiento del biocarbón durante la pirólisis y el valor calorífico del biocarbón varían en función de la biomasa y de las condiciones de pirólisis (Khater et al., 2024).

De esta manera, el biocarbón puede perfilarse como una opción potencial para contribuir a reducir el uso de combustibles fósiles (es decir, carbón) y fertilizantes químicos. Sin embargo, todavía existen vacíos técnicos, económicos y del conocimiento, como la estandarización del precio, y la falta de conocimiento sobre los beneficios del biocarbón y sus usos potenciales. Además, no se ha descrito en la literatura el rendimiento de la pirólisis considerando diferentes condiciones de operación (es decir, tasas de calentamiento y temperaturas finales) y la viabilidad tecno-económica de este proceso como una solución potencial en las regiones rurales de la región de la Orinoquia. Por lo tanto, son de resaltar investigaciones de la Universidad de los Llanos, encaminadas a evaluar la viabilidad técnica de la producción de biocarbón utilizando ramas y cáscaras de yuca. Es importante resaltar que en esta Universidad buscan identificar aplicaciones potenciales del biocarbón y mostrar el potencial económico que podría tener el aprovechamiento de biomasa residual de la yuca (Alonso-Gómez et al., 2024). La novedad de lo investigado en el programa de ingeniería Agroindustrial de la Unillanos radica en el uso de una variedad industrial colombiana (Melua-31) recientemente obtenida por Agrosavia y cultivada en la región de la Orinoquia para evaluar experimentalmente los rendimientos de la producción de biocarbón utilizando residuos de yuca y evaluar la prefactibilidad económica del proceso de pirólisis.

Incremento de la producción de yuca

La producción mundial de yuca alcanzó aproximadamente 298,8 millones de toneladas en 2020 y se espera alcanzar un volumen de 342 millones de toneladas para 2026 (IMARC, 2021). El cultivo de yuca, en todas sus variedades está catalogado como uno de los que mayor cantidad de personas

de bajos recursos alimenta en el mundo y por su versátil utilización en diversos procesos agroindustriales como uno de los cultivos que más residuos y subproductos genera (Chiranthika et al., 2022; de Souza y de Figueiredo, 2021). Este cultivo tiene la ventaja de que puede ser cultivado en una gran variedad de suelos, este factor hace que la yuca ocupe el cuarto lugar entre los alimentos básicos de la alimentación humana (Uchechukwu-Aqua et al., 2015).

Cabe resaltar que incluyendo los cereales, dentro de los cultivos amiláceos, la yuca es la especie que tiene el mayor rendimiento en cuanto a carbohidratos por unidad de área, esto a menor costo que los cereales (Chisenga et al., 2019). Los usos que tiene el almidón a escala industrial van desde lo alimenticio, en la panificación (Alonso-Gómez et al., 2016), pastas (Camelo-Méndez et al., 2018), alimentos libres de gluten (Castaño-Carvajal et al., 2019), edulcorantes y licores hasta lo farmacológico como base para productos farmacéuticos (Simpson et al., 2022). El almidón también es muy utilizado en productos no alimenticios como base para películas de biopolímeros (Hoyos-Yela et al., 2019), etanol (Alonso-Gómez et al., 2019) e incluso para mejorar las propiedades de flujo durante el transporte de petróleo pesado (Gudala et al., 2021).

En Colombia, el cultivo de la yuca ha presentado incremento en los últimos años como puede observarse en la Figura 1 (MinAgricultura, 2021).

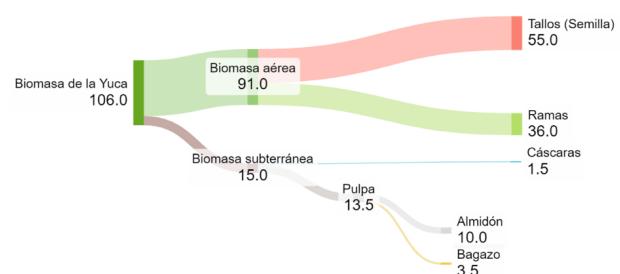
Figura 1. Área cosechada y producción 2015 – 2020 de yuca en Colombia.



Desde este punto de vista, la yuca se puede perfilar como una materia prima altamente competitiva, siempre y cuando sea llevada a procesos agroindustriales y sean utilizados todos sus residuos y subproductos, tal y como lo sugiere Padi & Chimphango (2020), quien indica los posibles usos de las aguas residuales de la producción de almidón, así como el aprovechamiento del bagazo (producto del aislamiento del almidón) y los tallos. Dicho autor demuestra que la coproducción de bioetanol y cogeneración en una biorrefinería de desechos de yuca tiene beneficios económicos y ambientales. Sin embargo, en la plataforma de carbohidratos de las biorrefinerías, existen muchos más productos potenciales.

