

# Characterization of Two Lignocellulosic Biomasses *Coffea Arabica L.* for the production of Biochar

Jean Paredes, Bach<sup>1</sup>, Victor Pretell, MSc<sup>1</sup>, Alex Pilco, MSc<sup>1</sup>, Williams Ramos, MSc<sup>1</sup>, Carlos Ubillas, Ing<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, jean.paredes.t@uni.pe, vpretellh@uni.edu.pe, apilco@uni.edu.pe,  
wramosv@uni.edu.pe and carlos.ubillas.a@uni.pe

*Abstract– In Peru, the growing production of agricultural crops such as coffee generates large volumes of solid waste. In 2020 alone, around 598 thousand tons of lignocellulosic waste were obtained from the coffee harvest, which, for the most part, are dumped in the field and used as compost or burned for the operation of machinery, causing environmental and health problems. Two agricultural biomasses from the coffee harvest (pulp and husk) were characterized by elemental analysis (C, H, O, N and S), calorific value, pH, proximate analysis (moisture content, ash, volatile matter, and fixed carbon), chemical analysis (cellulose, lignin and holocellulose), thermogravimetric analysis and IR spectroscopy. The values reported for the elemental, proximal, chemical, calorific value and pH analyzes agree with those obtained in previous studies and they are indicators of a great potential to produce biochar through thermochemical processes such as pyrolysis or gasification. Finally, higher contents of lignin, ashes and fixed carbon were obtained for the coffee pulp, turning out to be a better precursor for biochar applied to soil conditioning, unlike the coffee husk that, due to the lower content of ashes, turns out to be a better precursor. for obtaining biofuels.*

**Keywords:** Biomass, Characterization, Physicochemical Properties, Biochar, Lignocellulosic Residues.

**Digital Object Identifier (DOI):**

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.344>

**ISBN:** 978-628-95207-0-5 **ISSN:** 2414-6390

# Caracterización de Dos Biomásas Lignocelulósicas *Coffea Arabica L.* para la producción de Biocarbón

## Characterization of Two Lignocellulosic Biomasses *Coffea Arabica L.* for the production of Biochar

Jean Paredes, Bach<sup>1</sup>, Victor Pretell, MSc<sup>1</sup>, Alex Pilco, MSc<sup>1</sup>, Williams Ramos, MSc<sup>1</sup>, Carlos Ubillas, Ing<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, jean.paredes.t@uni.pe, vpretell@uni.edu.pe, apilco@uni.edu.pe, wramosv@uni.edu.pe and carlos.ubillas.a@uni.pe

**Resumen**– En el Perú la creciente producción de cultivos agrícolas como el café genera grandes volúmenes de residuos sólidos. Solo en el año 2020 se obtuvieron alrededor de 598 mil toneladas de residuos lignocelulósicos provenientes de la cosecha de café; los cuales, en su mayoría, son vertidos en el campo o utilizados como compost o quemados para el funcionamiento de maquinaria, provocando problemas medioambientales y de salud. Se caracterizaron dos biomásas agrícolas provenientes de la cosecha de café (pulpa y cascarrilla) mediante análisis elemental (C, H, O, N y S), poder calorífico, pH, análisis próximo (contenido de humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo), análisis químico (celulosa, lignina y holocelulosa), análisis termogravimétrico y espectroscopía IR. Los valores reportados para el análisis elemental, próximo, químico, poder calorífico y pH concuerdan con los obtenidos en estudios anteriores y son indicadores de un gran potencial para la producción de biocarbón mediante procesos termoquímicos como la pirólisis o gasificación. Finalmente se obtuvieron mayores contenidos de lignina, cenizas y carbono fijo para la pulpa de café, resultando ser un mejor precursor para biocarbón aplicado al acondicionamiento de suelos, a diferencia de la cascarrilla de café que debido al menor contenido de cenizas resulta ser un mejor precursor para la obtención de biocombustibles.

**Palabras clave:** Biomasa, Caracterización, Propiedades Físicoquímicas, Biocarbón, Residuos Lignocelulósicos.

**Abstract**– In Peru, the growing production of agricultural crops such as coffee generates large volumes of solid waste. In 2020 alone, around 598 thousand tons of lignocellulosic waste were obtained from the coffee harvest, which, for the most part, are dumped in the field and used as compost or burned for the operation of machinery, causing environmental and health problems. Two agricultural biomasses from the coffee harvest (pulp and husk) were characterized by elemental analysis (C, H, O, N and S), calorific value, pH, proximate analysis (moisture content, ash, volatile matter, and fixed carbon), chemical analysis (cellulose, lignin and holocellulose), thermogravimetric analysis and IR spectroscopy. The values reported for the elemental, proximal, chemical, calorific value and pH analyzes agree with those obtained in previous studies and they are indicators of a great potential to produce biochar through thermochemical processes such as pyrolysis or gasification. Finally, higher contents of lignin, ashes and fixed carbon were obtained for the

coffee pulp, turning out to be a better precursor for biochar applied to soil conditioning, unlike the coffee husk that, due to the lower content of ashes, turns out to be a better precursor for obtaining biofuels.

**Keywords:** Biomass, Characterization, Physicochemical Properties, Biochar, Lignocellulosic Residues.

### I. INTRODUCCIÓN

La biomasa obtenida a partir de residuos lignocelulósicos está compuesta por un conjunto heterogéneo de sustancias orgánicas que dependen de su origen y naturaleza [1]. Se han desarrollado diversas investigaciones sobre la conversión de biomasa en productos de mayor valor agregado, como es el biocarbón [2], [3]. El biocarbón es un material carbonoso que se obtiene sometiendo a la biomasa a procesos de conversión térmica como la pirólisis, en condiciones mínimas o nulas de oxígeno y elevadas temperaturas [4].

El biocarbón posee propiedades fisicoquímicas tales como su capacidad de retención de agua, alto nivel de pH y porosidad. Las cuales permiten su aplicación en diversas actividades, siendo las más comunes mejorar la fertilidad de suelos agrícolas, combustión del biocarbón para generación eléctrica; siendo una aplicación popular, su uso como carbón activado para la remediación de suelos contaminados con compuestos orgánicos y la eliminación de metales pesados en los relaves mineros [5]-[7]. El uso de este recurso es de gran importancia, ya que representa una disminución de emisiones de gases de efecto invernadero y contaminación de los cuerpos receptores ambientales [8].

El sector agrícola peruano creció un 60 % en los últimos años, siendo el café el producto agrícola más exportado. La producción de café pergamino se duplicó en las dos últimas décadas alcanzando las 374 mil toneladas, de tal manera que se generó alrededor de 598 mil toneladas de residuos agrícolas [9], siendo este último el precursor de problemas ambientales y de salud.

