

Modelado reológico de filamentos sostenibles basados en residuos de café para impresión 3D

Rheological modeling of sustainable filaments based on coffee waste for 3D printing

Dr. William Patricio Proaño Ponce¹

Docente de Maestría en Administración Pública, Instituto de Posgrado
Universidad Estatal del Sur de Manabí. Jipijapa, Ecuador
william.ponce@unesum.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-9798-9780>

Dra. Mayra Mercedes Marcillo Indacochea²

Docente de Maestría en Administración Pública, Instituto de Posgrado
Universidad Estatal del Sur de Manabí. Jipijapa, Ecuador
mayra.marcillo@unesum.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-8847-8479>

Ing. Sara Geoconda Soledispa Reyes³

Docente de Maestría en Administración Pública, Instituto de Posgrado
Universidad Estatal del Sur de Manabí. Jipijapa, Ecuador
sara.soledispa@unesum.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-8658-0709>

Como citar:

Proaño Ponce, W. P., Marcillo Indacochea, M. M., & Soledispa Reyes, S. G. (2026). Modelado reológico de filamentos sostenibles basados en residuos de café para impresión 3D. *Revista Pulso Científico*, 4(1), 656–672. <https://doi.org/10.70577/rps.v4i1.194>

Fecha de recepción: 2026-01-11

Fecha de aceptación: 2026-02-26

Fecha de publicación: 2026-03-24

RESUMEN

La creciente demanda de materiales sostenibles en manufactura aditiva contrasta con la dependencia de polímeros de origen fósil, lo que limita la eficiencia ambiental y la innovación industrial. En este contexto, el objetivo de esta investigación fue analizar el modelado reológico de filamentos sostenibles basados en residuos de café para impresión 3D, evaluando su comportamiento mecánico, funcional y su potencial de escalabilidad; este estudio es resultado del proyecto de investigación “Innovación en materiales sostenibles: Filamentos de posos de café para impresión 3D”. La metodología se sustentó en un enfoque cuantitativo explicativo, mediante el análisis de información secundaria y datos experimentales de caracterización estructural, térmica, mecánica y reológica, integrando técnicas como FTIR, NMR, DSC, TGA y ensayos mecánicos, junto con modelos estadísticos como ecuaciones estructurales y regresión. Los resultados evidenciaron incrementos del módulo elástico superiores al 50 % y hasta el 200 % en matrices flexibles, reducción de la resistencia a la tracción entre 50 % y 70 %, absorción de agua hasta 4.42 %, comportamiento shear-thinning que mejora la extruibilidad y reducción de la huella de carbono cercana al 35 %. Además, se identificó que formulaciones entre 30 % y 40 % optimizan el balance técnico, lo que representa una oportunidad empresarial para desarrollar filamentos sostenibles competitivos, con valor agregado ambiental y potencial de inserción en mercados de manufactura avanzada.

Palabras clave: Impresión 3D, residuos de café, biocompuestos, reología, sostenibilidad, manufactura aditiva.

ABSTRACT

The growing demand for sustainable materials in additive manufacturing contrasts with the continued reliance on fossil-based polymers, which limits environmental efficiency and industrial innovation. In this context, the objective of this study was to analyze the rheological modeling of sustainable filaments based on coffee waste for 3D printing, evaluating their mechanical and functional behavior, as well as their scalability potential; this study is the result of the research project “Innovation in Sustainable Materials: Coffee Ground Filaments for 3D Printing.” The methodology was based on a quantitative explanatory approach, through the analysis of secondary information and experimental data on structural, thermal, mechanical, and rheological characterization, integrating techniques such as FTIR, NMR, DSC, TGA, and mechanical testing, together with statistical models such as structural equation modeling and regression. The results showed increases in elastic modulus exceeding 50% and up to 200% in flexible matrices, reductions in tensile strength between 50% and 70%, water absorption up to 4.42%, shear-thinning behavior that improves extrudability, and a reduction in carbon footprint of approximately 35%. In addition, it was identified that formulations between 30% and 40% optimize the technical balance, representing a business opportunity to develop competitive sustainable filaments with added environmental value and potential integration into advanced manufacturing markets.

Keywords: 3D printing, coffee waste, biocomposites, rheology, sustainability, additive manufacturing.