Adaptado de Alonso-Gómez et al. (2024), la Figura 2 muestra un diagrama de Sankey que representa el flujo másico de las entradas y salidas en Ton/ha.

Figura 2. Diagrama de Sankey de un cultivo de yuca en Granada, Meta, Colombia (Ton/ha).



El mayor uso industrial de la yuca es la producción de harina, almidón nativo y almidón fermentado, en países como Colombia se producen 2 toneladas/día de almidón (Canales y Trujillo, 2021). Además, 1 tonelada de yuca fresca puede producir 280 kg de harina o 230 kg de almidón (Alarcón y Dufour, 1998). El rendimiento promedio de la yuca en Colombia fue de 16.5 Ton/ha teniendo en cuenta los datos de los años 2019, 2020 y 2021 (Cárdenas, 2022). Los productores han reportado que cada hectárea puede albergar hasta 10.000 plantas. El 60% de los tallos se utilizan para la producción de semilla, mientras que el 40% son ramas que suelen desecharse.

Oportunidad para potenciar la cadena productiva de la yuca en Colombia

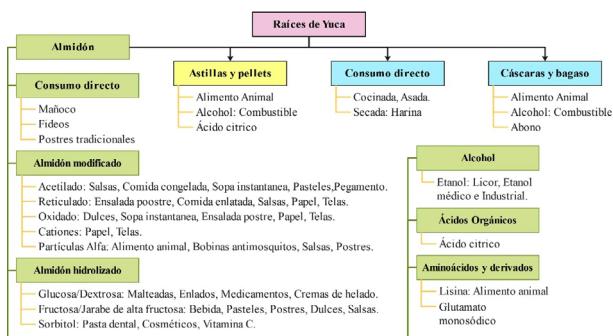
Las biorrefinerías son una innovadora propuesta que puede potencializar la agroindustria de la yuca y volverla sostenible. Las biorrefinerías se están proponiendo desde muchos centros de investigación y sistemas agroindustriales (Ortiz-Sánchez y Cardona-Alzate, 2022) como un medio para que la agroindustria se pueda considerar dentro de la economía circular. Las Biorrefinerías son complejos agroindustriales donde la biomasa es fraccionada para obtener una serie de productos de valor agregado a la vez que se producen también vectores energéticos, que sirven para satisfacer las necesidades de sostenibilidad de diferentes sectores productivos (Murthy, 2019).

Los diseños conceptuales han sido la principal manera de diseñar biorrefinerías. La estrategia de diseño conceptual conduce a un diseño basado en el conocimiento que involucra los conceptos de jerarquía, secuencia e integración (Cardona-Alzate et al., 2018). Este tipo de estrategia permite sintetizar la complejidad de una biorrefinería basándose en los principales componentes de las materias primas y los productos más relevantes para el mercado. Para diseñar y entender una potencial biorrefinería es necesario conocer muy bien todas las corrientes de una empresa y ver posibles usos para las corrientes que actualmente están siendo residuales.

La planta de yuca en su conjunto es útil, ya que sus raíces son comestibles y en algunos países africanos el consumo de las hojas es común, mientras que el "paloyuca" se explota principalmente para la propagación. En concreto, las raíces se procesan mediante varios métodos para obtener productos que se utilizan de diversas formas según la región, siendo su consumo directo el más común. Sin embargo, si las raíces de yuca no se procesan, se estropean rápidamente, aproximadamente en 48 horas (Sanni et al., 2005). El procesamiento no sólo ofrece la posibilidad de obtener productos derivados de la yuca de mayor valor y exportables,

como el almidón fermentado o modificado, la glucosa, y la harina, los cuales se pueden observar en la figura 3.

Figura 3. Posibilidades de uso y transformación de los productos y subproductos de la yuca.



Adaptado de: Awogbemi y col. 2024.

Características de los residuos de yuca

En esta sección se presentan las propiedades de los residuos generados en la etapa productiva y en la de la transformación de la yuca, que constituyen los tallos y las cáscaras. Las propiedades fisicoquímicas de los residuos son fundamentales, ya que revelan la forma en que los residuos interactúan física y químicamente con otras sustancias cuando tienen su disposición final pero también el potencial que tienen para ser utilizados en una biorrefinería.