Hay más de cien especies del género “Coffea”, sin embargo, el *Coffea Canephora* y *Coffea Arabica* son las de mayor demanda, donde esta última representa el 60 % de la producción mundial de café [10]. En Perú, la planta de café de mayor demanda es la *Coffea Arabica*, por sus propiedades en sabor, aroma y acidez, donde el 43% de la producción está

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.344>

ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

ubicado en el centro del país, con alrededor de 79 mil hectáreas son de cultivos de grano café. En la región de Pasco en el año 2020 se produjo alrededor de 14 mil toneladas de café pergamino, y 18 mil toneladas de pulpa y más de 4 mil toneladas de cascarilla de café de residuos de agrícolas [9], [11]. La Fig. 1 resume la producción anual de café pergamino y sus residuos.

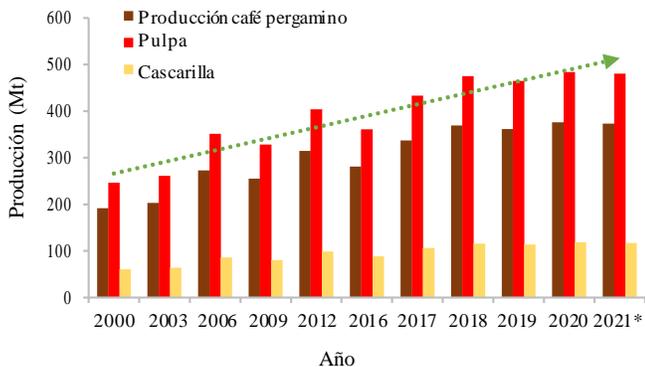


Fig. 1 Producción anual del café pergamino y los residuos agrícolas generados (pulpa y cascarilla) en el Perú, periodo 2000-2021

La industria agrícola genera grandes cantidades de residuos sólidos provenientes de la cosecha de diversos productos agrícolas, dependiendo del método de cosecha que se utilice, sea seco o húmedo, se obtienen residuos tales como pulpa, mucílagos, cascarilla y piel plateada [12]. El método más utilizado generalmente es el húmedo debido a la mejor calidad del producto, menores tiempos de cosecha y costos [13].

En la Fig. 2 se visualiza el proceso de producción de café húmedo por cada kilogramo de cereza de café madura, donde se estima que solo el 6% del peso es café soluble para consumo, generando así residuos sólidos de pulpa y cascarilla (mixto de pergamino y piel plateada) que son el 56% del peso total del proceso de producción [12].

Estos residuos se han convertido en una fuente de contaminación severa y plantean graves problemas ambientales. La eliminación de la pulpa de cafés es un problema emergente a nivel mundial por su putrefacción y se calcula que anualmente más de 2 millones de toneladas son acumuladas y dispuestas en campo abierto contaminando las fuentes de agua [14]. Cuando la cascarilla se quema o pudre al aire libre libera grandes cantidades de gases como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) o metano (CH<sub>4</sub>) los cuales son considerados elementos precursores del efecto invernadero [15].

Existen diversos métodos de gestión de residuos agrícolas tales como su uso de manera directa en los suelos como abono, compost, procesos de combustión para generación de energía eléctrica, entre otros [16], [14]. Sin embargo, estas aplicaciones son poco eficientes y se asocian con problemas ambientales; es por ello, por lo que surge la necesidad de aplicar nuevos procesos para su mejor disposición, siendo uno de los más estudiados los procesos termoquímicos, como la pirólisis o gasificación, para la conversión de biomasa en biocarbón [21].

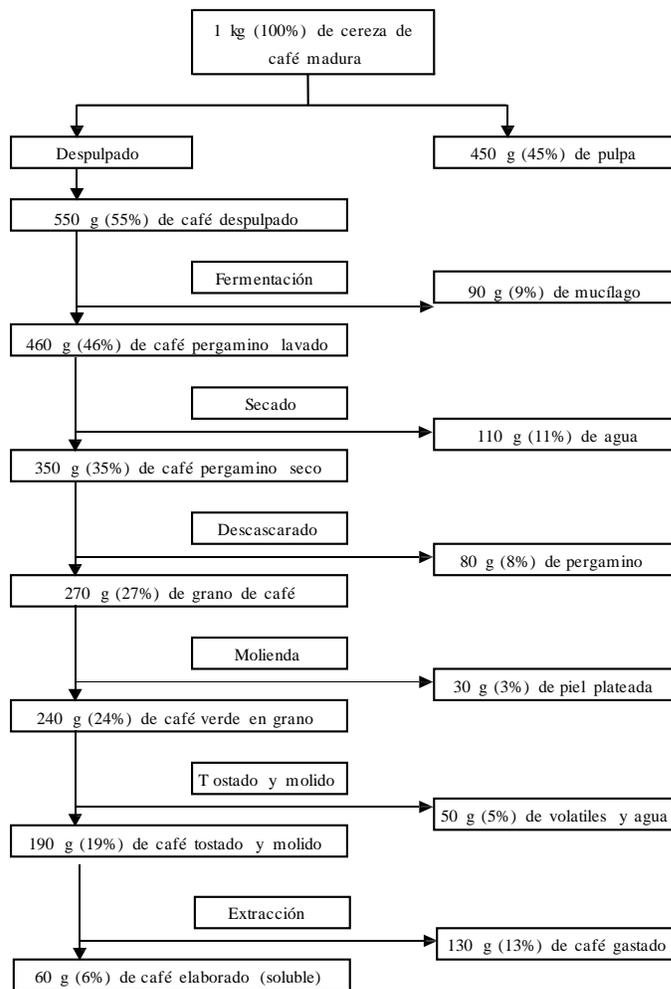


Fig. 2 Diagrama del proceso de obtención del café elaborado y residuos agrícolas (pulpa y cascarilla), por cada kilogramo de cereza de café madura

A pesar de su potencial para la aplicación en procesos termoquímicos, la biomasa presenta una serie de desventajas, tales como su baja densidad aparente, alto contenido de humedad, acondicionamiento de la carga en forma y tamaño [17]; por todo lo mencionado anteriormente es importante analizar sus propiedades fisicoquímicas para un uso eficiente. La biomasa de residuos lignocelulósicos es caracterizada por su poder calorífico, pH, análisis próximo (humedad, materia volátil, ceniza y carbono fijo), análisis químico (celulosa, hemicelulosa y lignina), análisis elemental (contenido de C, H, N, O, S) y análisis termogravimétrico [18]. Asimismo, la medición del espectro IR nos brinda información de los grupos funcionales que componen la biomasa.

