



PROMPT

"Imagina una ilustración hiperrealista donde se muestre como una impresora 3D realiza un MUG usando como filamento bagazo de cafe; de fondo, una oficina convencional. Colores: cafe, marron, beige, blanco y verde". Generado con COPILOT Tecnología Dall-e-3



Este trabajo está bajo la licencia Atribución-No-Comercial 4.0 Internacional

ARTÍCULOS

Desarrollo de material compuesto sostenible empleando ácido poliláctico reforzado con borra de café para manufactura aditiva

Development of Sustainable Composite Material Using Polylactic Acid Reinforced with Spent Coffee Grounds for Additive Manufacturing

Ivonne Andrea Lozano

Centro de Materiales y Ensayos, Servicio Nacional de Aprendizaje -SENA- Distrito Capital, Bogotá D.C., Colombia. Aprendiz, Técnico en Alistamiento de Laboratorios de Análisis y Ensayos para la Industria.

✉ ivonnea_lozano@soy.sena.edu.co

Nury Lysseth Carreno

Centro de Materiales y Ensayos, Servicio Nacional de Aprendizaje -SENA- Distrito Capital, Bogotá D.C., Colombia. Msc. en Ciencias- Bioquímica.

✉ nlcarreno@sena.edu.co

Freddy Alexander Arévalo

Centro de Materiales y Ensayos, Servicio Nacional de Aprendizaje -SENA- Distrito Capital, Bogotá D.C., Colombia. Técnico en Modelado 3D para la Industria

✉ faarevalo@sena.edu.co

Hivo Alfonso Patarroyo

Centro de Materiales y Ensayos, Servicio Nacional de Aprendizaje -SENA- Distrito Capital, Bogotá D.C., Colombia. Ingeniero Metalúrgico

✉ hpatarroyo@sena.edu.co

María Isabel Arévalo

Centro de Materiales y Ensayos, Servicio Nacional de Aprendizaje -SENA- Distrito Capital, Bogotá D.C., Colombia. Ingeniera Química.

✉ miarevalo@sena.edu.co

Financiación

Este artículo es producto del proyecto de investigación *Fabricación de medios para eliminación de contaminantes en aguas empleando materiales de origen natural y tecnologías emergentes SGPS-12195-2024*, SENNOVA CME.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este artículo.

Cómo citar este artículo?

Lozano, I. A. et al. (2024). Desarrollo de material compuesto sostenible empleando Ácido poliláctico reforzado con Borra de Café para manufactura aditiva. *Innmoda Lab*, (8), 23-35. <https://revistas.sena.edu.co/index.php/innlab/article/view/6993>

RESUMEN

En la actualidad se presentan grandes problemas medioambientales que son causados por diversos factores, pero principalmente por la mala disposición y no aprovechamiento de los residuos generados en los procesos industriales. Por lo anterior se han adelantado estrategias que buscan materiales de origen natural y aprovechen este tipo de residuos. La borra de café (BC), es un residuo orgánico el cual es desechado comúnmente en los hogares e industrias, sin evaluarse el daño medioambiental que causa el proceso de descomposición de este residuo, del cual se destaca la emisión de metano, un gas efecto invernadero. Este estudio tiene como propósito obtener un material empleado la borra de café (BC) generada en la empresa CYGNI Ingeniería S.A.S.; para lo cual se determinó el contenido de humedad $2,96 \pm 0,12$ %, cenizas $1,50 \pm 0,02$ %, materia volátil $5,30 \pm 0,98$ y carbono fijo $90,00 \pm 0,01$; además, se realizó análisis de granulometría obteniendo un tamaño de partícula entre $710 \mu\text{m}$ – $500 \mu\text{m}$; posteriormente se prepararon dos materiales en diferentes porcentajes (5% y 15%) de BC, se obtuvieron pellets los cuales tuvieron valores de humedad en porcentaje de $2,35 \pm 0,05$ (5%); $4,19 \pm 0,06$ (15%) y cenizas en porcentaje de $0,05 \pm 0,04$ (5%), $0,21 \pm 0,04$ (15%). Finalmente se realizaron ensayos de impresión usando los pellets. Los resultados obtenidos en este trabajo contribuyen a identificar las características de residuos como la Borra de Café, con la finalidad de usarlos en la producción de materiales sostenibles.

Palabras clave: Café, ácido poliláctico, caracterización, polímeros, residuos, impresión 3D.

