

Valorización morfológica y caracterización química de la borra de café para usos potenciales

Morphological valorization and chemical characterization of spent coffee grounds for potential uses

Valorização morfológica e caracterização química da borra de café para usos potenciais

Robin Zuluaga
Facultad de Ingeniería Agronómica, Universidad del Tolima,
Ibagué, Colombia
ROR: <https://ror.org/011bqgx84>
Contacto: rozuluagag@ut.edu.co
ORCID: [0000-0002-7039-0038](https://orcid.org/0000-0002-7039-0038)

Catalina Gómez Hoyos
Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia
ROR: <https://ror.org/02dxm8k93>
Contacto: catalina.gomezh@upb.edu.co
ORCID: [0000-0003-3308-3722](https://orcid.org/0000-0003-3308-3722)

Jorge Velásquez-Cock
Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia
ROR: <https://ror.org/02dxm8k93>
Contacto: jorgeandres.velasquez@upb.edu.co
ORCID: [0000-0001-5698-0640](https://orcid.org/0000-0001-5698-0640)

Lina Vélez-Acosta
Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia
ROR: <https://ror.org/02dxm8k93>
Contacto: lina.velez@upb.edu.co
ORCID: [0000-0002-7774-7378](https://orcid.org/0000-0002-7774-7378)

Isabela Palacio Valencia
Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia
ROR: <https://ror.org/02dxm8k93>
Contacto: isabela.palacio@upb.edu.co
ORCID: 0009-0005-3388-4062

Javier Augusto Rodríguez Torres
Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia
ROR: <https://ror.org/02dxm8k93>
Contacto: javier.rodriguez@upb.edu.co
ORCID: 0009-0007-4160-6876

Piedad Gañán Rojo
Facultad de Ingeniería Química, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia
ROR: <https://ror.org/02dxm8k93>
Contacto: piedad.ganan@upb.edu.co
ORCID: [0000-0003-2596-2591](https://orcid.org/0000-0003-2596-2591)

Recibido 11-02-2026	Revisado 13-02-2026	Aceptado 16-02-2026
---------------------	---------------------	---------------------

Resumen

Este estudio evalúa el potencial de valorización de la borra de café (SCG) mediante una caracterización morfológica, química, estructural, térmica y mineral. Los resultados revelan una biomasa predominantemente lignocelulósica de naturaleza amorfa, con concentraciones minerales seguras según los límites de ingesta diaria. Estos hallazgos demuestran la viabilidad de los SCG como materia prima de alto valor para el desarrollo de materiales compuestos y enmiendas orgánicas, promoviendo modelos de economía circular en la agroindustria cafetera.

Palabras clave: borra de café; análisis morfológico; composición química; usos potenciales; café

Abstract

This study evaluates the valorization potential of spent coffee grounds (SCG) through morphological, chemical, structural, thermal, and mineral characterization. The results reveal a predominantly lignocellulosic biomass of an amorphous nature, with mineral concentrations within safe limits according to recommended daily intake guidelines. These findings demonstrate the feasibility of SCG as a high-value raw material for the development of composite materials and organic soil amendments, promoting circular economy models within the coffee agro-industry.

Keywords: spent coffee ground; potential uses; morphological analysis; chemical composition; coffee

Resumo

Este estudo avalia o potencial de valorização da borra de café (SCG) por meio de uma caracterização morfológica, química, estrutural, térmica e mineral. Os resultados revelam uma biomassa predominantemente lignocelulósica de natureza amorfa, com concentrações minerais seguras de acordo com os limites de ingestão diária. Esses achados demonstram a viabilidade dos SCG como matéria-prima de alto valor para o desenvolvimento de materiais compósitos e emendas orgânicas, promovendo modelos de economia circular na agroindústria cafeeira.

Palavras-chave

borra de café; análise morfológica; composição química; usos potenciais; café

Introducción

La borra de café (SCG) es uno de los subproductos más masivos de la industria global, con una generación estimada de 6,5 millones de toneladas para el ciclo 2022-2023 (Huang et al., 2024). Debido a su alta carga orgánica y los retos en su disposición final, este material se ha consolidado como un recurso clave para la economía circular. Investigaciones previas destacan su potencial en la obtención de precursores de biodiésel, antioxidantes fenólicos y polisacáridos funcionales (Ballesteros et al., 2015), además de su efectividad como enmienda para suelos (Cervera-Mata et al., 2019) como refuerzo para biocompuestos utilizando matrices poliméricas biodegradables como polilactida (PLA) (Wu, 2015); y como material para biocompuestos adecuados para aplicaciones de ingeniería civil (Nguyen & Nguyen, 2021). Bajo esta premisa, el presente estudio tiene como objetivo caracterizar los SCG recolectados en

la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) para evaluar su aplicabilidad en procesos agroindustriales sostenibles.