Esta investigación busca caracterizar dos biomásas agroindustriales peruanas, pulpa y cascarilla de café para aprovechar estos residuos lignocelulósicos para la producción de biocarbón con fines de remediación ambiental empleando procesos termoquímicos.

## II. METODOLOGÍA

### A. Selección de la muestra

Se obtuvieron dos biomásas residuales: 50 kg de pulpa y 60 kg de cascarilla de café adquiridas de la Finca La Ponderosa ubicada en Villa Rica, Oxapampa, Pasco-Perú. Estas se secaron en un espacio ventilado hasta una humedad menor al 11 %, para posteriormente ser pulverizadas en un molino de cuchillas hasta un tamaño de partícula menor a 850  $\mu\text{m}$  y ser tamizadas y clasificadas por tamaño según la especificación del método aplicado para su caracterización. Luego se almacenaron en recipientes herméticos y en un ambiente ventilado para preservarlas adecuadamente para su uso posterior.

### B. Análisis Elemental

El análisis se realizó según las normas ASTM D5373-Metodo A para el contenido de Carbono, Nitrógeno, Oxígeno e Hidrógeno y ASTM D4239 para el contenido de Azufre. Se utilizó analizador elemental de marca LECO, modelo 628 Series y el módulo 628 Series Sulfur Add-On Module. Las muestras con un tamaño de partícula menor a 250  $\mu\text{m}$  fueron previamente secadas y acondicionadas a 105 °C por 24 h, cada uno de los análisis fue realizado tres veces, reportando los resultados en base seca.

### C. Análisis Próximo

Este análisis se realizó de acuerdo con la norma ASTM D7582. Se utilizó el analizador termogravimétrico TGA 4000 de Perkin Elmer. El cual se programó con un medio inerte de nitrógeno (70  $\text{cm}^3/\text{min}$ ) desde temperatura ambiente hasta 105 °C (a 15 °C/min), para luego continuar a temperatura constante por 80 minutos, posteriormente se empleó una rampa de calentamiento de 30 °C/min para alcanzar los 950 °C, y mantener la isoterma a 950 °C por 7 minutos. La determinación del contenido de ceniza se realizó desde temperatura ambiente hasta 750 °C (a 8 °C/min) con un flujo de oxígeno de 70  $\text{cm}^3/\text{min}$ . En ambas pruebas se pesó aproximadamente 1 mg de biomasa con un tamaño de partícula menor a 250  $\mu\text{m}$ , previamente acondicionada en un desecador por un periodo de 24 horas. Se realizó el ensayo un mínimo de dos veces y se reportó los resultados en base, así como es recibido.

### D. Poder Calorífico

Se empleó la norma ASTM D5865, para la determinación del Poder Calorífico Superior (PCS). Para ello, 1 g de biomasa con tamaño de partícula menor a 850  $\mu\text{m}$ , se quemó en una bomba calorimétrica adiabática (Parr 1341) bajo condiciones controladas. Se observaron las temperaturas antes y después de combustionar para el cálculo del PCS, el cual es reportado en base, así como es recibido. Cada una de las pruebas se repitió tres veces.

Para la obtención del Poder Calorífico Inferior (PCI), se utilizó (1) [18].

$$\text{PCI} = \text{PCS} - 2260 \left( \frac{9H}{100} + \frac{M}{100} \right) \quad (1)$$

Donde:

PCI = Poder Calorífico Inferior (kJ/kg);  
PCS = Poder Calorífico Superior (kJ/kg);  
H = Contenido de Hidrógeno (%);  
M = Contenido de Humedad (%).

### E. Determinación del pH

Se tomo 2 g de biomasa con un tamaño de partícula menor a 250  $\mu\text{m}$ . Colocándola en un matraz con 20  $\text{cm}^3$  de agua destilada, agitando la solución durante 1 h y dejando reposar 30 minutos. Finalmente se filtró y midió el pH de la suspensión remanente, empleando un potenciómetro Hanna Instruments HI 255 [19]. Cada una de las pruebas se repitió tres veces reportando los resultados en base, así como se recibió.

### F. Análisis Químico

Se determino el contenido de celulosa, lignina y holocelulosa en cada muestra de biomasa, se inició con la separación de extraíbles, y luego se procedió con el contenido de lignina, celulosa, holocelulosa y hemicelulosa por diferencia.

1) *Separación de extraíbles*: Se realizó la prueba indicada en la norma ASTM D1105 [20], para la remoción de extraíbles de la biomasa. Se tomó 10 g de muestra de biomasa con un tamaño de partícula entre 250 a 420  $\mu\text{m}$  y con un contenido de humedad menor al 10%, se colocan las muestras en un desecador por un periodo de 6 horas como mínimo antes del ensayo. Se procedió a la extracción haciendo uso de un equipo Soxhlet con una solución de 200 mL de tolueno/etanol (2:1 v/v) por 5 horas, luego con 200 mL de etanol por 4 horas y finalmente con agua destilada caliente por 2 horas. Al culminar con la extracción el producto obtenido es secado, pesado y almacenado adecuadamente para las pruebas posteriores, este es rotulado como “libre de extraíbles”.

2) *Contenido de lignina*: Para esta prueba se utilizó el Método de Klason [21], para hallar el contenido de lignina insoluble. Una muestra de 0.5 g de biomasa “libre de extraíbles” se sometió a hidrólisis ácida con una solución de 1  $\text{cm}^3$  de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) al 72% (m/m), agitándose hasta disolver la muestra, para luego adicionar 28  $\text{cm}^3$  de agua destilada hasta diluir al 3% (m/m) y luego se calentó a 80 °C. Finalmente se filtra con la solución aun caliente, para luego lavar el residuo retenido en el filtro con agua destilada caliente hasta retirar todo el ácido. Al culminar con el lavado, se removió lo filtrado y se pesó para reportar el contenido de lignina según (2).

$$\% \text{ Lignina} = \frac{W_F}{W_M} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

$W_F$  = Peso inicial de la muestra libre de extraíbles (g);  
 $W_M$  = Peso final de la muestra después del tratamiento (g).

3) *Contenido de celulosa*: Para esta prueba se utilizó el Método de Kurschner-Hoffer [22], se tomó 1 g de biomasa “libre de extraíbles” se trató con 50  $\text{cm}^3$  de una solución

extractora de etanol: ácido nítrico (4:1 v/v) utilizando el equipo de extracción durante 1 hora. Posteriormente se filtró y se repite el proceso dos veces más, para luego de la última extracción realizar el lavado del filtrado con etanol y agua destilada hasta obtener un pH neutro, para finalmente secar y pesar. El contenido de celulosa se determina según (3).

$$\% \text{ Celulosa} = \frac{W_F}{W_M} \times 100 \quad (3)$$

Donde:

$W_F$  = Peso inicial de la muestra libre de extraíbles (g);

$W_M$  = Peso final de la muestra después del tratamiento (g).