ABSTRACT

At present, there are major environmental problems that are caused by various factors, but mainly due to poor disposal and non-use of waste generated in industrial processes. For this reason, strategies have been advanced that seek materials of natural origin and take advantage of this type of waste. Coffee grounds (BC) are an organic waste that is commonly discarded in households and industries, without evaluating the environmental damage caused by the decomposition process of this waste, which overlays methane emissions a greenhouse gas. The purpose of this study is to obtain a material using the coffee grounds (BC) generated by the company CYGNI Ingeniería S.A.S.; for which the moisture content was 2.96 ± 0.12 %, ash 1.50 ± 0.02 %, volatile matter 5.30 ± 0.98 and fixed carbon 90.00 ± 0.01 % were determined. Furthermore, a particle size analysis was carried out, obtaining a particle size between $710 \mu\text{m}$ – $500 \mu\text{m}$; subsequently, two materials were prepared in different percentages of BC (5% and 15%), pellets were obtained which had moisture values of 2.35 ± 0.05 (5%); 4.5 ± 0.05 (5%); 4.19 ± 0.06 (15%) and ashes of 0.05 ± 0.04 (5%) and 0.21 ± 0.04 (15%). Finally, printing tests were carried out using the pellets. The results obtained in this work contribute to identify the characteristics of waste such as Coffee grounds, in order to use them in the production of sustainable materials.

Keywords: Coffee, polylactic acid, characterization, polymers, waste, 3D printing.

1. Introducción

El café es una de las bebidas más consumidas a nivel mundial, según datos de la Organización Internacional del Café (ICO); para el año (2022) se observó un aumento del 3% en comparación con el año 2021 (ICO, 2023), aspecto que se relaciona con la producción mundial de café, ya que para el período 2020 fue de 175 millones de sacos (60 Kilogramos), siendo el principal productor Brasil con 69 millones de sacos, seguido por Vietnam con 29,2 millones de sacos, Indonesia y Colombia se ubicaron en tercer y cuarto lugar con 12,0 y 10,7 millones de sacos, respectivamente (Ramírez & Riaño, 2022).

En la mayoría de las preparaciones de café se genera la borra de café (BC) como residuo. Murthy & Madhava (2012), reportaron, que por cada tonelada de producción de café se producen 650 Kg de BC. Este es un material compostable y se ha encontrado que puede utilizarse como fertilizante, elemento de limpieza en utensilios de cocina, atrapa olores, además puede contribuir al cuidado de la piel y cabello (Las casas, 2021). BC es considerado como un residuo que se deposita con los desechos no aprovechables, y actualmente se pueden encontrar alternativas por parte de las empresas generadoras de BC para utilizarla como abono, como es el caso de la cadena de cafeterías Starbucks (HAZ, 2020) quienes regalan la BC a los clientes que deseen llevarla; por otro lado, la cadena de Tostado Café y Pan, de Colombia y la Unidad Administrativa de Servicios Públicos -UAESP- desarrollaron una alianza que transforma la BC en abono (Silva, 2021); además, Juan Valdez (Colombia) aprovecha este material en el municipio de San Francisco (Cundinamarca, Colombia) donde la utilizan para hacer abono y cultivar hongos Orellana (Juan Valdez, 2023).

Según Ballesteros y colaboradores, la composición de la borra de café consiste principalmente en hemicelulosa (35 – 45 %), lignina (20 – 25%), celulosa (10 – 15%), proteína (15% – 20%), lípidos (2–5%), cenizas (1 – 3%) y sustancias activas (1 –2 %) (Ballesteros et al; 2014), en base a estos datos, se ha explorado el uso de éste material en campos como la biorrefinería (Karmee et al., 2018; Vardon et al., 2013), biocarbón (Nguyen et al., 2022) y biopolímeros (García- García et al., 2015; Saratale et al., 2020); en esta última área de estudio se busca contar con materias primas que tengan altos contenidos de polisacáridos con el fin de utilizarlo en la fabricación de materiales biodegradables, ya que se pueden obtener de fuentes renovables, abundantes y económicas.

Los polisacáridos más utilizados para este tipo de aplicaciones son la celulosa, el almidón, el quitosano entre otros. Por lo tanto, la BC puede considerarse una materia prima útil para diferentes campos, especialmente en la agroindustria; Un ejemplo de la aplicación su aplicación es la obtención de filamentos plásticos a partir de una fracción rica en polisacáridos realizada por Batista y colaboradores en el año 2020, quienes publicaron que las propiedades de las películas plásticas obtenidas a partir de BC, tuvieron propiedades comparables a otras películas obtenidas a partir de polisacáridos (Batista et al., 2020).