Marco teórico

El aprovechamiento de subproductos cafeteros es clave para minimizar la huella ecológica y fortalecer la bioeconomía. Los SCG, obtenidos mediante la extracción acuosa del grano, se distinguen por ser una matriz lignocelulósica densa en biopolímeros y metabolitos secundarios. En su fracción orgánica sobresalen compuestos fenólicos, diversas familias de polisacáridos (Ballesteros et al., 2015) y una fracción lipídica significativa, complementados por un perfil mineral de oligoelementos como hierro, manganeso y zinc (Cervera-Mata et al., 2019). Por lo tanto, el uso de protocolos de caracterización fisicoquímica resulta indispensable para validar su inserción en cadenas de suministro sostenibles, orientadas a la síntesis de vectores energéticos, matrices poliméricas y bioestimulantes agrícolas (Jiménez-Zamora et al., 2015).

Materiales y métodos

Esta investigación caracterizó los SCG recolectados en la cafetería "Laboratorio del Café" de la UPB (Medellín-Colombia). Las muestras se secaron a 105 °C por 3 h y se tamizaron a malla 400 (37 µm). La morfología se analizó por FESEM y la composición química (FDN, FDA y lignina total) mediante el método de Van Soest, incluyendo cenizas (ASTM D1102-84). La estructura y estabilidad se evaluaron vía ATR-FTIR, TGA y DRX (corrección Yao et al., 2020).

Finalmente, el perfil mineral se determinó por ICP-AES y AAS, calculando la ingesta diaria estimada (IDE).

Resultados

El análisis FESEM (Figura 1) reveló partículas irregulares con microporos y depósitos lipídicos, morfología que favorece la retención de humedad y el anclaje en materiales compuestos. La naturaleza polimérica fue ratificada por ATR-FTIR (Figura 2) mediante bandas de celulosa, hemicelulosa y lignina propias de la pared celular vegetal.

Térmicamente (Figura 3), el perfil TG/DTG evidenció tres etapas: desorción de volátiles (<150 °C), degradación lignocelulósica (200-450 °C) y pirólisis de lípidos con formación de residuo carbonoso. Esta estructura es predominantemente amorfa, según el patrón de DRX (Figura 4), debido a la alta proporción de hemicelulosa y lignina. Finalmente, el contenido de cenizas (6,83 %) y el análisis mineral (ICP-AES/AAS) confirmaron concentraciones seguras, validando el uso de los SCG en la industria alimentaria o como enmienda orgánica.

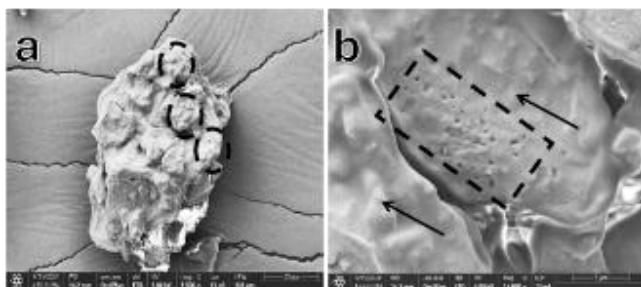


Figura 1. Microscopía electrónica de barrido por emisión de campo (FE-SEM) (Zuluaga et al., 2024).

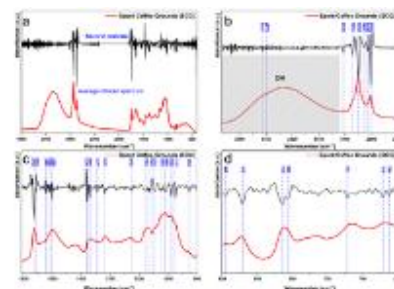


Figura 2. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier con reflectancia total atenuada (ATR-FTIR). (Zuluaga et al., 2024).

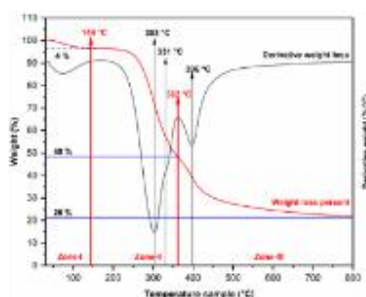


Figura 3. Análisis termogravimétrico (TGA) de SCG. (Zuluaga et al., 2024).