4) *Contenido de holocelulosa*: Para esta prueba se utilizó el Método de Jayme-Wise [23]. Se tomó, 0.5 g de biomasa “libre de extraíbles”, luego se disolvió en 400 cm<sup>3</sup> de agua destilada y se calentó hasta los 70 °C, posteriormente se añaden 3 cm<sup>3</sup> de ácido acético y 4 g clorito de sodio (NaClO<sub>2</sub>) agitando lentamente. Este procedimiento se repitió 5 veces más, manteniendo la temperatura a 70 °C, en la última repetición se dejó reaccionar por 12 horas. La muestra obtenida se filtra y lava con agua destilada, para finalmente secar y pesar. El contenido de holocelulosa se determina según (4).

$$\% \text{ Holocelulosa} = \frac{W_F}{W_M} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

$W_F$  = Peso inicial de la muestra libre de extraíbles (g);

$W_M$  = Peso final de la muestra después del tratamiento (g).

5) *Contenido de hemicelulosa*: Se obtuvo por diferencia de contenido de holocelulosa y celulosa según (5).

$$\% \text{ Hemicelulosa} = \% \text{ Holocelulosa} - \% \text{ Celulosa} \quad (5)$$

Cada una de estas pruebas fueron realizadas dos veces y los resultados reportados son en base libre de extraíbles.

#### G. Análisis Termogravimétrico

Esta prueba se realizó utilizando un analizador termogravimétrico TGA 4000 de Perkin Elmer, el programa de calentamiento fue de temperatura ambiente hasta los 900 °C, utilizando una velocidad de calentamiento de 10 °C/min, en atmósfera inerte de nitrógeno (20 cm<sup>3</sup>/min). Las muestras con tamaño de partícula entre 250 y 420 μm fueron previamente acondicionadas a una humedad menor al 10% y colocadas en un desecador por 24 horas antes de cada prueba. Finalmente, los datos fueron procesados en el software Pyris v. 13.

#### H. Espectroscopia de IR (FTIR)

Para esta prueba se utilizó un espectrofotómetro FTIR IR-Affinity de Shimadzu con un ATR MIRacle de Pike Technologies. Los espectros se realizaron en un rango de número de onda de 500 a 4000 cm<sup>-1</sup> con resolución de 4 cm<sup>-1</sup> y 70 escaneos. Este análisis se realizó para la identificación de los

grupos funcionales más importantes presentes en las muestras de biomasa.

### III. RESULTADOS

#### A. Análisis Elemental, Próximo y Poder Calorífico

En la Tabla I, se muestran los resultados del análisis elemental, próximo y poder calorífico y en la Tabla II se muestran los valores obtenidos en otras investigaciones. En el caso de la pulpa de café los elementos carbono, nitrógeno, azufre y oxígeno se encuentran dentro del rango indicado en las referencias [25], [26], solo en el caso del hidrógeno se obtuvo un valor más alto. Para la cascarilla de café los elementos carbono e hidrógeno se hallan dentro del rango reportados en diversos estudios [27], [28], sin embargo, se hallaron valores inferiores para nitrógeno y oxígeno, y mayores para azufre.

TABLA I  
ANÁLISIS ELEMENTAL, PRÓXIMO Y PODER CALORÍFICO

Parámetro	Biomasa	
	Pulpa de café	Cascarilla de café
Análisis Elemental (%) <sup>a</sup>		
C	41.27	45.48
H	5.80	6.00
N	2.02	0.36
S	0.27	0.31
O	49.84	41.82
Relaciones Atómicas		
H/C	1.67	1.57
O/C	0.91	0.69
Análisis Próximo (%)		
Humedad	5.20	6.82
Ceniza	8.53	4.33
Materia Volátil	53.19	71.14
Carbono Fijo <sup>b</sup>	33.08	17.71
Índice de Reactividad		
MV/CF <sup>c</sup>	1.61	4.02
Poder Calorífico (MJ/kg)		
PCS <sup>d</sup>	14.79	17.56
PCI <sup>e</sup>	13.49	16.18

<sup>a</sup> Resultados en base seca.

<sup>b</sup> El carbono fijo se obtuvo por diferencia.

<sup>c</sup> MV = Materia Volátil, CF = Carbono Fijo.

<sup>d</sup> PCS, Poder Calorífico Superior.

<sup>e</sup> PCI, Poder Calorífico Inferior, por calculo según Ecuación 1.

Se obtuvieron valores de relaciones de H/C y O/C altos, lo cual indica la existencia de compuestos aromáticos. Estudios sobre la biomasa hacen referencia que tiende a ser más carbonosa al ser tratada térmicamente, por ello se pierden componentes aromáticos y oxígeno [35]. Las relaciones de H/C y O/C disminuyen al aumentar la temperatura, generando un material con mayor resistencia a la degradación. Por otra parte, ambas biomasa registran valores bajos de azufre y nitrógeno, los cuales son precursores de óxidos de azufre y nitrógeno (NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>) luego del proceso de combustión, los valores reportados de poder calorífico son consistentes con las relaciones H/C y

O/C las cuales indican que a menores valores aumenta el poder calorífico de las biomásas. Los valores reportados para la composición elemental se encuentran acorde con los reportados en estudios anteriores.

TABLA II  
ANÁLISIS ELEMENTAL – VALORES REFERENCIALES

Parámetro	Biomasa	
	Pulpa de café	Cascarilla de café
C	38.70 <sup>a</sup> 43.33 <sup>b</sup>	43.79 <sup>c</sup> 50.69 <sup>d</sup>
H	5.40 <sup>a</sup> 5.69 <sup>b</sup>	5.64 <sup>c</sup> 6.23 <sup>d</sup>
N	1.60 <sup>a</sup> 2.50 <sup>b</sup>	2.74 <sup>c</sup> 0.82 <sup>d</sup>
S	NR <sup>a</sup> 0.35 <sup>b</sup>	0.14 <sup>c</sup> 0.20 <sup>d</sup>
O	54.3 <sup>a</sup> 48.13 <sup>b</sup>	47.69 <sup>c</sup> 42.05 <sup>d</sup>

<sup>a</sup> [25], <sup>b</sup> [26], <sup>c</sup> [27], <sup>d</sup> [28].  
NR: No reportado en la referencia.

En cuanto al análisis próximo los resultados reportados en otras investigaciones (Tabla III) indican que para la cascarilla de café todos los datos obtenidos se encuentran dentro de los valores referenciales. Para la pulpa de café el contenido de humedad, cenizas y materia volátil están dentro del rango reportado por las referencias; sin embargo, se encontraron mayores valores de carbono fijo.