INTRODUCCIÓN

La manufactura aditiva por deposición de material fundido se ha consolidado como una tecnología de interés industrial por su capacidad para reducir tiempos de desarrollo, personalizar geometrías y disminuir desperdicios frente a esquemas sustractivos convencionales. En 2024, el mercado global de impresión 3D fue estimado en USD 24.8 mil millones, con proyección de USD 57.1 mil millones para 2028, lo que evidencia una expansión sostenida del ecosistema productivo asociado a filamentos, equipos y servicios especializados. Patti (2024) advierte que este crecimiento obliga a replantear la sostenibilidad de los materiales usados en extrusión, particularmente en aplicaciones donde el costo ambiental del insumo comienza a ser un criterio de competitividad. García-Collado et al. (2022) sostienen que la evolución reciente de la manufactura aditiva polimérica exige integrar desempeño funcional, economía de materiales y capacidad de escalamiento, especialmente en sistemas multimateriales.

En ese escenario, la valorización de residuos agroindustriales ha ganado protagonismo como estrategia de innovación tecnológica y diferenciación empresarial. La FAO informó que la producción mundial de café alcanzó 11 millones de toneladas en 2023 y que la cadena global del café genera más de USD 200 mil millones anuales, magnitud que confirma el enorme volumen potencial de subproductos disponibles para aprovechamiento industrial. De Bomfim et al. (2022) explican que los posos de café usados constituyen una corriente residual particularmente atractiva por su disponibilidad, bajo costo y riqueza composicional. Singh et al. (2023) añaden que este residuo conserva fracciones relevantes de celulosa, hemicelulosa, lignina, lípidos y proteínas, lo que lo convierte en un sustrato promisorio para materiales compuestos de mayor valor agregado.

Desde una visión empresarial, el uso de residuos de café en filamentos para impresión 3D permite transitar desde la gestión de desechos hacia modelos de economía circular orientados a nuevos nichos de mercado. Patti (2024) plantea que los materiales sostenibles para extrusión no solo deben reducir impacto ambiental, sino también demostrar estabilidad de proceso y capacidad de repetición industrial. Plamadiala et al. (2025) sostienen que la competitividad del PLA en FDM depende crecientemente de los aditivos que modulan propiedades térmicas, reológicas y mecánicas. Mäder et al. (2025) muestran que los posos de café pueden emplearse como relleno sostenible en biocompuestos biodegradables con contenidos de 30 % a 60 % en peso, lo que abre una ruta concreta para reducir consumo de polímero virgen en formulaciones de uso técnico.

Desde el punto de vista científico técnico, la incorporación de residuos de café en matrices poliméricas no puede evaluarse únicamente por su origen biobasado, sino por su capacidad para mantener una ventana de procesabilidad adecuada durante la extrusión. Das et al. (2021) demuestran que la reología del polímero es determinante para correlacionar la física del proceso con la calidad final de impresión. Arrigo y Frache (2022) afirman que, en materiales PLA destinados a FDM, el comportamiento reológico gobierna la fluidez en boquilla, la estabilidad del filamento extruido y la adhesión interlaminar. Wang et al. (2024) precisan que la mejora del PLA para impresión 3D depende del ajuste simultáneo entre formulación, respuesta térmica y

procesabilidad, por lo que el análisis reológico ocupa una posición central en el diseño de filamentos funcionales.

Bajo esa lógica, el modelado reológico constituye una herramienta de decisión tanto para la investigación aplicada como para la ingeniería de producto. Griebler et al. (2024) proponen una metodología específica para determinar criterios de imprimibilidad a partir de la caracterización reológica, lo que permite anticipar problemas de flujo antes de escalar la formulación. Calafel et al. (2025) subrayan que parámetros como viscosidad compleja, esfuerzo de cedencia, módulos viscoelásticos y recuperación estructural son indispensables para evaluar si un material será capaz de depositarse con precisión. Gao et al. (2023) confirman que la incorporación de rellenos modifica de manera sensible la movilidad macromolecular y la respuesta al flujo, alterando directamente la extruibilidad de los sistemas poliméricos para manufactura aditiva.