Fisicoquímicas

Los valores obtenidos están dentro de los valores reportados en la literatura de 6,4 a 37,9% de celulosa, 6,3 a 65% de hemicelulosa y 6,7 a 31% de lignina (Keshav et al., 2023). Los contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina en cáscaras y ramas fueron similares a los de otras biomasas residuales como la cáscara de coco (Pawar et al., 2023). La composición química encontrada hace deducir que son potencialmente utilizables en procesos termoquímicos como la torrefacción, la pirólisis o la gasificación. Basándose en la caracterización, se deduce que de las cáscaras podría producirse

más bioaceite por el mayor valor de materia volátil, de igual manera a partir de esto se deduce que las cáscaras son más reactivas para los procesos termoquímicos, y se encuentra también que de las ramas podría producirse más biocarbón por el mayor valor de carbono fijo.

Tabla 1. Caracterización química, proximal y valor calorífico de ramas de yuca y cáscaras de yuca.

Análisis	Muestra	Cáscaras (%)	Ramas (%)
Composición química	Humedad	72.84	73.32
	Celulosa	43.03	35.97
	Hemicelulosa	17.42	6.30
	Lignina	10.42	21.99
	Cenizas	1.26	1.79

El contenido de humedad de la biomasa analizada hace pensar en que se aumenta el consumo energético del proceso de pirólisis, ya que debe ser eliminada la humedad al inicio del proceso para evitar la disminución del poder calorífico de los productos (Açıklan, 2022).

El bajo porcentaje de cenizas revelan la posibilidad de obtener productos con alto poder calorífico a partir de las dos materias primas. Como se ha mencionado anteriormente, este alto contenido en materia volátil facilita su reactividad térmica. Las diferencias encontradas entre esta biomasa residual y otras fuentes están relacionadas con factores como la composición química, el genotípico, la localización, las características nutricionales y minerales del suelo, el tipo de riego y las condiciones climáticas.

El pH del biocarbón de cascarras y tallos es ligeramente superior al neutro (7.11 – 8.87), mientras que la conductividad eléctrica oscila en el rango de 0.15 – 2.64 dS/m. El pH del biocarbón varía en función de la materia prima y del proceso de producción. El biocarbón procedente de materias primas con bajo contenido en cenizas, como los materiales leñosos, tiene un pH más bajo que el procedente

de materias primas con alto contenido en cenizas, como los residuos de cultivos o hierbas.

El biocarbón de cáscara y ramas de yuca puede utilizarse en cosmética. El impacto del pH y la conductividad varía en función del uso específico. Por ejemplo, las propiedades conductoras del biocarbón pueden ayudar a los ingredientes activos a penetrar en la piel cuando se utilizan junto con un vehículo para su aplicación en la industria cosmética, como jabones, crema de dientes o cremas. Además, el nivel de pH de un producto puede afectar al equilibrio del pH de la piel, lo que a su vez puede afectar a la función de barrera y a la permeabilidad de la piel. Por lo tanto, el nivel de pH del biocarbón podría influir potencialmente en la penetración de los ingredientes activos en la piel y mejorar la transferencia de electrones, lo que podría mejorar a las reacciones químicas en la superficie de la piel o dentro de las capas de la piel (Sasounian et al., 2024).

Termoquímicas

Tabla 2. Análisis químico y térmico de la biomasa.

Análisis	Muestra	Cáscaras (%)	Ramas (%)
Análisis proximal y valor calorífico	Carbono fijo	12.28	13.63
	Materia volátil	80.89	80.13
	MV/CF*	6.59	5.88
	Relación de combustible	0.15	0.17
	Estabilidad térmica	0.13	0.15
	Total	100.00	100.00
	PCS £(MJ/kg)	17.59	17.62

Nota: *MV/CF: Relación Material Volátil/Carbono Fijo. £ Poder calorífico superior

El alto contenido de material volátil denota que las cáscaras de yuca son una materia prima susceptible a la degradación térmica (Abdullah et al., 2023), con facilidad para actuar como combustibles en procesos de combustión (Athira et al., 2021) y adecuada para la producción de bioaceite y biogás (Foong et al., 2020).