TABLA III  
ANÁLISIS PRÓXIMO Y PODER CALORÍFICO – VALORES

Parámetro	Biomasa	
	Pulpa de café	Cascarilla de café
Análisis Próximo (%)		
Humedad	2.74 <sup>a</sup> 7.3 <sup>b</sup>	5.50 <sup>c</sup> 7.92 <sup>d</sup>
Ceniza	6.55 <sup>a</sup> 13.3 <sup>b</sup>	5.00 <sup>c</sup> 3.54 <sup>d</sup>
Materia Volátil	69.48 <sup>a</sup> 49.8 <sup>b</sup>	63.3 <sup>c</sup> 71.63 <sup>d</sup>
Carbono Fijo	21.23 <sup>a</sup> 29.6 <sup>b</sup>	26.2 <sup>c</sup> 16.9 <sup>d</sup>
Poder Calorífico (MJ/kg)		
PCS	NR <sup>a</sup> 17.88 <sup>b</sup>	NR <sup>c</sup> 18.98 <sup>d</sup> 17.48 <sup>e</sup>
Índice de Reactividad		
MV/CF <sup>f</sup>	3.27 <sup>a</sup> 1.68 <sup>b</sup>	2.41 <sup>c</sup> 4.60 <sup>d</sup>

<sup>a</sup> [29], <sup>b,c</sup> [12], <sup>d</sup> [30], <sup>e</sup> [31].  
<sup>f</sup> Calculado a partir de los datos de las referencias.  
NR: No reportado en la referencia.

El contenido de humedad indica la calidad de la biomasa y se ve influenciado por diversos factores como el tipo de residuo, el clima, almacenamiento, estación de cosecha, etc. Existen dos tipos de humedad: la humedad intrínseca la cual no se ve afectada por factores climáticos y la humedad extrínseca, la cual depende del clima de la zona donde se encuentre la biomasa. Para ser procesados térmicamente (combustión, pirólisis, gasificación) la humedad debe ser menor al 10 % [34], tal y como los resultados indican para ambas biomásas.

El contenido de materia volátil muestra los componentes de la biomasa que se retiran al ser calentada a temperaturas altas, tales como gases combustibles (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, CO o H<sub>2</sub>) o incombustibles (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>) [36]. Valores altos en contenido de materia volátil muestran mejor predisposición de

las biomásas para una conversión termoquímica por pirólisis; lo cual se cumple según los resultados mostrados

La ceniza es el componente inorgánico de la biomasa que resulta después de la combustión [35], y se ve influenciada por factores como la composición, contenido de nutrientes y origen de la biomasa; la ceniza es una característica importante ya que durante la conversión de biomasa en biocarbón, contribuye al aumento de fertilidad del suelo.

El contenido de carbono fijo es la masa remanente luego de la descomposición de la materia volátil de la biomasa, sin contar el contenido de ceniza y humedad [35], es la porción más resistente que permanece en el biocarbón después de la pirólisis, se relaciona con las cadenas aromáticas e inversamente con el contenido de materia volátil y cenizas [36]. El carbono fijo refleja la estabilidad térmica y permanencia del biocarbón en el suelo, para esta aplicación.

La pulpa de café mostró un mayor contenido de ceniza y carbono fijo, esto puede deberse a un alto nivel de minerales y nutrientes, lo cual lo harían un mejor precursor de biocarbón para su aplicación en la remediación del suelo agrícola, a diferencia de la cascarilla de café que debido a su menor contenido de cenizas es adecuado para procesos como la pirólisis o gasificación para la producción de biocombustibles.

El índice de reactividad indica que la cascarilla de café es mucho más reactiva que la pulpa de café, lo cual se confirma también con la tendencia de los PCS y se relaciona inversamente con el contenido de ceniza. Los resultados de PCS se encuentran dentro de los valores reportados en investigaciones anteriores [12], [30], [31].

#### B. Análisis Químico y Determinación del pH

Los resultados del análisis químico (Tabla IV) al ser evaluados frente a los valores referenciales (Tabla V) indican que en el caso de la pulpa de café los valores de lignina y hemicelulosa son concordantes mientras que para la celulosa existe una diferencia absoluta de 0.3 % respecto al valor referencial. En el caso de la cascarilla de café los resultados indican diferencias absolutas de 1.42 % (lignina), 1.71 % (celulosa) y 0.54 % (hemicelulosa) con respecto a los valores referenciales. Estas diferencias pueden ser generadas por otros factores tales como el método aplicado para cada análisis, el tipo de biomasa evaluada, constitución del suelo de cosecha, clima u estación de cosecha, método de siembra, entre otros.

TABLA IV  
ANÁLISIS QUÍMICO Y PH

Parámetro	Biomasa	
	Pulpa de café	Cascarilla de café
Análisis Químico (%)		
Holocelulosa	37.68	49.47
Lignina	21.04	29.72
Celulosa	20.33	26.21
Hemicelulosa <sup>a</sup>	17.35	23.26
Determinación del pH		
pH	4.35	5.92

<sup>a</sup> Hemicelulosa obtenida por diferencia de la Holocelulosa y Celulosa.

TABLA V  
ANÁLISIS QUÍMICO Y pH – VALORES REFERENCIALES

Parámetro	Biomasa	
	Pulpa de café	Cascarilla de café
Análisis Químico (%)		
Lignina	15.50 <sup>a</sup> 22.00 <sup>b</sup>	23.7 <sup>d</sup> 28.3 <sup>e</sup>
Celulosa	20.60 <sup>a</sup> 23.10 <sup>b</sup>	24.5 <sup>d</sup> 23.1 <sup>e</sup>
Hemicelulosa <sup>c</sup>	17.20 <sup>a</sup> 20.00 <sup>b</sup>	29.7 <sup>d</sup> 23.8 <sup>e</sup>
Determinación del pH		
pH	4.21 <sup>e</sup>	6.40 <sup>f</sup>

<sup>a</sup> [37], <sup>b</sup> [38], <sup>c</sup> [39], <sup>d</sup> [40], <sup>e</sup> [41], <sup>f</sup> [42]

El contenido de holocelulosa está constituido por hemicelulosa y celulosa. Según [33] la celulosa produce alrededor del 24 % de carbón vegetal (a partir de madera) mientras que la hemicelulosa produce 12 % de carbón y materia volátil. Por lo que, para el rendimiento del carbón, la lignina es el componente principal. Debido a su alto nivel de estabilidad térmica, es responsable de hasta el 55 % de la producción de carbón vegetal.