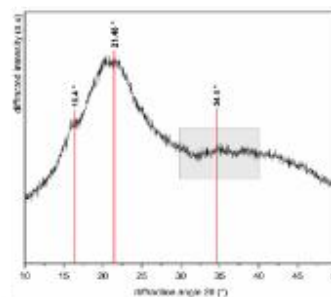


Figura 4. Análisis de difracción de rayos-X (DRX). (Zuluaga et al., 2024).

Discusión de los Resultados

Los hallazgos confirman que los SCG son una biomasa lignocelulósica con alto potencial de valorización. Su morfología microfina (FESEM) y matriz compleja de polisacáridos y lípidos guardan coherencia con las transformaciones térmicas del tostado (Oosterveld et al., 2003). La presencia de componentes típicos de la pared celular y biocompuestos remanentes, ratificada por la cuantificación de fibras y perfiles ATR-FTIR, se alinea con investigaciones previas (Ballesteros et al., 2014). Aunque su estabilidad térmica hasta 200 °C y naturaleza amorfa (TGA/DRX) favorecen su uso en bioprocesos, su baja cristalinidad limita su desempeño como refuerzo estructural frente a fibras más cristalinas (Bledzki, 1999). Asimismo, su perfil mineral (ICP-AES/AAS) sugiere aplicaciones en enmiendas de suelos, aunque la presencia de inhibidores como

cafeína y polifenoles plantea la necesidad de pretratamientos (McNutt & He, 2019).

Conclusiones

La caracterización de los SCG ratifica su valor como biomasa lignocelulósica, transformando un residuo voluminoso en materia prima estratégica. Su morfología porosa y riqueza en polisacáridos y lípidos sustentan su viabilidad en múltiples sectores.

El perfil mineral sugiere aplicaciones funcionales seguras en el sector alimentario, mientras que su estabilidad térmica y naturaleza amorfa facilitan la síntesis de materiales sostenibles y bioprocesos. Este estudio fundamenta el aprovechamiento de los SCG bajo principios de economía circular, mitigando el impacto ambiental mediante nuevas rutas agroindustriales.

Declaración de los autores

Durante la preparación de este trabajo, los autores utilizaron el modelo de lenguaje Gemini 1.5 Flash (operado bajo la interfaz de Gemini 3) con el fin de realizar la corrección de estilo, mejora de la gramática y optimización de la fluidez del texto. Tras el uso de esta herramienta, los autores revisaron y editaron el contenido de manera exhaustiva, asumiendo la responsabilidad total de la precisión técnica y la integridad de los resultados presentados.

Referencias

- 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>
- Ballesteros, L. F., Teixeira, J. A., & Mussatto, S. I. (2014). Chemical, Functional, and Structural Properties of Spent Coffee Grounds and Coffee Silverskin. *Food and Bioprocess Technology*, 7(12), 3493–3503. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1349-z>
- Bledzki, A. (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science*, 24(2), 221–274. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(98\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(98)00018-5)
- Cervera-Mata, A., Navarro-Alarcón, M., Delgado, G., Pastoriza, S., Montilla-Gómez, J., Llopis, J., Sánchez-González, C., & Rufián-Henares, J. Á. (2019). Spent coffee grounds improve the nutritional value in elements of lettuce (*Lactuca sativa* L.) and are an ecological alternative to inorganic fertilizers. *Food Chemistry*, 282, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.101>
- Huang, J., Li, B., Xian, X., Hu, Y., & Lin, X. (2024). Efficient Bioethanol Production from Spent Coffee Grounds Using Liquid Hot Water Pretreatment without Detoxification. *Fermentation*, 10(8), 436. <https://doi.org/10.3390/fermentation10080436>
- Jiménez-Zamora, A., Pastoriza, S., & Rufián-Henares, J. A. (2015). Revalorization of coffee by-products. Prebiotic, antimicrobial and antioxidant properties. *LWT - Food Science and Technology*, 61(1), 12–18. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.11.031>
- McNutt, J., & He, Q. (Sophia). (2019). Spent coffee grounds: A review on current utilization. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 71, 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.11.054>
- Nguyen, T. A., & Nguyen, Q. T. (2021). Hybrid Biocomposites Based on Used Coffee Grounds and Epoxy Resin: Mechanical Properties and Fire Resistance. *International Journal of Chemical Engineering*, 2021, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2021/1919344>