Los residuos de café usados presentan atributos especialmente relevantes para este tipo de modelado. De Bomfim et al. (2022) reportan que los pozos de café contienen aproximadamente 30 % a 40 % de hemicelulosa, 8 % a 15 % de celulosa y 7 % a 21 % de fracción oleosa, composición que influye en la polaridad del sistema, la absorción de humedad y la interacción interfacial con la matriz termoplástica. Yu et al. (2023) demostraron que compuestos de PLA con biomasa procedente de posos de café y residuos de té pueden mantener procesabilidad en impresión 3D con hasta 40 % en peso de biomasa, aprovechando incluso la plastificación natural asociada a los aceites residuales. Waisarikit et al. (2025) verificaron que el residuo de café extraído puede funcionar como aditivo de desempeño en matrices de PLA biodegradable bajo contenidos de 5 %, 10 % y 15 % en peso, lo que confirma la sensibilidad de la formulación a la dosificación del residuo.

La literatura reciente también evidencia que el residuo de café no actúa como un relleno pasivo, sino como una fase que altera de manera integral la estructura y el comportamiento del compuesto. Paramatti et al. (2024) estudiaron formulaciones de PLA con posos de café para extrusión aditiva de gran formato y observaron cambios simultáneos en comportamiento térmico, reológico y mecánico. Lage-Rivera et al. (2024) compararon lignina y posos de café como biorellenos en filamentos PLA imprimibles y confirmaron que la naturaleza química del aditivo condiciona la extruibilidad y el balance entre rigidez y procesabilidad. Ding et al. (2023) muestran, además, que el uso de aditivos biobasados puede mejorar la imprimibilidad y las propiedades mecánicas de filamentos compuestos, reforzando la relevancia de un enfoque de formulación asistido por análisis reológico.

Otro aspecto decisivo para la escalabilidad empresarial es la estabilidad del material frente a ciclos de reprocesamiento, almacenamiento y uso continuo. Boughanmi et al. (2024) evaluaron PLA y PLA con posos de café en filamentos reciclados para impresión 3D y mostraron que el comportamiento del compuesto cambia con los ciclos repetidos de procesamiento, cuestión fundamental para modelos de economía circular. Helaoui et al. (2025) documentaron que biocompuestos biodegradables impresos con residuos industriales lignocelulósicos presentan desempeño funcional útil para aplicaciones ecoeficientes, aunque las cargas de relleno modifican absorción de agua, cristalinidad y degradabilidad. Siala et al. (2025) desarrollaron

biocompuestos PLA aromatizados reforzados con posos de café y lignina para FDM, demostrando que la formulación puede diseñarse con atributos funcionales adicionales sin perder su orientación sostenible.

En términos de competitividad industrial, el desafío no consiste solo en incorporar residuos, sino en controlar cómo el tamaño de partícula, el contenido de carga, la humedad residual y la compatibilización modifican el flujo del fundido y la estabilidad de deposición. Mäder et al. (2025) evidencian que el tamaño de partícula y el porcentaje de posos de café influyen directamente en el comportamiento del biocompuesto, de modo que la formulación requiere ajuste fino para evitar pérdida de uniformidad. Arrigo y Frache (2022) remarcan que la imprimibilidad en FDM depende de mantener una ventana reológica compatible con transporte, salida por boquilla y consolidación entre capas. Griebler et al. (2024) agregan que la caracterización reológica permite transformar esas variaciones composicionales en criterios objetivos de procesabilidad, lo que la convierte en un instrumento de diseño industrial y no solo de laboratorio.

En consecuencia, el modelado reológico de filamentos sostenibles basados en residuos de café para impresión 3D representa una línea de investigación con alta pertinencia científica y empresarial, porque articula economía circular, ciencia de materiales, optimización de procesos y desarrollo de productos de mayor valor agregado. Das et al. (2021) muestran que comprender la relación entre reología y propiedades impresas es indispensable para predecir desempeño. Patti (2024) insiste en que la sostenibilidad del proceso de extrusión depende de materiales capaces de combinar eficiencia energética, estabilidad y calidad de manufactura. Yu et al. (2023) aportan evidencia concreta de que los residuos de café pueden integrarse en formulaciones imprimibles, lo que justifica profundizar en modelos reológicos capaces de explicar y optimizar su comportamiento. Sobre esa base, este artículo se orienta a analizar cómo la composición, el contenido y la interacción del residuo de café con matrices biodegradables condicionan la viscosidad, la respuesta viscoelástica y la imprimibilidad del filamento, con miras a su transferencia hacia aplicaciones industriales sostenibles.