Generalmente, la biomasa que presenta mayores concentraciones de lignina en su composición se transforma en biocarbón con alto contenido de cenizas, nutrientes, conductividad eléctrica y estabilidad térmica; por ende, mayor potencial para su uso como acondicionador del suelo.

La lignina se descompone entre 500 °C a 900 °C mientras que la hemicelulosa se degrada entre 220 °C a 315 °C y la celulosa entre 315 °C a 400 °C según [34], lo que nos indica que a mayor cantidad de lignina estas biomásas requerirán condiciones más severas en el reactor. Finalmente, los valores pH encontrados son similares a los referenciales, mostrando un carácter ácido para la pulpa de café y ligeramente ácido para la cascarilla de café.

### C. Análisis Termogravimétrico

El comportamiento térmico de las biomásas se encuentra profundamente ligado a su composición química (contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina). En la Fig. 3 se identifican tres regiones [43]: La primera inicia desde la temperatura ambiente hasta 110 °C la cual corresponde a la etapa de deshidratación y pérdida parcial de materia volátil, la segunda entre los 110 °C hasta 400 °C que corresponde a la degradación de hemicelulosa (220 °C – 315 °C) y pequeñas cantidades de celulosa (315 °C a 400 °C) y el desprendimiento de materia volátil, generándose la mayor descomposición de la biomasa y finalmente una última etapa desde los 400 °C a 650 °C en la que se produce la degradación de la celulosa y lignina (350 °C – 500 °C) restante y la oxidación del biocarbón.

En la Fig. 3 se aprecia que a 110 °C (fin de la primera etapa de deshidratación) la pulpa de café mantiene un 94.81% de su masa inicial y la cascarilla de café un 93.18%. Luego de superar una temperatura de 400 °C la pulpa de café mantiene el 47.25% de su masa inicial, mientras que la cascarilla de café el 40.16% la biomasa más estable es la pulpa de café; en ese punto ya se ha descompuesto la hemicelulosa y la celulosa y algo de la lignina. Finalmente, en la tercera etapa a una temperatura de

650 °C la pulpa de café mantiene el 31.16% de su masa inicial y la cascarilla de café el 22.12%.

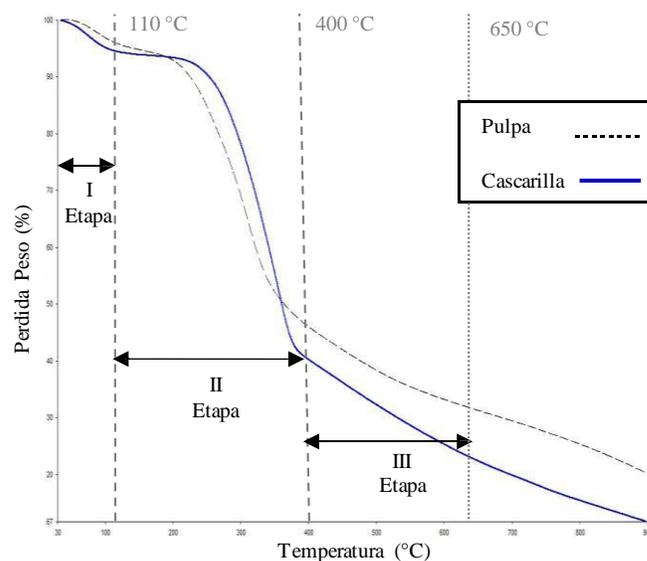


Fig. 3 Termogramas de subproductos de café *Coffea Arabica L.* (velocidad de calentamiento 10 °C/min, flujo de N<sub>2</sub> de 20 cm<sup>3</sup>/min)

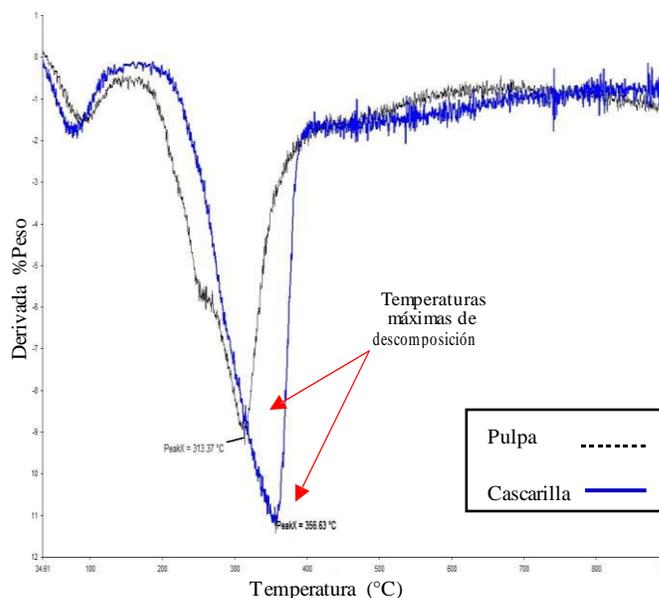


Fig. 4 Análisis Termogravimétrico Diferencial de subproductos de café *Coffea Arabica L.* (pulpa y cascarilla).

En la Fig. 4 se muestra la curva DTG que permite ubicar las temperaturas máximas de descomposición para cada biomasa. En el caso de la pulpa de café a 313.37 °C se ha descompuesto hasta el 42.82% y para la cascarilla de café a 356.63 °C se ha descompuesto hasta el 47.19%. La biomasa con mayor tasa de descomposición es la cascarilla de café, resultado acorde con la relación MV/CF mostrada en la Tabla I.

### A. Espectroscopia de IR (FTIR)

Los espectros espectroscopia mediante espectroscopía infrarroja con transformadas de Fourier muestran la información sobre los compuestos químicos presentes en la estructura de ambas biomásas. En la Fig. 5 se aprecian las bandas entre 1250 a 1500  $\text{cm}^{-1}$  para ambas biomásas relacionadas con la lignina aromática y sus diversas vibraciones del anillo del tipo guayacilo (1431 a 1512  $\text{cm}^{-1}$ ), tipo guayacilo-siringilo (1320 a 1330  $\text{cm}^{-1}$ ) y tipo guayanclicos (1250 a 1270  $\text{cm}^{-1}$ ) acorde con los resultados del análisis químico [44], además se aprecia una banda entre los 900  $\text{cm}^{-1}$  que responde a la celulosa, hemicelulosa y lignina. ya que por lo general esta se encuentra por debajo de los 1000 a 1050  $\text{cm}^{-1}$ . También se aprecian las bandas de los grupos hidroxilos (3400  $\text{cm}^{-1}$ ), los estiramientos vibratorios simétricos y asimétricos de los grupos  $-\text{CH}_2$  y  $-\text{CH}_3$  (2918 a 2929  $\text{cm}^{-1}$ ) y los estiramientos axiales de los grupos carboxílicos y fenólicos presentes en la lignina (1730 a 1740  $\text{cm}^{-1}$ ) [45].