No obstante, las investigaciones que se centran en la implementación de la BC para la generación de nuevos materiales aún son limitadas, haciendo que no se aproveche todo su potencial en áreas como la ingeniería y la ciencia de los materiales. Por lo tanto, en esta investigación se buscó conocer la viabilidad de su implementación para la genera-

ción de un material compuesto que pueda ser empleado en los procesos de transformación de polímeros como lo es la impresión 3D, así como generar la caracterización de este residuo y los pellets generados a partir del mismo.

2. Metodología

2.1. Materiales

Las materias primas utilizadas en este trabajo fueron el ácido poliláctico (PLA) marca *Nature Works Ingeo*™ lote ID2928B132 presentación granulada para extrusión, con temperatura de fusión 210°C (410°F) y densidad 1,24 g/cm³. La borra de Café (BC) suministrada por empresa aliada CYGNI Ingeniería S.A.S., tenía aproximadamente 50% de humedad.

2.1. Equipos

Los equipos empleados en esta investigación son: **A)** Horno mufla marca Thermo Scientific **B)** Equipo de tamizaje Gilson con capacidad para 10 tamices, se utiliza-

ron las mallas de la 14 a la 230; **C)** Balanza analítica marca Vibra sensibilidad 0,1g; **D)** Línea de extrusión pelletizado de doble husillo referencia PLA-30-30; **E)** Equipo de manufactura aditiva Tumaker NX Pro-Pellets; **F)** Máquina universal de ensayos marca Besmak con celda de 5 toneladas; **G)** Durómetro para polímeros marca Check-Line con indentador para escala Shore D (Figura 1).

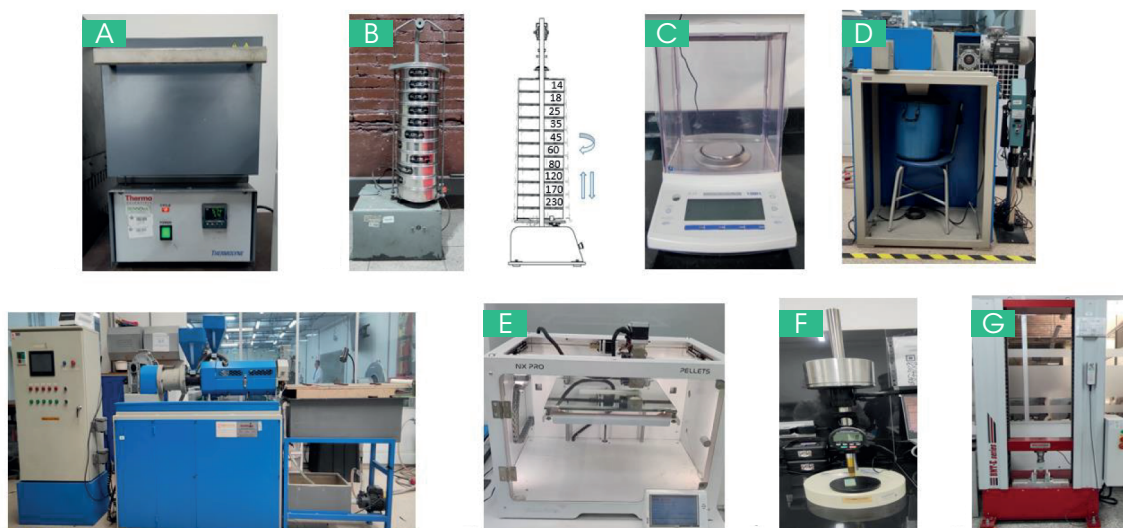
2.3. Caracterización de la BC

Para caracterizar la BC se determinó el contenido de humedad teniendo en cuenta lo descrito en la ASTM E871-19, cenizas de acuerdo con ASTM E1755-01, materia volátil de acuerdo con ASTM E872-82, carbono total, y se realizó análisis granulométrico de acuerdo con la norma ASTM E-11 para determinar el tamaño de partícula.

2.3.1. Humedad

Inicialmente se determinó la masa de cada uno de los crisoles limpios, vacíos y secos, posteriormente se pesó aproximadamente 1g

Figura 1. Equipos de utilizados para desarrollo de la metodología



Fuente: elaboración propia.

de muestra en cada crisol, ya que el ensayo se realizó por triplicado. Las muestras se secaron a 103°C durante 16 horas, y se determinó la masa final, para garantizar que las muestras se habían secado completamente, se llevaron al horno mufla durante 1 hora a 103°C y se pesaron nuevamente, este último paso se realizó 3 veces con el fin de garantizar que la diferencia entre los pesos determinados fuera menor al 2%.