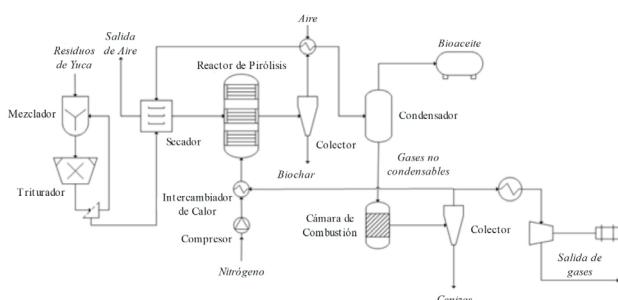
Las ramas y las cáscaras presentaron un valor poder calorífico superior (PCS) similar, 17,59 MJ/kg y 17,62 MJ/kg, respectivamente. Estos resultados son superiores a los obtenidos por Cruz et al. (2021), que fueron 15,39 MJ/kg para cáscaras y 15,76 MJ/kg para ramas, y a los reportados por Dávila-Caro et al. (2023) para cáscaras, 15,20 MJ/kg. Las cáscaras de yuca tienen un mayor PCS que el bagazo de caña de azúcar 16,53 MJ/kg (Kanwal et al., 2019) y que el pseudotallo de plátano 12,4 MJ/kg, pero menor que las mazorcas de maíz 18,23 MJ/kg (Abdullah et al., 2023), o la paja de arroz 19,70 MJ/kg (Wang et al., 2022).

Producción de biocarbón a partir de residuos de yuca

Basándose en los flujos básicos de la figura 2, se han propuesto plantas de procesamiento de cáscaras y ramas para convertirlas en biocarbón manejando unos caudales básicos para la planta de pirolisis de 2,9 Ton/h de ramas y 0,18 Ton/h de cáscaras. El flujo básico representa el 28% de la producción total de biomasa de yuca (Alonso-Gómez et al., 2024).

En la Figura 4 adaptada de Alonso-Gómez et al. (2024) se puede observar el diagrama de proceso de la pirolisis lenta de residuos agrícolas y agroindustriales de la cadena productiva de la yuca.

Figura 4. Diseño conceptual de una biorrefinería de plataforma termoquímica para la producción de gases no condensables, bioaceite (gases condensables) y biochar a partir de residuos agroindustriales de la cadena productiva de yuca.



Los equipos establecidos para la pirolisis de residuos de yuca, como mínimo deben ser, cintas transportadoras y tornillos sinfín para alimentar los equipos y transportar materias primas, secador rotatorio, molino triturador, cámara de calentamiento, ciclón para recolectar cenizas, condensador de alquitrán, tornillo de agua para enfriar el biocarbón, ventilador de tiro para reciclar los gases calientes y por último pero lo más importante el pirolizador.

Biocarbón a partir de residuos de yuca: características físicas y térmicas

Teniendo en cuenta que el principal producto de la pirolisis lenta es el biocarbón, a continuación, se describen las principales características de este producto. La conductividad eléctrica del biocarbón refleja su capacidad para conducir la electricidad y si es utilizado en el suelo, indica la mejora de sus propiedades, como la porosidad, la agregación y la capacidad de retención de agua. Estas características mejoran la biodisponibilidad de nutrientes y el crecimiento microbiano (Tsolis y Barouchas, 2023), haciendo del biocarbón con alta conductividad (por ejemplo, ramas y cáscaras pirolizadas a 300°C con una rampa de 10°C/min) una opción favorable para la mejora del suelo.

El uso excesivo de fertilizantes químicos puede conducir a la acidez del suelo, pero el comportamiento alcalino del biocarbón puede ayudar a disminuirla. Una alta conductividad eléctrica permite además, en proceso de digestión anaerobia, la transferencia directa de electrones entre especies microbianas para la producción de biogás (Ding et al., 2024). Por lo tanto, los avances en el uso del biochar confirman la importancia que este tiene, no solamente en la mejora de la capacidad de intercambio catiónico entre el suelo y las raíces vegetales, sino también desde el punto de vista ambiental por el hecho de ser una manera de secuestrar carbono (Liu et al., 2024).

Los productos de pirólisis obtenidos indican una tendencia a producir biocarbón a 300 °C. Sin embargo, hay una mayor producción de gases no condensables (GNC) cuando se piroliza a temperaturas más altas, que está relacionada con la descomposición primaria, pero también la secundaria del biocarbón (Abdullah et al., 2023). Este comportamiento favorece la producción de gases y gases condensables (Bioaceite). Cuanto mayor es la temperatura, menor es el producto sólido porque elimina los hidrocarburos y descompone la celulosa y la hemicelulosa en una forma gaseosa de mayor volatilidad (Siddiqui et al., 2019). Del mismo modo, las tasas de calentamiento son relevantes, ya que la reacción de repolimerización de los vapores craqueados liberados por la biomasa se genera a bajas tasas de calentamiento, produciendo más biocarbón y bioaceite. Por el contrario, altas tasas conducen a la rápida extinción de los vapores volátiles liberados en el craqueo, permitiendo el aumento del GNC, (Meili et al., 2019; Patra et al., 2021). Sin embargo, varios estudios han apoyado esta afirmación de que la duración del proceso de pirólisis no afecta el rendimiento de productos (Siddiqui et al., 2019), el factor más preponderante es la temperatura máxima.