- Oosterveld, A., Voragen, A. G. J., & Schols, H. A. (2003). Effect of roasting on the carbohydrate composition of *Coffea arabica* beans. *Carbohydrate Polymers*, 54(2), 183–192. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(03\)00164-4](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(03)00164-4)
- Wu, C.-S. (2015). Renewable resource-based green composites of surface-treated spent coffee grounds and polylactide: Characterisation and biodegradability. *Polymer Degradation and Stability*, 121, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.08.011>
- Yao, W., Weng, Y., & Catchmark, J. M. (2020). Improved cellulose X-ray diffraction analysis using Fourier series modeling. *Cellulose*, 27(10), 5563–5579.
- Zuluaga, R., Hoyos, C. G., Velásquez-Cock, J., Vélez-Acosta, L., Palacio Valencia, I., Rodríguez Torres, J. A., & Gañán Rojo, P. (2024). Exploring Spent Coffee Grounds: Comprehensive Morphological Analysis and Chemical Characterization for Potential Uses. *Molecules*, 29(24), 5866. <https://doi.org/10.3390/molecules29245866>



VALORACIÓN MORFOLÓGICA Y CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA BORRA DE CAFÉ (SCGs) PARA USOS POTENCIALES

Robin Zuluaga¹, Catalina Gómez Hoyos², Jorge Velásquez-Cock³, Lina Vélez-Acosta², Isabela Palacio Valencia², Javier Augusto Rodríguez Torres², Piedad Gañán Rojo²

¹Facultad de Ingeniería Agronómica, Universidad del Tolima, Barrio Santa Helena Parte Alta 1, Código Postal 730006299 Ibagué-Tolima-Colombia

²Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Pontificia Bolivariana, Circular 1 N 70-01, Medellín 050031, Colombia

³Facultad de Ingeniería Química, Universidad Pontificia Bolivariana, Circular 1 N 70-01, Medellín 050031, Colombia

1. Introducción

La producción mundial de café en 2022-2023 fue de 168,2 millones de sacos como se observa en la Figura 1, lo que generó aproximadamente 6,5 millones de toneladas de borra de café (SCGs) (Huang et al., 2024). Estos residuos poseen alto contenido orgánico y pueden generar contaminación si no se gestionan adecuadamente. No obstante, presentan un gran potencial en la economía circular, gracias a la extracción de aceites, compuestos fenólicos y polisacáridos con usos en biocombustibles, biomateriales y abonos orgánicos (McNutt & He, 2018; Jiménez-Zamora et al., 2014; Cervera-Mata et al., 2019). Este estudio busca caracterizar los SCGs de las cafeterías de la UPB para su posible aprovechamiento.



Figura 1: Producción mundial de café y generación de SCGs

2. Metodología

Se realizaron análisis para los SCGs de una de las cafeterías de la UPB. Las pruebas realizadas fueron: Composición química (FDA, FDN, lignina total, cenizas), morfología (FESEM), espectroscopia (ATR-FTIR), análisis térmico (TGA), difracción de rayos-X (XRD) y análisis de minerales por (ICP-AES, AAS), tal y como se describe en la Figura 2.

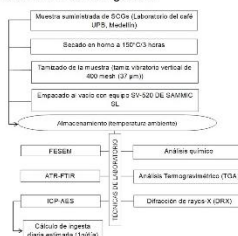


Figura 2: Técnicas de laboratorio aplicadas a la caracterización de SCGs

3. Resultados y Discusión

La Figura 3a muestra una partícula de SCG con una forma irregular, característica de los materiales de origen biológico. En la Figura 3b, se presenta una imagen con mayor aumento, que destaca pequeñas acumulaciones de aceite y microporos en la pared celular. Estos microporos reflejan cambios estructurales inducidos por el proceso de tostado, lo que facilita la migración del aceite de café hacia la superficie del grano (Oosterveld et al., 2003)

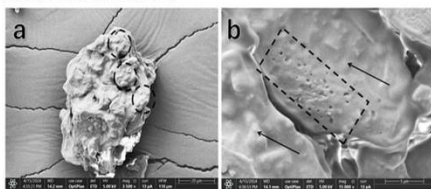


Figura 3: Microscopía electrónica de barrido por emisión de campo (FESEM) de SCG. (Zuluaga et al., 2024)

El análisis ATR-FTIR mostrado en la Figura 4 de SCGs identificó varios componentes característicos de las paredes celulares de las plantas, incluyendo celulosa, hemicelulosa, lignina y aceite. Se observaron interacciones significativas entre polisacáridos como la celulosa, las pectinas y las regiones amorfas de la hemicelulosa. La reticulación de estos polisacáridos forma complejos, como el celulosa-xilano, que se unen a las microfibrillas de celulosa mediante enlaces de hidrógeno, contribuyendo así a una estructura supramolecular robusta.