2.3.2. Cenizas

Para determinar el contenido de cenizas se utilizaron las muestras secas obtenidas en la determinación de humedad numeral II-III-I, posteriormente se llevaron al horno mufla a 575 ± 25 °C durante 3 horas. Al finalizar este tiempo, se pesaron en frío, se llevaron nuevamente horno mufla a 575 ± 25 °C durante 1 hora, este último paso se repitió una vez y se verificó que la diferencia de los pesos obtenidos no fuera mayor de 0,3 mg.

El análisis estadístico de los datos de humedad y cenizas se realizó en base al promedio de las lecturas, por tanto, se incluyó la determinación de la media y la desviación estándar de los resultados obtenidos.

2.3.3. Materia Volátil

Una vez obtenidas las cenizas, se dispusieron en crisoles con tapa los cuales se pesaron previamente, se ajustó la temperatura del horno mufla a 950 °C y se dejaron los crisoles con la muestra durante 7 minutos, transcurrido este tiempo, se sacaron los crisoles y se dejaron enfriar a temperatura ambiente en el desecador. Finalmente se determinó la masa final y se calculó el porcentaje de material volátil.

2.3.4. Determinación de carbono fijo

La determinación de carbono se realizó teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los numerales II-III-I, II-III-II, II-III-III, I-III-IV y empleando la ecuación 1.

$$\% \text{ Carbono fijo} = 100 - \% \text{ Humedad} - \% \text{ Cenizas} - \% \text{ Materia Volátil} \text{ (Eq.1)}$$

2.3.5. Análisis granulométrico

Para el análisis de granulometría, se emplearon aproximadamente 800 g de borra de café, materia prima suministrada por la empresa CYGNI Ingeniería S.A.S., se utilizó dicha cantidad de BC con el fin de contar con la cantidad necesaria para la preparación de los dos tratamientos propuestos en el numeral II-IV. El tamizado se realizó durante un período de 20 minutos, transcurrido el cual se procedió a recolectar las muestras retenidas en cada tamiz, las cuales fueron pesadas y almacenadas en bolsas Ziploc para su uso en los procesos posteriores. Para la preparación de los tratamientos se utilizó el tamaño de partícula del cual se contaba con mayor cantidad.

2.4. Extrusión – pelletizado

Se prepararon dos tratamientos al 5 % y 15% de BC, teniendo en cuenta el trabajo publicado por Murillo y colaboradores en el año 2023 (Murillo et al., 2023), quienes realizaron preparaciones en porcentajes del 0% al 10%, empleando solamente la BC con tamaño medio de partícula de 0,36 mm obtenida en el numeral II-III-V. Cada una de las mezclas se ingresó de manera manual a la tolva de alimentación de la extrusora, donde los tornillos impulsan el material y cada zona de temperatura le brinda la energía necesaria para que cambie de estado sólido a viscoelástico según los parámetros de la Tabla 1, permitiendo que pueda expulsarse por las boquillas de

extrusión, obteniendo así hilos que son enfriados mediante agua a temperatura ambiente (20°C) para ser cortados en formas de pellets de aproximadamente 5 mm.

2.5. Caracterización de pellets

Para caracterizar los pellets se determinó el contenido de humedad y cenizas siguiendo los mismos parámetros descritos en los numerales II-III-I y II-III-II.

2.6. Pruebas de impresión 3D

Dado que esta investigación se centra en la empleabilidad de residuos orgánicos para procesos de manufactura aditiva, después de obtenidos los pellets del material compuesto de los dos tratamientos, fueron empleados para alimentar la impresora 3D, con la cual se generaron figuras geométricas específicamente rectángulos; a fin de conocer el comportamiento del material. Para ello se emplearon los parámetros que

se muestran en la Tabla 2. Se trabajó inicialmente con condiciones de temperatura estándar establecidas en trabajos previos y posteriormente fue necesario variar la temperatura de la boquilla para facilitar el proceso de impresión.

3. Resultados y análisis

3.1. Caracterización borra de café

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización BC utilizada, se observa que la BC presenta una humedad de $2,96 \pm 0,12$; cenizas $1,50 \pm 0,02$; Materia volátil $5,30 \pm 0,98$ y carbono fijo $90,00 \pm 0,01$. Al comparar los datos obtenidos con trabajos de otros autores como Urribarri et al. (2014), quienes reportaron la humedad de borra de café $10,49 \pm 0,09$, y Narváez y Villota, (2018), cuyo contenido de humedad de borra de café sin secar es de $95,8 \pm 1,93$; se puede sugerir que la BC que se empleó en esta investigación

Tabla 1. Condiciones de extrusión de PLA/BC							
Zona	1	2	3	4	5	Frecuencia de halador (Hz)	Frecuencia de tornillo (Hz)
Temperatura °C	100	150	150	100	130	30	80