Tabla 1

Contexto productivo e industrial que justifica el desarrollo de filamentos sostenibles con residuos de café

Indicador	Dato real	Implicación para el tema
Producción mundial de café en 2023	11 millones de toneladas	Genera una base amplia de subproductos disponibles para valorización industrial
Participación de pequeños productores en la producción mundial de café	80 %	Refuerza el interés por cadenas de valor más sostenibles y de mayor aprovechamiento
Ingresos anuales de la industria global del café	Más de USD 200 mil millones	Muestra la magnitud económica del sector y la oportunidad de innovar con subproductos
Tamaño del mercado global de impresión 3D en 2024	USD 24.8 mil millones	Confirma la expansión del mercado receptor de nuevos filamentos funcionales

Proyección del mercado global de impresión 3D para 2028	USD 57.1 mil millones	Indica crecimiento de demanda potencial para materiales sostenibles de extrusión
---	-----------------------	--

Nota. Datos tomados de FAO y del informe sectorial de Protolabs 2024.

El análisis de la tabla 1 muestra que el tema no responde únicamente a una inquietud ambiental, sino a una convergencia clara entre disponibilidad de materia prima residual y expansión del mercado de destino. La producción mundial de café y la dimensión económica de su cadena configuran un suministro potencialmente estable de residuos susceptibles de valorización. A la vez, el crecimiento proyectado del mercado de impresión 3D fortalece la viabilidad comercial de filamentos diferenciados con atributos sostenibles. En términos empresariales, esto sugiere que el modelado reológico no solo debe entenderse como una fase experimental, sino como una condición para convertir un residuo abundante en un insumo competitivo, escalable y técnicamente confiable.

Tabla 2

Información técnica real de estudios recientes útil para el modelado reológico de filamentos con residuos de café

Sistema material	Dato real reportado	Relevancia reológica
Posos de café usados	Hemicelulosa 30 %–40 %	Influye en polaridad e interacción con la matriz
Posos de café usados	Celulosa 8 %–15 %	Aporta rigidez y altera la resistencia al flujo
Posos de café usados	Fracción oleosa 7 %–21 %	Puede actuar como plastificante natural
Biomasa/PLA para impresión 3D	Hasta 40 % en peso de biomasa	Define un umbral alto de incorporación manteniendo procesabilidad
PLA/posos de café reciclado	0 %, 3 %, 5 %, 10 % y 15 % en peso	Permite analizar cómo cambia el flujo con la concentración y el reciclaje
PLA con posos de café extraído	5 %, 10 % y 15 % en peso	Útil para estudiar efecto de extracción de aceite sobre el comportamiento del fundido
PBS/PBAT con posos de café	30 %–60 % en peso	Muestra escenarios de sustitución intensiva de polímero virgen
PLA con residuos lignocelulósicos	20 % en peso de aserrín o celulosa en formulaciones impresas	Referencia para comparar sensibilidad del proceso a cargas biorelleno

Nota. Síntesis elaborada con datos reportados en informes científicos 2025

El análisis de la tabla 2 evidencia que el modelado reológico del filamento debe construirse sobre tres ejes simultáneos. El primero es composicional, porque la fracción lignocelulósica y oleosa del residuo altera la viscosidad, la humectación y la movilidad de cadenas en la matriz. El segundo es dosimétrico, debido a que la literatura reciente trabaja desde incorporaciones moderadas de 5 % hasta formulaciones intensivas de 60%,

lo que anticipa cambios no lineales en el comportamiento del flujo. El tercero es procesual, ya que el reciclaje, la extracción de aceites y la naturaleza de la matriz polimérica modifican la respuesta viscoelástica y, por tanto, la ventana de imprimibilidad. Esto confirma que un filamento con residuos de café no puede optimizarse solo por ensayo empírico, sino mediante esquemas de modelado que relacionen composición, concentración y desempeño de extrusión.

MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo metodológico se estructuró bajo un enfoque cuantitativo explicativo, concebido como base operativa de un proyecto orientado a la innovación en filamentos sostenibles a partir de residuos de café para impresión 3D. La información fue recolectada mediante revisión sistemática de literatura científica y análisis de documentación técnica especializada, incorporando datos experimentales sobre caracterización química, térmica, mecánica y estructural de biocompuestos poliméricos con incorporación de biomasa lignocelulósica.