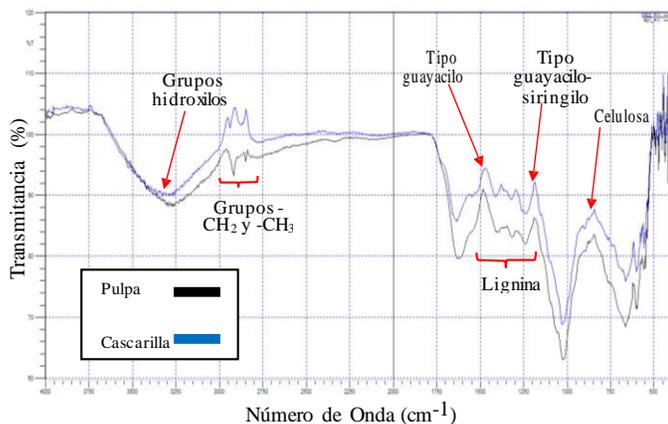


Fig. 5 Espectros FTIR de subproductos de café *Coffea Arabica L.* (pulpa y pergamino).

## IV. CONCLUSIONES

Se caracterizaron dos biomásas residuales (pulpa y cascarilla de café) obtenidas de la cosecha de café *Coffea Arabica L.* provenientes de Pasco-Perú. Los resultados obtenidos para análisis elemental, próximo, químico, poder calorífico, espectroscopia IR y análisis termogravimétrico son acordes a estudios previos e indican que la pulpa y cascarilla de café son potenciales precursores para la producción de biocarbón y biocombustibles al tener en su estructura compuestos químicos carboxílicos y fenólicos.

La pulpa de café al tener un mayor contenido de carbono fijo y cenizas relacionado directamente con los nutrientes y por su alto contenido de lignina que aportan mayor estabilidad térmica puede ser adecuado para las producción de biocarbón, a diferencia de la cascarilla de café que muestra un mayor PCS e índice de reactividad y menor contenido de cenizas siendo adecuado para la producción de biocombustibles.

Respecto al poder calorífico de las biomásas evaluadas ambas pueden ser tratadas por un proceso termoquímico para lograr mayor densidad energética. Es importante, observar que la lignina como componente de estabilidad térmica en la producción de carbón responde con un 55%. En consecuencia, de esto la celulosa produce un 24% de carbón y la hemicelulosa un 12%.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica y al Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería por financiar este proyecto. Asimismo, agradecemos al Grupo de Procesos Termoquímicos y Energéticos por el apoyo en el desarrollo de la investigación.

## REFERENCIAS

- [1] J. Fernandez, "Biomasa", Energías Renovables.
- [2] S.-H. Kong, S.-K. Loh, R. T. Bachmann, S. A. Rahim y J. Salimon, "Biochar from oil palm biomass: A review of its potential and challenges", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 39, pp. 729–739, noviembre de 2014.
- [3] M. K. D. Rambo, F. L. Schmidt y M. M. C. Ferreira, "Analysis of the lignocellulosic components of biomass residues for biorefinery opportunities", *Talanta*, vol. 144, pp. 696–703, noviembre de 2015.
- [4] J. Lehmann y S. Joseph, Eds., *Biochar for Environmental Management*. Routledge, 2015.
- [5] A. Escalante Rebolledo et al., "Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo", *Terra Latinoamericana*, vol. 3, n.º 34, pp. 367–382, 2016.
- [6] D. Dadi Olani, "Valorization of coffee byproducts via biomass conversion technologies", Tesis doctoral, Arenberg Doctoral School, Leuven, Bélgica, 2018.
- [7] Y. C. Sharma, Uma y F. Gode, "Engineering Data for Optimization of Preparation of Activated Carbon from an Economically Viable Material", *Journal of Chemical & Engineering Data*, vol. 55, n.º 9, pp. 3991–3994, septiembre de 2010.
- [8] I. Lewandowski, "Biomass production from lignocellulosic energy crops", en *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*. Elsevier, 2017, pp. 159–163.
- [9] J. Santamaría Aranda, E. Rodas Tello, M. Casimiro Casimiro, J. Paredes Durand, G. Moreno Ramirez y A. Siguaz Meza, "El Agro en Cifras Mayo 2021", *El Agro en Cifras*, 2021.
- [10] R. Carreno, *Lectura del café: Guía práctica*. Selector, 2002.
- [11] G. Corro, L. Paniagua, U. Pal, F. Bañuelos y M. Rosas, "Generation of biogas from coffee-pulp and cow-dung co-digestion: Infrared studies of postcombustion emissions", *Energy Conversion and Management*, vol. 74, pp. 471–481, octubre de 2013.
- [12] M. C. Echeverría y M. Nuti, "Valorisation of the Residues of Coffee Agro-industry: Perspectives and Limitations", *The Open Waste Management Journal*, vol. 10, n.º 1, pp. 13–22, enero de 2017.
- [13] "International Coffee Organization - Procesamiento de campo". International Coffee Organization - What's New. [https://www.ico.org/ES/field\\_processing.asp](https://www.ico.org/ES/field_processing.asp) (accedido el 15 de diciembre de 2021).
- [14] M. D. Ulsido y M. Li, "Solid waste management practices in wet coffee processing industries of Gidabo watershed, Ethiopia", *Waste Management & Research*, vol. 34, n.º 7, pp. 638–645, abril de 2016.
- [15] J. M. Suarez Agudelo, "Aprovechamiento de los residuos sólidos provenientes del beneficio del café, en el municipio de betania antioquia: usos y aplicaciones", Trabajo de grado, Corporación universitaria lasallista, Caldas, Antioquia, 2012.
- [16] P. S. Murthy y M. Madhava Naidu, "Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 66, pp. 45–58, septiembre de 2012.