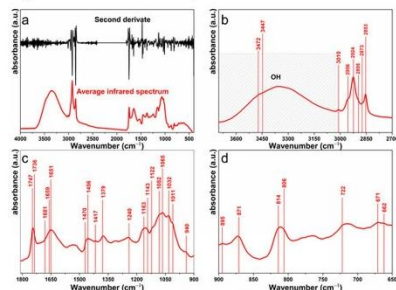


Figura 4: La espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier de reflectancia total atenuada (ATR-FTIR) de los SCG (Zuluaga et al., 2024).

En la Figura 5 se presentan los resultados del análisis TGA, los cuales confirman la presencia de componentes estructurales típicos de las paredes celulares de las plantas, como celulosa, hemicelulosa y lignina. Estos componentes fueron cuantificados previamente mediante análisis químico y espectroscopia ATR-FTIR. Al finalizar el análisis térmico, se observó que aproximadamente el 22 % en peso corresponde a cenizas residuales, compuestas principalmente de minerales (Sharma et al., 2004).

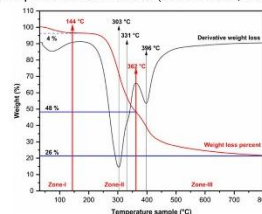


Figura 5: Análisis termogravimétrico de los SCG. (Zuluaga et al., 2024)

Por otro lado, los resultados presentados en la Figura 6 destacan el predominio de estructuras no celulósicas en el patrón de difracción de rayos X, evidenciando un estado no cristalino con picos de dispersión que indican la naturaleza amorfa de la muestra. Esta característica, típica de muchos materiales lignocelulósicos, facilita la hidrólisis enzimática, lo que mejora la conversión de polisacáridos en azúcares fermentables y posiciona a los SCG como materia prima para la producción de bioetanol (Alvira et al., 2010).

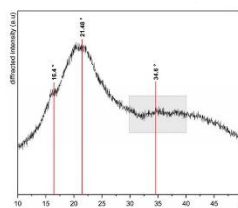


Figura 6: Análisis de difracción de rayos X (DRX) de SCG. (Zuluaga et al., 2024).

4. Conclusiones

- Integrar SCGs en estrategias de economía circular.
- Evaluar aplicaciones en producción de bioetanol y compuestos de alto valor agregado.
- Implementar su uso en la UPB como modelo de gestión sostenible de residuos
- Fuente importante de hemicelulosas y aceites.

5. Bibliografía

- Alvir, P., Torres-Pedro, E., Delavente, M., & Rojas, M. J. (2020). Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on agroindustrial byproducts: A review. *Bioresource Technology*, 307(1), 485-488. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.11033>
- Huang, J. L., R. Khan, X. Ma, Y. & Lin, X. (2024). Efficient Rice and Production from Spent Coffee Grounds Using Liquid Hot Water Pretreatment versus Solvent-based. *Environmental*, 138(1), 438. <https://doi.org/10.1007/s10651-023-01930-5>
- Minelli, J., & R. G. Di Girolamo. (2021). Spent coffee grounds: A review of current utilization. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 71, 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.11.058>
- Oosterveld, A., Vergeer, A. D. J., & Jorres, H. A. (2003). Effect of roasting on the carbohydrate composition of Coffea arabica beans. *Carbohydrate Polymers*, 54(2), 115-120. [https://doi.org/10.1016/S0950-2688\(02\)00384-5](https://doi.org/10.1016/S0950-2688(02)00384-5)
- Sharma, R. K., Khosla, J. R., Raju, V. L. J., Ch. Ch. V. S. S. Raju, M. R. (2004). Characterization of coffee from pyrolysis of lignin. *Fuel*, 83(11-12), 1469-1480.
- Zuluaga, R., Hoyos, C. G., Velásquez-Cock, J., Vélez-Acosta, L., Valencia, I. P., Torres, J. A. R., & Rojas, M. J. (2024). Exploring spent coffee grounds: From pretreatment morphological analysis and chemical characterization to potential uses. *Resources*, 20(24), 2024. <https://doi.org/10.3390/resources202402402024>