Después de someter las muestras al proceso de pirólisis, el biocarbón obtenido, tiene un PCS más alto que las muestras sin tratar. El contenido de carbono fijo juega un papel importante en el aumento del PCS. Además, la saturación de los anillos aromáticos con el proceso de pirólisis provoca periódicamente un mayor contenido de carbono fijo (Rangabhashiyam y Balasubramanian, 2019; Siddiqui et al., 2019). El elevado PCS puede deberse a un aumento del contenido de carbono fijo del biocarbón. De hecho, las altas temperaturas, velocidades de calentamiento y tiempos de residencia promueven una mayor volatilización de la materia orgánica, dejando sólo carbono fijo y cenizas. Este principio está relacionado con el proceso de densificación energética, ya que los compuestos de oxígeno deben eliminarse para aumentar el componente energético de un combustible (es decir, se desean relaciones atómicas O/C y O/H bajas) (Egbosiuba, 2022).

Conclusiones

El diseño conceptual de una biorrefinería de plataforma termoquímica para la transformación de residuos agrícolas y agroindustriales de la yuca, ofrece un primer acercamiento para ser analizado por medio de la ingeniería de detalle y así determinar la potencial viabilidad de este tipo de proyectos en la Orinoquia colombiana. Los productos de una biorrefinería de yuca pueden ofrecer a los productores nuevas alternativas de diversificación o de cogeneración de energía en la misma agroindustria.

Usar el biocarbón en los cultivos de yuca puede mejorar los índices de productividad y hace que la cadena productiva entre en la economía circular al cerrar el ciclo usando productos y subproductos de la cadena. La densificación de la energía en forma de biocarbón facilita el almacenamiento y posibilita la soberanía energética de zonas no interconectadas de la Orinoquia colombiana.

Agradecimientos

Celis-Carmona y Rodriguez-Sánchez agradecen al instituto de biotecnología y agroindustria de la UNAL, Manizales por el apoyo en la caracterización de las muestras y al laboratorio de Pirolisis de la Universidad de los Llanos por la autorización de uso del reactor de pirólisis.

Referencias

1. Abdullah, N., Mohd-Taib, R., Mohamad-Aziz, N. S., Omar, M. R. y Md-Disa, N. (2023). Banana pseudo-stem biochar derived from slow and fast pyrolysis process. *Helixon*, 9(1), e12940. <https://doi.org/10.1016/j.helixon.2023.e12940>
2. Açıkalın, K. (2022). Evaluation of orange and potato peels as an energy source: A comprehensive study on their pyrolysis characteristics and kinetics. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(2), 501-514. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01387-z>

3. Adeboye, B. S., Adewole, B. Z., Adedoja, A. M., Obayopo, S. O., Asere, A. A., Kayode, O., Idris, M. O. y Okediran, I. K. (2021). Optimization and modeling of process parameters on the yield of enhanced pyrolysis oil during co-pyrolysis of cassava peel with polystyrene. *Environmental Challenges*, 5, 100347. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100347>
4. Alarcón, F., y Dufour, D. (1998). Almidón agrio de Yuca en Colombia. Tomo 1: Producción y Recomendaciones. En F. Motta, y G. Rodríguez (Eds.), Almidón agrio de Yuca en Colombia. CIAT. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/17538>
5. Alonso-Gómez, L. A., Celis-Carmona, D. D., Rodríguez-Sánchez, Y. F., Castro-Ladino, J. R. y Solarte-Toro, J. C. (2024). Biochar production from cassava waste biomass: A techno-economic development approach in the Colombian context. *Bioresource Technology Reports*, 26, 101872. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101872>
6. Alonso Gómez, L. A., Heredia Olea, E., Serna Saldivar, S. O. y Bello Pérez, L. A. (2019). Whole unripe plantain (*Musa paradisiaca* L.) as raw material for bioethanol production. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(13), 5784-5791. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9847>
7. Alonso-Gómez, L., Cruz-Dominguez, A., Jiménez-Madrid, D. y Ocampo-Duran, Á. (2016). Biochar as an amendment in an oxisol and its efect in the grow of corn. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 19(2), 341-349. <https://doi.org/10.31910/rudca.v19.n2.2016.88>
8. Alonso-Gómez, L., Niño-López, A. M., Romero-Garzón, A. M., Pineda-Gómez, P., del Real-Lopez, A. y Rodriguez-Garcia, M. E. (2016). Physicochemical transformation of cassava starch during fermentation for production of sour starch in Colombia. *Starch - Stärke*, 68, 1-9. <https://doi.org/10.1002/star.201600059>
9. Athira, G., Bahurudeen, A y Appari, S. (2021). Thermochemical Conversion of Sugarcane Bagasse: Composition, Reaction Kinetics, and Characterisation of By-Products. *Sugar Tech*, 23(2), 433-452. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00865-4>
10. Awogbemi, O., Von Kallon, D.V., Ray, R.C. (2024). Transformation of Cassava Wastes into Useful Products. In: Arora, J., Joshi, A., Ray, R.C. (eds) Transforming Agriculture Residues for Sustainable Development. Waste as a Resource. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61133-9_15
11. Bhattacharya, T., Khan, A., Ghosh, T., Kim, J. T. y Rhim, J.-W. (2024). Advances and prospects for biochar utilization in food processing and packaging applications. *Sustainable Materials and Technologies*, 39, e00831. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e00831>
12. Camelo-Méndez, G. A., Tovar, J. y Bello-Pérez, L. A. (2018). Influence of blue maize flour on gluten-free pasta quality and antioxidant retention characteristics. *Journal of Food Science and Technology*, 55(7), 2739-2748. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3196-9>
13. Canales, N. y Trujillo, M. (2021). La red de valor de la yuca y su potencial en la bioeconomía de Colombia. *Instituto de Ambiente de Estocolmo*, 1-30.