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Parámetros de impresión 3D para los tratamientos				
Tratamiento	Porcentaje de extrusión (%)	Temperatura de boquilla (°C)	Temperatura de cama (°C)	Temperatura de compartimiento (°C)
PLA+BC 5%	100	200	60	145
PLA+BC 15%	100	190	60	145

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Caracterización Borra de café	
Parámetro	Contenido %
Humedad	$2,96 \pm 0,12$
Cenizas	$1,50 \pm 0,02$
Materia Volátil	$5,30 \pm 0,98$
Carbono fijo	$90,00 \pm 0,01$
Fuente: elaboración propia.	

posiblemente tuvo un proceso previo o una condición de almacenamiento diferente, antes de ingresar al laboratorio el cual retiro parte de la humedad que esta tenía, por lo tanto cuando se determinó su porcentaje de humedad se reportó menos que la de los autores mencionados.

La humedad desempeña un valor importante debido a que valores bajos facilitan la compactación de las materias primas y la estabilidad de los pellets (González Castillo et al., 2014), ya que al contar con bajos valores de humedad en las materias primas utilizadas se facilitará la adhesión de las mismas a la matriz polimérica, que para nuestro caso es PLA; lo que indica que la BC empleada en este trabajo de investigación permitirá obtener pellets con características adecuadas y que a su vez facilite la alimentación continua de la impresora 3D.

Al analizar el valor de carbono fijo obtenido de la BC, se evidencia que es alto, ya que se estimó en 90% como se describe en la tabla 3.; al relacionarlo con la composición de la BC, se puede sugerir que dicho porcentaje es significativamente alto por el contenido de polisacáridos, ya que, según Batista et al., 2020, el 50% de BC corresponde a polisacáridos entre los que podemos encontrar celulosa, galactomananos y arabinogalactanos (Batista et al; 2020). Esto es importante ya que la presencia de estos compuestos puede afectar la compatibilidad y adherencia de los refuerzos a la matriz polimérica, dado que se ha demostrado la necesidad de realizar modificaciones a los materiales, así como lo menciona Gama et al., 2022, quienes mencionan que la modificación de la BC, puede mejorar la compatibilidad de la matriz y contribuye a obtener mejores resultados en las pruebas mecánicas de tensión y flexión, (Gama et al., 2022), por lo que se puede sugerir que al modificar la BC previo a su uso

podría facilitar la adhesión de la BC a la matriz polimérica.

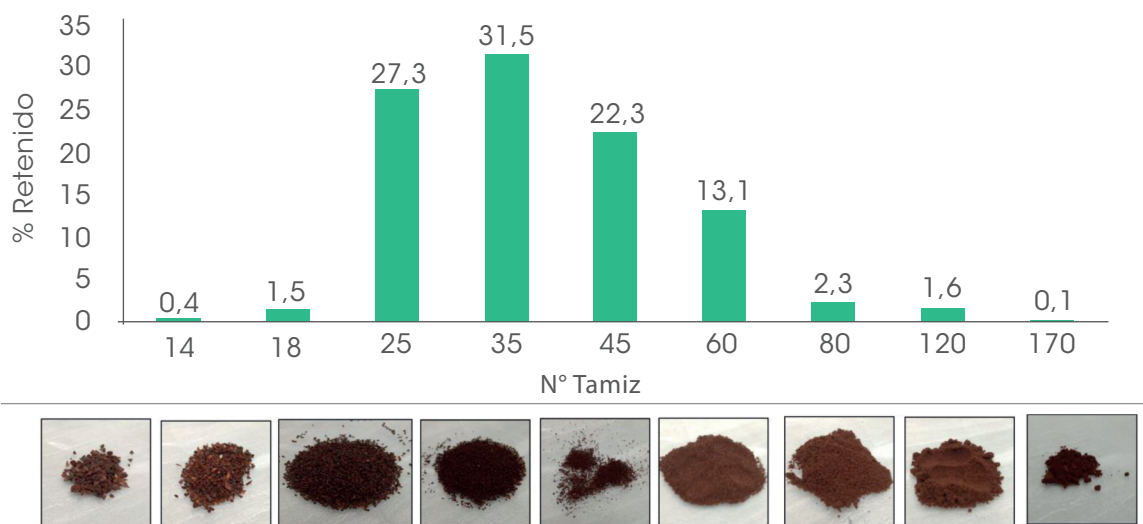
En cuanto al contenido de material volátil se observa que es relativamente bajo, aunque si se compara con la humedad presente es más alto. Dicho valor es crucial ya que en el estudio realizado por (Arredondo et al. 2022) se menciona que la presencia de altos niveles de materiales volátiles puede generar mayores porosidades en los materiales, que para lo que se desea en esta investigación sería negativo porque afectaría directamente la calidad del material obtenido en los procesos posteriores de extrusión y manufactura aditiva.