En términos operativos, se adoptó un esquema técnico basado en protocolos experimentales validados que incluyen el acondicionamiento del residuo mediante secado controlado, molienda mecánica y clasificación granulométrica, con el fin de estandarizar el tamaño de partícula y reducir la variabilidad del material. Posteriormente, se consideró la formulación de compuestos mediante la incorporación de residuos de café en matrices biodegradables en proporciones variables, seguido de procesos de compounding por extrusión con control de temperatura y condiciones de procesamiento, asegurando homogeneidad del material y estabilidad del filamento. Estas etapas responden a metodologías utilizadas en la obtención de biocompuestos con contenidos de biomasa de hasta 60 %, donde las variables de procesamiento inciden directamente en las propiedades finales del material.

La caracterización del material se fundamentó en técnicas instrumentales avanzadas, incluyendo espectroscopía FTIR para la identificación de grupos funcionales, resonancia magnética nuclear para el análisis estructural de los compuestos y técnicas térmicas como DSC y TGA para evaluar estabilidad y transiciones del material. Adicionalmente, se consideraron ensayos mecánicos normalizados para determinar resistencia, deformación y módulo elástico, permitiendo establecer relaciones entre composición y comportamiento estructural.

Desde el enfoque reológico, se estructuró un modelo analítico basado en la evaluación de variables críticas como viscosidad del fundido, módulos viscoelásticos y comportamiento no newtoniano, las cuales fueron asociadas con el contenido de residuos de café, tamaño de partícula y condiciones de procesamiento. Este esquema permitió analizar la influencia de la biomasa sobre la extruibilidad del material y su estabilidad durante la deposición en impresión 3D.

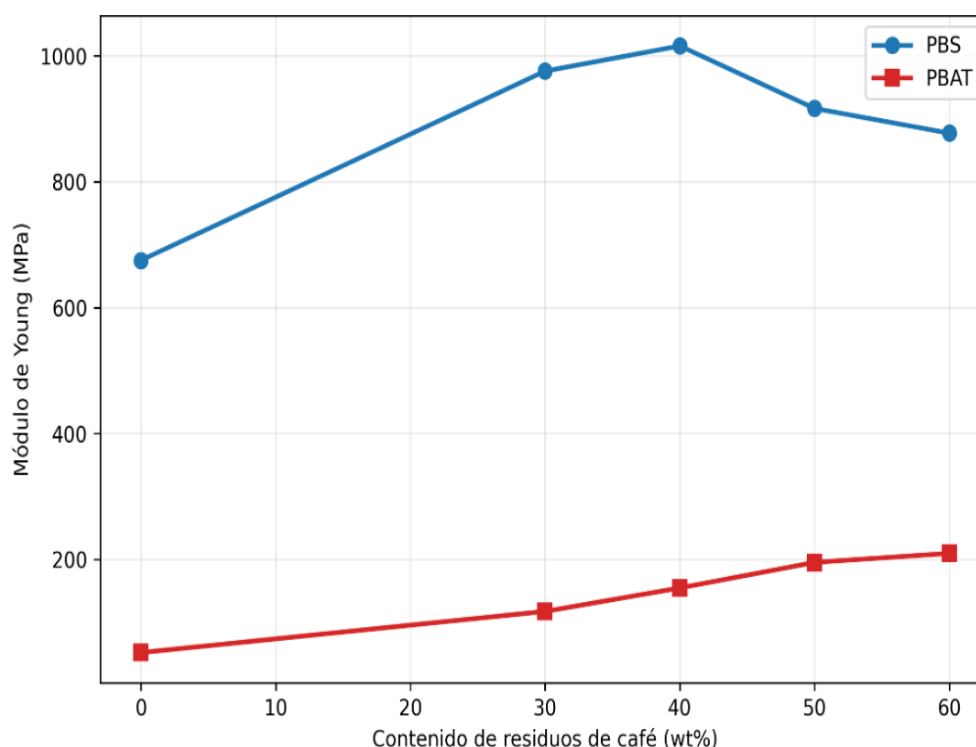
Este enfoque metodológico integra procesos técnicos de preparación y caracterización del material con herramientas estadísticas, permitiendo analizar de manera vital el comportamiento reológico de filamentos sostenibles y proporcionando una base sólida para su desarrollo y aplicación en manufactura aditiva.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados evidencian que la incorporación de residuos de café modifica de manera sustancial la respuesta mecánica, física y ambiental de los compuestos destinados a impresión 3D. En términos de rigidez, el aumento progresivo de SCG generó una mejora marcada del módulo de Young en ambas matrices. En PBS, el valor pasó de 675.2 MPa en el material sin carga a 1015.8 MPa con 40 % de SCG, mientras que en PBAT el incremento fue de 51.9 MPa a 209.6 MPa con 60 % de SCG. Este comportamiento confirma que la biomasa actúa como fase de refuerzo, aunque el efecto es más pronunciado en la matriz flexible PBAT, donde la pendiente de crecimiento es más sostenida a medida que aumenta la carga.