14. Cárdenas, L. (21 de julio de 2022). Yuca País inicia la entrega de beneficios que buscan fortalecer la cadena de valor de la yuca en el Caribe. *Agrosavia*. <https://www.agrosavia.co/noticias/yuca-pais>
15. Cardona-Alzate, C. A., Moncada-Botero, J. y Aristizábal-Marulanda, V. (2018). Biorefineries: Design and Analysis. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315114088>
16. Castaño-Carvajal, M. F., Correa-Giraldo, D. y Agudelo-Laverde (2019). Elaboración de productos tipo tallarín libres de gluten y evaluación de sus propiedades fisicoquímicas. *Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica*, 22(1). <https://doi.org/10.31910/RUDCA.V22.N1.2019.1194>
17. Chiranthika, N. N. G., Chandrasekara, A. y Gunathilake, K. D. P. P. (2022). Physicochemical characterization of flours and starches derived from selected underutilized roots and tuber crops grown in Sri Lanka. *Food Hydrocolloids*, 124, 107272. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107272>
18. Chisenga, S. M., Workneh, T. S., Bultosa, G. y Alimi, B. A. (2019). Progress in research and applications of cassava flour and starch: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 56(6), 2799-2813. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03814-6>
19. Cruz, G., Rodrigues, A. D. L. P., da Silva, D. F. y Gomes, W. C. (2021). Physical-chemical characterization and thermal behavior of cassava harvest waste for application in thermochemical processes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 143(5), 3611-3622. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09330-6>
20. Dávila-Caro, L. I., Pugliese-Barbosa, K., Castillo-Santiago, Y., Albis-Arrieta, A. R., Yepes-Maya, D. M., Ocampo-Batlle, E. A., Grillo-Renó, M. L., Espinosa-Sarmiento, A. L. y Restrepo-Betancourt, J. B. (2023). Valorización energética de biomasa residual de yuca para precursores de alto valor energético: Caso pirólisis. *Tecnología en Marcha*. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i10.7007>
21. de Souza, J. M. y de Figueiredo L. L. L. (2021). Soil-cement brick with cassava wastewater. *Use of Cassava Wastewater and Scheelite Residues in Ceramic Formulations*, 11-31. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58782-6_2
22. Ding, J., Zhen, F., Kong, X., Hu, Y., Zhang, Y. Y Gong, L. (2024). Effect of Biochar in Modulating Anaerobic Digestion Performance and Microbial Structure Community of Different Inoculum Sources. *Fermentation*, 10(3), 151. <https://doi.org/10.3390/fermentation10030151>
23. Egbosiuba, T. C. (2022). Biochar and bio-oil fuel properties from nickel nanoparticles assisted pyrolysis of cassava peel. *Helijon*, 8(8), e10114. <https://doi.org/10.1016/j.helijon.2022.e10114>
24. Foong, S. Y., Abdul, L. N. S., Liew, R. K., Yek, P. N. Y., & Lam, S. S. (2020). Production of biochar for potential catalytic and energy applications via microwave vacuum pyrolysis conversion of cassava stem. *Materials Science for Energy Technologies*, 3, 728-733. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2020.08.002>
25. Gopal, M., Gupta, A., Shahul, H. K., Sathyaseelan, N., Khadeejath, R. T. H. y Thomas, G. V. (2020). Biochars produced from coconut palm biomass residues can aid regenerative agriculture by improving soil properties and plant yield in humid tropics. *Biochar*, 2(2), 211-226. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00043-5>