Por otro parte en la Figura 2 se ilustran los resultados obtenidos en el análisis granulométrico para la BC, el rango de los porcentajes de retención de las partículas de BC está entre $0,03 \pm 0,04$ y $18,77 \pm 1,23$, siendo el mayor este último en el que se evidencia que el mayor porcentaje retenido corresponde al tamiz número 35 obteniendo 233,80 g.

Se realizó un análisis comparativo con el estudio de (Zarate y Montalvo 2023), quienes llevaron a cabo una prueba de granulometría de BC-H₂O, sometiendo el material a un secado a 45 °C. Su análisis reveló un tamaño de partícula entre 500 µm y 250 µm, con una humedad de 63,7 %. En contraste, nuestros ensayos con BC implicaron un secado a 60 °C, obteniendo un tamaño de partícula de 710 µm – 500 µm correspondiente al tamiz empleado (Tabla 4), con una humedad de 2,96 %.

Lo anterior muestra que es muy común encontrar tamaños de partículas similares independientemente de la muestra de BC, esto permite asegurar la reproducibilidad del material que se elaboró sin necesidad de generar proceso de disminución de partículas a la materia prima.

Figura 2. Grafica de granulometría



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Datos de tamizado borra de café

N° TAMÍZ	APERTURA DEL TAMÍZ (µm)	MASA RETENIDA (g)	% RETENIDO
14	14097,00	2,90	0,20 ± 0,14
18	1000,76	11,30	0,76 ± 0,05
25	706,12	202,40	12,92 ± 0,21
35	485,14	233,80	18,77 ± 1,23
45	353,06	165,60	11,31 ± 2,46
60	248,92	97,00	6,16 ± 1,27
80	177,80	17,40	1,15 ± 1,06
120	124,46	11,60	0,49 ± 0,66
170	88,90	0,50	0,03 ± 0,04

Fuente: elaboración propia.

3.2. Extrusión-pelletizado

En la Figura 3 se ilustra los pellets obtenidos en el proceso de extrusión para los tratamientos establecidos. En la Figura 3A se observa que al adicionar el 5% de BC se obtiene una superficie más uniforme en comparación con la que presenta el tratamiento del 15% (Figura 3B). Este comportamiento puede deberse a que como se ha mencionado anteriormente, el contenido de humedad, material volátil y carbono fijo contribuye a

que se aumente la porosidad causada por los vapores generados al someter la BC a altas temperaturas.

Adicionalmente se observa que los pellets del 15 % de BC presentan una mejor homogeneidad en cuanto a tamaño, esto puede deberse a que generalmente, las partículas adicionadas a un material aumentan la dureza de este (Adeleke et al., 2023), por lo tanto, se fragilizan haciendo que el proceso de pelletizado sea más sencillo.

Figura 3. Pellets obtenidos proceso de extrusión



Nota: A) Tratamiento 5%, B) Tratamiento 15% BC.

Fuente: elaboración propia.

3.4. Caracterización de pellets

Según la norma ÖNORM M 7135, citada por (González Castillo *et al.* 2014), el porcentaje de humedad de los pellets debe ser igual o inferior al 18,0%. Al comparar nuestros datos con los del artículo mencionado, se puede observar que nuestros resultados se encuentran dentro de los parámetros establecidos. Mientras que su muestra presentaba un 8,56% de humedad, los pellets elaborados en la investigación arrojaron un valor de $2,35 \pm 0,05$, lo que permite sugerir que la humedad de los pellets cumpliría con la norma antes mencionada.

En el caso de la determinación de cenizas se hizo la comparación con la investigación que realizó (Narváez y Villota-Erazo 2018), donde se reporta un porcentaje de 37,3 mientras que en los resultados que se obtuvieron se evidencia un menor porcentaje (Tabla 5), lo que concuerda con lo esperado dado que al ser un material compuesto elaborado de materias primas que se obtienen de fuentes naturales su contenido de materia orgánica debe ser alto.

Tabla 5. Resultados de la caracterización de los pellets obtenidos

Tratamiento	5%	15%
Humedad	$2,35 \pm 0,05$	$4,19 \pm 0,06$
Cenizas	$0,05 \pm 0,04$	$0,21 \pm 0,04$

Fuente: elaboración propia.

3.5. Pruebas de Impresión 3D

En la Figura 4 se muestra los resultados de las impresiones realizadas con los tratamientos elaborados. Dado que el tamaño de partícula que se empleo es de $710 \mu\text{m} - 500 \mu\text{m}$ no es posible emplear una boquilla de impresión tradicional la cual ronda alrededor de los 0.8 mm, esto a fin de evitar atascamientos en la salida del equipo (Hermann, S. 2021)., por lo tanto, se empleó una boquilla de 2 mm.