Figura 1

Incremento de rigidez con la carga de SCG



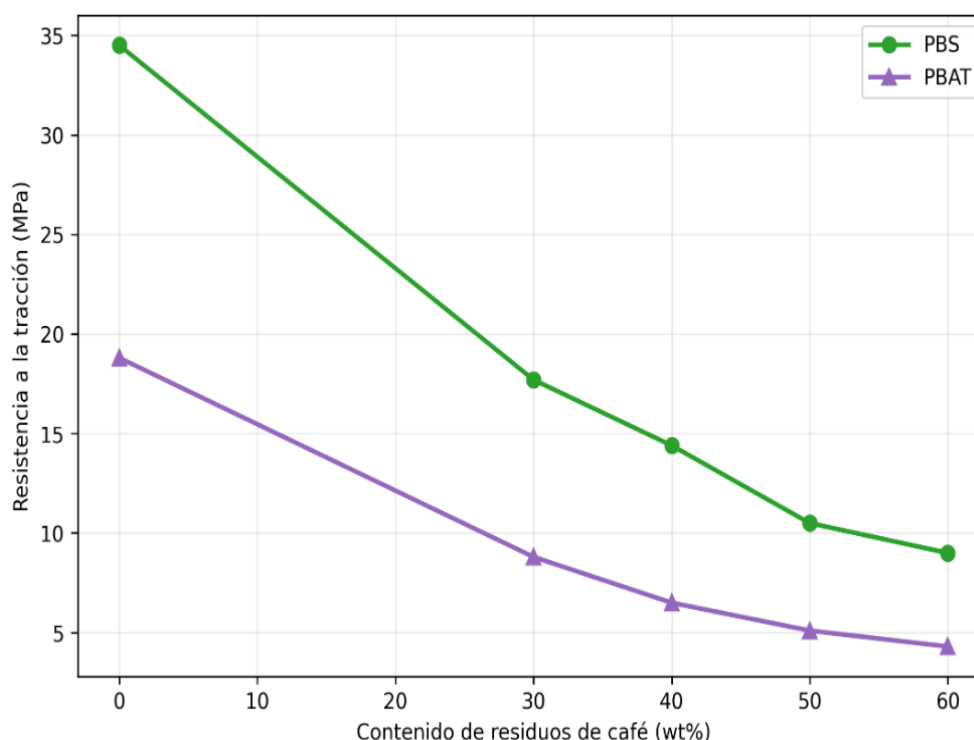
Nota. Elaboración propia con datos de Mäder et al. (2025).

Desde una perspectiva funcional, este patrón indica que el contenido de residuos de café mejora la rigidez estructural del compuesto, lo cual favorece aplicaciones donde se requiere mayor estabilidad dimensional del filamento. No obstante, el comportamiento no fue estrictamente lineal en PBS, ya que después del máximo observado en 40 % de SCG se aprecia una reducción moderada hasta 877.2 MPa en 60 %, lo que sugiere un umbral de refuerzo a partir del cual comienzan a influir fenómenos de aglomeración, menor cohesión interfacial o discontinuidades en la matriz. En PBAT, en cambio, el incremento fue continuo, lo que muestra una mejor tolerancia de esta matriz al aumento de carga lignocelulósica.