26. Grand View Research (2023). *Biochar Market Size, Share & Trends Analysis Report By Technology (Gasification, Pyrolysis), By Application (Agriculture, Others), By Region (North America, Asia Pacific), And Segment Forecasts, 2024 – 2030*. Grand View Research. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/biochar-market>
27. Gudala, M., Naiya, T. K. y Govindarajan, S. K. (2021). Remediation of heavy oil transportation problems via pipelines using biodegradable additives: An experimental and artificial intelligence approach. *SPE Journal*, 26(2), 1050-1071. <https://doi.org/10.2118/203824-PA>
28. Gurtner, D., Kresta, M., Hupfauf, B., Götz, P., Nussbaumer, R., Hofmann, A. y Pfeifer, C. (2023). Mechanical strength characterisation of pyrolysis biochar from woody biomass. *Energy*, 285, 129366. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129366>
29. Hoyos-Yela, N., Pérez-Imbachí, R., Mosquera-Sánchez, S. A. y Paz-Peña, S. P. (2019). Efecto de la aplicación de un recubrimiento de almidón de yuca modificado por vía ácida sobre el tomate larga vida. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 22(2). <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n2.2019.1388>
30. IMARC. (2021). *Cassava processing market: Global industry trends, share, size, growth, opportunity and forecast 2021–2026*. Businesswire. <https://www.businesswire.com/news/home/20210524005470/en/Global-Cassava-Processing-Market-2021-to-2026---Industry-Trends-Share-Size-Growth-Opportunity-and-Forecasts--ResearchAndMarkets.com>
31. Kanwal, S., Chaudhry, N., Munir, S. y Sana, H. (2019). Effect of torrefaction conditions on the physicochemical characterization of agricultural waste (sugarcane bagasse). *Waste Management*, 88, 280-290. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.053>
32. Keshav, P. K., Banoth, C., Kethavath, S. N. y Bhukya, B. (2023). Lignocellulosic ethanol production from cotton stalk: An overview on pretreatment, saccharification and fermentation methods for improved bioconversion process. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(6), 4477-4493. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01468-z>
33. Khater, E.-S., Bahnsawy, A., Hamouda, R., Sabahy, A., Abbas, W. y Morsy, O. M. (2024). Biochar production under different pyrolysis temperatures with different types of agricultural wastes. *Scientific Reports*, 14(1), 2625. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52336-5>
34. Liu, G., Liu, L., Liu, H. y Zheng, H. (2024). Investigating CO₂ sequestration properties of biochar shotcrete. *Construction and Building Materials*, 443, 137779. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137779>
35. Meili, L., Godoy, R. P. S., Soletti, J. I., Carvalho, S. H. V., Ribeiro, L. M. O., Silva, M. G. C., Vieira, M. G. A. y Gimenes, M. L. (2019). Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) stump biochar: Physical/chemical characteristics and dye affinity. *Chemical Engineering Communications*, 206(7), 829-841. <https://doi.org/10.1080/00986445.2018.1530991>
36. Mian, M. M., Ao, W. y Deng, S. (2023). Sludge-based biochar adsorbent: Pore tuning mechanisms, challenges, and role in carbon sequestration. *Biochar*, 5(1), 83. <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00288-w>