Al observar la Figura 4 se evidencia que al aumentar la cantidad de refuerzo de BC la resolución de la impresión disminuye, este factor puede mejorar si se emplean la BC en tamaños inferiores, como por ejemplo los que reporta Hermann en el año 2021. No obstante, ambos tratamientos fueron fácilmente procesables

Figura 4. Pruebas de impresión con BC



Nota: A) Tratamiento 5% vista superior, B) Tratamiento 5% vista lateral, C) Tratamiento 15% vista superior, D) Tratamiento 15% vista lateral

Fuente: elaboración propia.

mediante manufactura aditiva, sin importar la orientación del relleno (concéntrico o a 45°), mostrando así que puede ser empleado en dicha técnica siendo una solución no solamente ambiental sino de economía circular.

En el proceso de impresión 3D de ambos tratamientos, se evidenció que al finalizar la impresión y proceder a despegar la pieza de la cama de impresión el material tenía un comportamiento flexible, lo que implicó en que este se deformara como se muestra en las Figuras 4B y 4D. Por lo tanto, es importante dejar que la pieza se enfríe totalmente antes de ser retirada de la superficie de impresión.

Aunque en este trabajo no se evaluó la afectación a las propiedades térmicas y mecánicas que la BC puede generar en el material, se espera que al emplear este material como refuerzo se mejoren las propiedades del PLA (Chang *et al.*, 2019).

4. Conclusiones

En conclusión, el proceso de secado de la borra de café es fundamental para asegurar que los filamentos obtenidos disminuyan la porosidad y se aumente la calidad del material, sin embargo, es importante tener en cuenta que en el caso de la BC empleada para la investigación la

porosidad que presenta el material puede ser causada por material volátil y no necesariamente solo por la humedad. Aunque en este estudio se empleó el tamaño de partícula de la BC entre 710 μm - 500 μm debido a que en el análisis granulométrico fue en el que mayormente se retuvo material, es recomendable emplear tamaños de grano inferiores a fin de mejorar la calidad de impresión. Adicionalmente, se observó que al incorporar un 5% de borra de café en la mezcla con PLA, los pellets resultantes presentan una superficie lisa y un color café claro, características que pueden ser ventajosas para aplicaciones estéticas y funcionales. Sin embargo, al aumentar la proporción de borra de café al 15%, los pellets adquieren una textura más rugosa y un color más oscuro. Este cambio en las propiedades físicas resalta la importancia de optimizar tanto la proporción de borra de café como el proceso de mezcla y tamizaje; así como la necesidad de modificar la BC para mejorar las características estéticas y mecánicas del material. En conjunto, estos resultados no solo contribuyen a una mejor comprensión de la borra de café como materia prima para biocompuestos, sino que también abren la puerta a futuras investigaciones que podrían explorar su utilización en aplicaciones industriales, promoviendo así un enfoque más sostenible en el uso de residuos.