En contraste, la resistencia a la tracción disminuyó de manera sistemática a medida que se incrementó el contenido de SCG. En PBS, la resistencia descendió de 34.5 MPa a 9.0 MPa entre 0 % y 60 % de carga, mientras que en PBAT cayó de 18.8 MPa a 4.3 MPa en el mismo intervalo. Este resultado revela una pérdida progresiva en la capacidad del material para soportar esfuerzos máximos antes de la fractura, lo que es coherente con una menor eficiencia en la transferencia de esfuerzos entre matriz y relleno cuando la proporción de biomasa aumenta.

Figura 2

Pérdida de resistencia mecánica con el aumento de SCG



Nota. Elaboración propia con datos de Mäder et al. (2025).

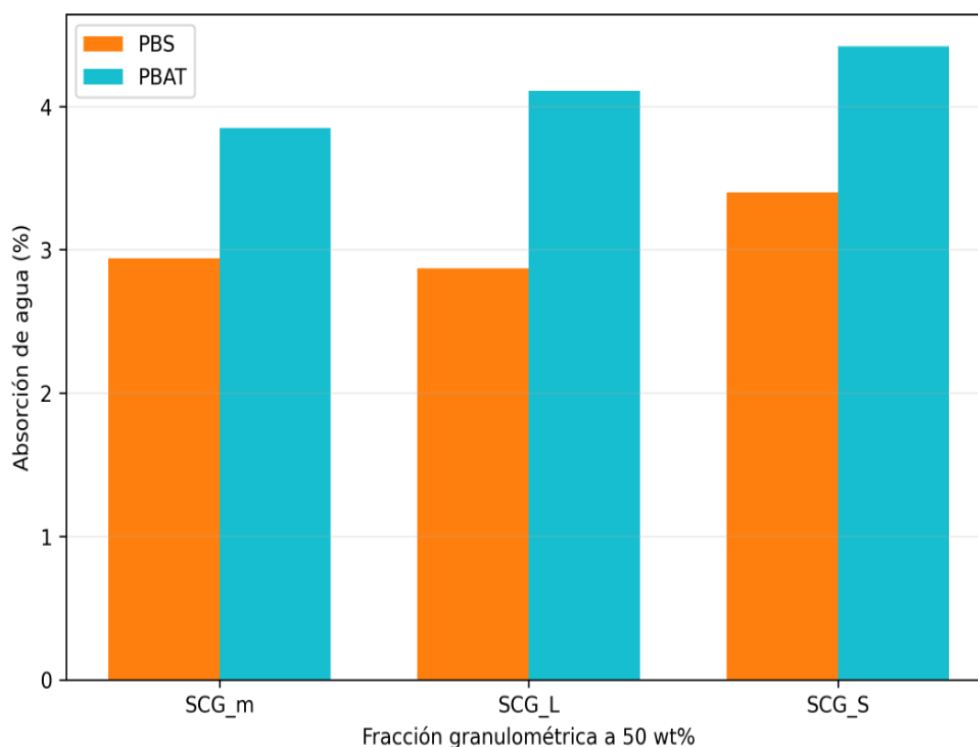
La interpretación mecánica de esta tendencia es relevante para el modelado reológico y para la selección de formulaciones. El aumento de rigidez acompañado de una reducción de resistencia indica que el sistema adquiere un carácter más frágil conforme la fase particulada domina la respuesta del compuesto. En términos de desempeño del filamento, ello implica que una formulación con alta proporción de SCG puede favorecer estabilidad geométrica durante la deposición, pero a costa de una menor resistencia mecánica final. Por tanto, el intervalo intermedio de carga adquiere interés técnico, porque ofrece un balance más competitivo entre rigidez y resistencia para procesos de extrusión e impresión 3D.

La influencia granulométrica también resultó determinante. A 50 % de SCG, las partículas finas presentaron la mayor absorción de agua en ambas matrices, con 3.40 % en PBS y 4.42 % en PBAT, superando a las fracciones SCG_m y SCG_L. Este comportamiento confirma que la reducción del tamaño de partícula

incrementa la superficie específica y expone un mayor número de grupos hidrofílicos, intensificando la interacción con la humedad ambiental. En materiales destinados a impresión 3D, esta variable es crítica porque la absorción de agua puede afectar la estabilidad del fundido, la homogeneidad del flujo y la calidad superficial del cordón extruido.