37. MinAgricultura. (2021). Reporte:Área, Producción y Rendimiento Nacional por Cultivo. Agronet. <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>
38. Murthy, G. S. (2019). *Systems Analysis Frameworks for Biorefineries*. En Pandey, A., Larroche, C., Gnansounou, E., Khanal, S. K., Dussap, C. G. y Riche, S. (Eds.), (pp. 77-92). Academic press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816856-1.00003-8>
39. Ortiz-Sánchez, M. y Cardona-Alzate, C. A. (2022). Analysis of the routes for biomass processing towards sustainable development in the conceptual design step: Strategy based on the compendium of bioprocesses portfolio. *Bioresource Technology*, 350, 126852. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126852>
40. Padi, R. K. y Chimphango, A. (2020). Feasibility of commercial waste biorefineries for cassava starch industries: Techno-economic assessment. *Bioresource Technology*, 297, 122461. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122461>
41. Patra, B. R., Nanda, S., Dalai, A. K. y Meda, V. (2021). Slow pyrolysis of agro-food wastes and physicochemical characterization of biofuel products. *Chemosphere*, 285, 131431. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131431>
42. Pawar, A., Panwar, N. L., Jain, S., Jain, N. K. y Gupta, T. (2023). Thermal degradation of coconut husk waste biomass under non-isothermal condition. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(9), 7613-7622. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01657-w>
43. Rangabhashiyam, S. y Balasubramanian, P. (2019). The potential of lignocellulosic biomass precursors for biochar production: Performance, mechanism and wastewater application—A review. *Industrial Crops and Products*, 128, 405-423. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.11.041>
44. Rivera, T. C., Andrade, R. S., Labarta, R., Calle, F. y Becerra López-Lavelle, L. (2021). Boletín informativo del sector yuquero Colombia 2007-2020. Centro único del CGIAR. <https://hdl.handle.net/10568/116234>
45. Sanni, L., Maziya-Dixon, B., Akanya, J., Okoro, C., Alaya, Y., Egwuonwu, C., Okechukwu, R., Ezedinma, C., Akoroda, M.O., Lemchi, L., Ogbe, F., Tarawali, G., Mkumbira, J., Ospina-Patino, M., Ssemakula, G. y Dixon, A. (2005). Standards for Cassava Products and Guidelines for Export. IITA. https://www.researchgate.net/publication/265794625_Standards_for_Cassava_Products_and_Guidelines_for_Export
46. Sasounian, R., Martinez, R. M., Lopes, A. M., Giarolla, J., Rosado, C., Magalhães, W. V., Velasco, M. V. R., y Baby, A. R. (2024). Innovative approaches to an eco-friendly cosmetic industry: a review of sustainable ingredients. *Clean Technologies*, 6(1), 176-198. <https://doi.org/10.3390/cleantechol6010011>
47. Siddiqui, M.T.H., Nizamuddin, S., Mubarak, N. M., Shirin, K., Aijaz, M., Hussain, M. y Baloch, H. A. (2019). Characterization and Process Optimization of Biochar Produced Using Novel Biomass, Waste Pomegranate Peel: A Response Surface Methodology Approach. *Waste and Biomass Valorization*, 10(3), 521-532. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0091-y>

48. Simpson, I. K., Owusu, F. W. A., Boakye-Gyasi, M. E., Entsie, P., Bayor, M. T. y Ofori-Kwakye, K. (2022). Pharmaceutical Applications of Glucose Syrup from High Quality Cassava Flour in Oral Liquid Formulations. *International Journal of Food Science*, 2022(1), 6869122. <https://doi.org/10.1155/2022/6869122>
49. Tan, Z., Li, Y., Chen, F., Liu, J., Zhong, J., Guo, L., Zhang, R. y Chen, R. (2024). Challenges and Perspectives of the Conversion of Lignin Waste to High-Value Chemicals by Pyrolysis. *Processes*, 12(3), 589. <https://doi.org/10.3390/pr12030589>
50. Tepecik, M., Ekren, S., Ongun, A. R. y Sarikaya, N. B. (2024). Effects of biochar treatments on the elemental composition of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) leaves based on the priming period. *Helijon*, 10(1), E23307. <https://doi.org/10.1016/j.helijon.2023.e23307>
51. Tsolis, V. y Barouchas, P. (2023). *Biochar as Soil Amendment: The Effect of Biochar on Soil Properties Using VIS-NIR Diffuse Reflectance Spectroscopy, Biochar Aging and Soil Microbiology—A Review*. *Land*, 12(8), 1580. <https://doi.org/10.3390/land12081580>
52. Uchechukwu-Aqua, A. D., Caleb, O. J. y Opara, U. L. (2015). Postharvest Handling and Storage of Fresh Cassava Root and Products: A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 8(4), 729-748. <https://doi.org/10.1007/S11947-015-1478-Z>
53. Wang, L., Olsen, M. N. P., Moni, C., Dieguez-Alonso, A., de la Rosa, J. M., Stenrød, M., Liu, X. y 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://doi.org/10.1016/j.jaecs.2022.100090>
54. Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S., Varjani, S. y Saravanan, A. (2020). A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. *Biotechnology Reports*, 28, e00570. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00570>
55. Zhang, G., Chen, Z., Chen, T., Jiang, S., Evrendilek, F., Huang, S., Tang, X., Ding, Z., He, Y., Xie, W. y Liu, J. (2024). Energetic, bio-oil, biochar, and ash performances of co-pyrolysis-gasification of textile dyeing sludge and Chinese medicine residues in response to K₂CO₃, atmosphere type, blend ratio, and temperature. *Journal of Environmental Sciences*, 136, 133-150. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.10.009>