Referencias

- Adeleke, A. A., Ikubanni, P. P., Odusote, J. K., Kolawole, L. T., Orhadahwe, T. A. & Lawal, M. (2023). Physico-mechanical properties of polymer matrix composite material reinforced with carbonized cassava back peel and iron fillings. *Acta Metallurgica Slovaca*, 29(4), 181–186. <https://doi.org/10.36547/ams.29.4.1914>
- Arredondo-Ferrer, E., Buitrago-Sierra, R. y López, D. (2022). Materiales carbonosos jerarquizados derivados de la borra de café para su aplicación en supercondensadores. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 46(178), 233–247. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1585>
- Ballesteros, L. F., Cerqueira, M. A., Teixeira, J. A., & Mussatto, S. I. (2015). Characterization of polysaccharides extracted from spent coffee grounds by alkali pretreatment. *Carbohydrate Polymers*, 127, 347–354. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.03.047>
- Batista, M. J. P. A., Ávila, A. F., Franca, A. S., & Oliveira, L. S. (2020). Polysaccharide-rich fraction of spent coffee grounds as promising biomaterial for films fabrication. *Carbohydrate Polymers*, 233(115851), 115851. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.115851>
- Chang, Y.-C. et al. (2019). No such thing as trash: A 3D-printable polymer composite composed of oil-extracted spent coffee grounds and polylactic acid with enhanced impact toughness. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(18), 15304–15310. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b02527>
- Gama, N., Ferreira, A. & Evtuguin, D. V. (2022). New poly(lactic acid) composites produced from coffee beverage wastes. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(1), 51434. <https://doi.org/10.1002/app.51434>
- García-García, D., Carbonell, A., Samper, M. D., García-Sanoguera, D., & Balart, R. (2015). Green composites based on polypropylene matrix and hydrophobized spend coffee ground (SCG) powder. *Composites. Part B, Engineering*, 78, 256–265. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.080>
- González Castillo, Y. A., González Castillo, Y. A., Rincón Rincón, S. N., Camargo Vargas, G. de J., Dévora Isiordia, G. E., & Sierra Vargas, F. E. (2014). Caracterización de Materiales lignocelulósicos residuales de palma de aceite y palma de coco para la fabricación de pellets. *Avances Investigación en Ingeniería*, 11(1), 83–91. <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.304>
- HAZ. (2020/01/13). Starbucks regala posos de café para hacer compost casero y reutilizar los residuos. *Revista Haz*. <https://hazrevista.org/innovacion-social/2020/01/starbucks-regala-posos-de-cafe-para-hacer-compost-casero-y-reutilizar-los-residuos/>
- Hermann, S. (2021/08/28). *Eco PLA filament with Spent Coffee Grounds*. CNC Kitchen. <https://www.cnckitchen.com/blog/eco-pla-filament-with-spent-coffee-grounds>
- ICO. (2023). *Coffee market report*. <https://icocoffee.org/resources/coffee-market-report-statistics-section>
- Juan Valdez (2023). *Día de la tierra*. *Día de la tierra – Juan Valdez*. (n.d.). <https://juanvaldez.com/dia-de-la-tierra/%C2%A0%C2%A0>
- Karmee, S. K. (2018). A spent coffee grounds based biorefinery to produce biofuels, biopolymers, antioxidants and biocomposites. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 72, 240–254. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.042>
- Lascasas, S. (2021). 10 usos para aprovechar los residuos del café. *Cafés El Criollo; El Criollo*. <https://cafeselcriollo.com/listados/diez-usos-para-aprovechar-los-residuos-del-cafe/>

- Murillo Usuga, C.A., del Valle Tirado, S., Volkmar Vélez, D., y Zapata Henao, L. F. (2023). Fabricación de filamentos de impresión 3D con ácido poliláctico comercial y reciclado rellenos con residuos de café. *Revista ION*, 36(2), 7-13. <https://doi.org/10.18273/revion.v36n2-2023001>
- Murthy, P. S. & Madhava Naidu, M. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review. *Resources, Conservation, and Recycling*, 66, 45-58. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.005>
- Narváez, M., & Villota, M. (2018). Caracterización Fisicoquímica de la Borra de Café proveniente de la hacienda Supracafé en el municipio de Cajibío, Departamento del Cauca. [Corporación Universitaria Autónoma del Cauca]. <https://repositorio.uniautonoma.edu.co/bitstream/handle/123456789/306/T%20IA-M%20065%202018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Nguyen, V.-T. et al. (2022). Adsorption of norfloxacin from aqueous solution on biochar derived from spent coffee ground: Master variables and response surface method optimized adsorption process. *Chemosphere*, 288(Pt 2), 132577. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132577>
- Ramírez Pinzón, F. C. y Riaño Galán, Y. F. (2022/02/04). *Propuesta técnico-financiera para la producción de pellets de borra de café utilizando aceite vegetal como aglomerante a nivel planta piloto*. Fundación Universidad de América <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8847>
- Saratale, G. D., Bhosale, R., Shobana, S., Banu, J. R., Pugazhendhi, A., Mahmoud, E. & Kumar, G. (2020). A review on valorization of spent coffee grounds (SCG) towards biopolymers and biocatalysts production. *Bioresource Technology*, 314, 123800.
- Silva, D. (2021). *La UAESP y Tostao se unen para aprovechar los residuos del café*. <https://www.uaesp.gov.co/noticias/la-uaesp-y-tostao-se-unen-aprovechar-los-residuos-del-cafe>
- Urribarrí, A. et al. (2014). Evaluación del potencial de la borra de café como materia prima para la producción de biodiesel. *Multiciencias*, 14(2), 129–139. <https://www.redalyc.org/pdf/904/90432601006.pdf>
- Zarate, F. A. R. y Montalvo, F. D. (2023). *Capacidad de la borra de café para remover cobre y plomo del lixiviado generado en la celda transitoria de Rupa Rupa – Tingo María - 2023*. (Trabajo de Grado) Universidad Nacional Agraria de la Selva, Ingeniería Ambiental, Perú. <https://repositorio.unas.edu.pe/items/d09e5b15-8c72-42d5-b70c-8312096b057b>