- [17] Á. Viviana, R. Salcedo, A. Felipe, R. González, J. Manuel, and B. Burgos, "Caracterización termogravimétrica de carbonizados de residuos provenientes de la uva Isabella (*Vitis labrusca*) Thermogravimetric characterization of chars of waste from Isabella grape (*Vitis labrusca*)," vol. 3461
- [18] B. Prabis, *Biomass Gasification and Pyrolysis - A practical guide*. 2010.
- [19] E. Romero Uscanga, G. Montero Alpírez, L. Toscano Palomar, L. Pérez Pelayo, R. Torres Ramos, and M. T. Beleno Cabarcas, "Determinación de los principales componentes de la biomasa lignocelulósica; celulosa, hemicelulosa y lignina de la paja de trigo para su posterior pretratamiento biológico," XVII Congr. Int. en Ciencias Agrícolas, no. October 2015, 2014.
- [20] ASTM, "Standard Test Method for Preparation of Extractive-Free Wood 1," Astm, vol. 96, no. Reapproved, pp. 1–2, 2013.
- [21] E. Sjöholm, F. Aldaeus, Y. Nordström, and A. Reimann, "COST Action FP0901 Round Robins of lignin samples," no. January 2013, 2011.
- [22] J. D. Reid and D. F. J. Lynch, "Cellulose Analysis. A Comparison of Three Principal Methods," *Ind. Eng. Chem.*, vol. 9, no. 12, pp. 570–573, 1937
- [23] C. Macfarlane, C. R. Warren, D. A. White, and M. A. Adams, "A rapid and simple method for processing wood to crude cellulose for analysis of stable carbon isotopes in tree rings," *Tree Physiol.*, vol. 19, no. 12, pp. 831–835, 1999.
- [24] M. Prado, J. Hernández, B. Becerra, H. Palacios, J. de J. Vargas, and M. Rentería, "Caracterización de hojas de mazorca de maíz y de bagazo de caña para la elaboración de una pulpa celulósica mixta," *Madera y bosques*, vol. 18, no. 3, pp. 37–51, 1995.
- [25] S. Silva Brum, "Caracterización y modificación química de residuos sólidos del proceso de producción de café para la obtención de nuevos materiales", Trabajo de postgrado, Universidad Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brasil, 2006.
- [26] D. V. Phuong, L. P. Tan Quoc, P. Van Tan y L. N. Doan Duy, "Production of bioethanol from Robusta coffee pulp (*Coffea robusta* L.) in Vietnam", *Foods and Raw Materials*, pp. 10–17, octubre de 2019.
- [27] T. R. L. A. Veiga, J. T. Lima, A. L. d. A. Dessimoni, M. F. F. Pego, J. R. Soares y P. F. Trugilho, "DIFFERENT PLANT BIOMASS CHARACTERIZATIONS FOR BIOCHAR PRODUCTION", *CERNE*, vol. 23, n.º 4, pp. 529–536, diciembre de 2017.
- [28] C. L. Mendoza Martinez et al., "Characterization of residual biomasses from the coffee production chain and assessment the potential for energy purposes", *Biomass and Bioenergy*, vol. 120, pp. 68–76, enero de 2019.
- [29] M. M. Parascanu, F. Sandoval-Salas, G. Soreanu, J. L. Valverde y L. Sanchez-Silva, "Valorization of Mexican biomasses through pyrolysis, combustion and gasification processes", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 71, pp. 509–522, mayo de 2017.
- [30] S. Amertet, Y. Mitiku y G. Belete, "Analysis of a Coffee Husk Fired Cogeneration Plant in South Western Ethiopia Coffee Processing Industries", *Scientific Research Publishing*, marzo de 2021.
- [31] R. Manrique, D. Vásquez, C. Ceballos, F. Chejne y A. Amell, "Evaluation of the Energy Density for Burning Disaggregated and Pelletized Coffee Husks", *ACS Omega*, vol. 4, n.º 2, pp. 2957–2963, febrero de 2019.
- [32] Menezes E.G., do Carmo J.R., Alves J.G.L., et al. Optimization of alkaline pretreatment of coffee pulp for production of bioethanol. *Biotechnology Progress*, 2014, vol. 30, no. 2, pp. 451–462. <https://doi.org/10.1002/btpr.1856>
- [33] A. K. Varma and P. Mondal, "Physicochemical Characterization and Pyrolysis Kinetic Study of Sugarcane Bagasse Using Thermogravimetric Analysis," *J. Energy Resour. Technol.*, vol. 138, no. 5, p. 052205, 2016.
- [34] Raveendran, K.; Ganesh, A.; Khilar, K. C. Pyrolysis characteristics of biomass and biomass components. *Fuel*, London, v. 75, n. 8, p. 987–998, Jan. 1996.
- [35] R. García, C. Pizarro, A. G. Lavín, and J. L. Bueno, "Biomass proximate analysis using thermogravimetry," *Bioresour. Technol.*, vol. 139, no. March, pp. 1–4, 2013.
- [36] M. F. F. Pego, T. R. L. A. Veiga, J. T. Lima, P. F. Trugilho, A. L. de A. Dessimoni, and J. R. Soares, "Different Plant Biomass Characterizations for Biochar Production," *Cerne*, vol. 23, no. 4, pp. 529–536, 2018.
- [37] I. Mendoza Olmos, "Estudio de la cascarilla del café como material mejorador de sustratos hortícolas", Trabajo de grado, Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro", Buenavista, Santillo, Mexico, 2003.
- [38] Bekalo, S.A., Reinhardt, H.-W., 2009. Fibers of coffee husk and hulls for the production of particleboard. *Mater. Struct.* 43, 1049–1060. doi:10.1617/s11527-009-9565-0
- [39] Ferraz, F.D.O., Silva, S.S.D., 2009. Characterization of coffee husk biomass for biotechnological purposes. *New Biotechnol.*, Abstracts of the 14th European Congress on Biotechnology Barcelona, Spain 13–16 September, 2009 25, Supplement, S256. doi:10.1016/j.nbt.2009.06.573
- [40] N. Fierro Cabrales, A. Contreras Oliva, O. Gonzales Rios, E. S. Rosas Mendoza y V. Morales Ramos, "Caracterización química y nutricional de la pulpa de café (*Coffea Arabica* L.)", *Agro Production*, junio de 2018.
- [41] Zheng, H.; Wang, Z.; Deng, X.; Zhao, J.; Luo, Y.; Novak, J. Herbert, S. Xing, B. Characteristics and nutrient values of biochars produced from giant reed at different temperatures. *Bioresource Technology*, Essex, v. 130, p. 463–471, 2013.
- [42] Angin, D. Effect of pyrolysis temperature and heating rate on biochar obtained from pyrolysis of safflower seed press cake. *Bioresource Technology*, Oxford, v. 128, p. 593–587, Jan. 2013.
- [43] Ouajai, S.; Shanks, R. A. Composition, structure and thermal degradation of hemp cellulose after chemical treatments. *Polymer Degradation and Stability*, Essex, v. 89, n. 2, p. 327–335, Aug. 2005.
- [44] Hergert, H. L. Lignins: occurrence, formation, structure and reactions. *New York: J. Wiley*, 1971. 297 p
- [45] Castro, G. R. Síntese, caracterização e aplicação de celulose funcionalizada com ligante p-Aminobenzoico em pré-concentração de íons metálicos. 2003. 57 p. Dissertação (Mestrado em Química Analítica)-Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.