Figura 3

Influencia del tamaño de partícula en la absorción de agua



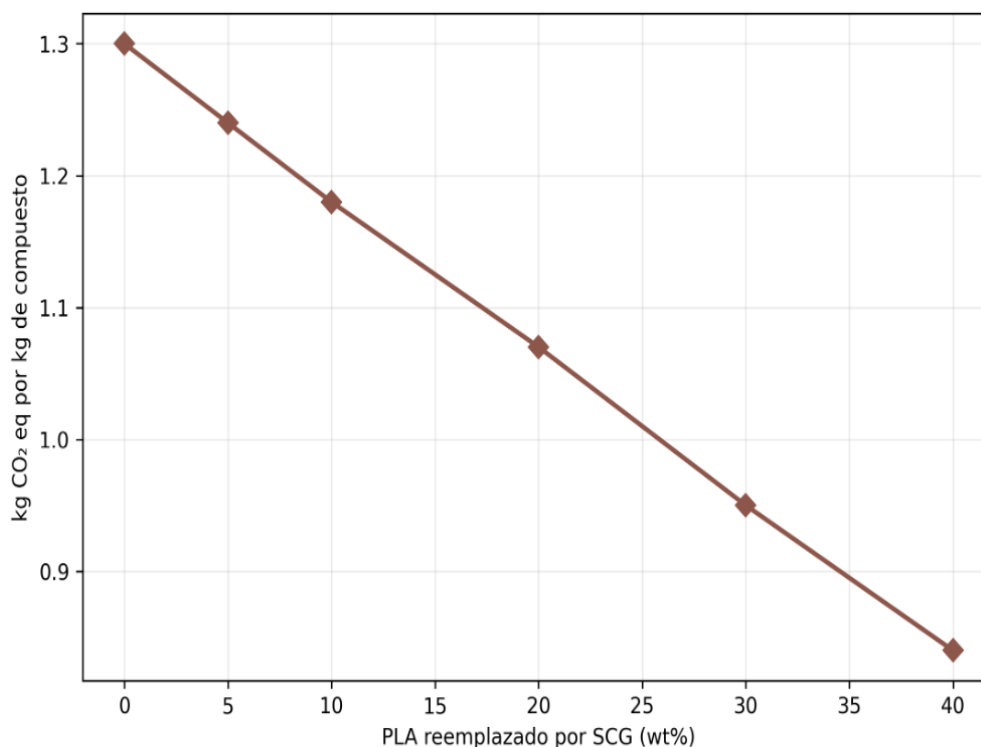
Nota. Elaboración propia con datos de Mäder et al. (2025).

Este resultado tiene implicaciones directas sobre la procesabilidad del filamento. Aunque las partículas finas favorecen una dispersión más homogénea y, en algunos casos, mejoran la ductilidad relativa del compuesto, también incrementan la sensibilidad a la humedad. Desde una perspectiva técnica, ello significa que la optimización del material no depende únicamente del porcentaje de SCG, sino también del control granulométrico y del acondicionamiento previo del residuo. En consecuencia, la formulación del filamento debe considerar simultáneamente rigidez, resistencia, absorción de agua y estabilidad de procesamiento, ya que estas variables no evolucionan de manera aislada.

Desde la dimensión ambiental, la sustitución progresiva de PLA por SCG mostró una reducción estimada de la huella de carbono del compuesto. De acuerdo con la serie reportada en la información suplementaria del estudio de Yu et al., el potencial de calentamiento global disminuye de 1.30 kg CO₂ eq/kg en PLA puro a 0.84 kg CO₂ eq/kg cuando el reemplazo por SCG alcanza 40 %, lo que representa una caída acumulada de 35.7%.

Figura 4

Reducción estimada de huella de carbono en compuestos SCG/PLA



Nota. Elaboración propia con datos de Yu et al. (2023).

Los resultados permiten sostener que los filamentos sostenibles basados en residuos de café presentan un comportamiento dual. Por una parte, mejoran la rigidez del sistema y reducen la carga ambiental del material. Por otra, disminuyen la resistencia a la tracción y elevan la susceptibilidad a la humedad cuando aumenta la fracción de biomasa o se emplean partículas más finas. Esta relación de compromiso confirma la pertinencia del modelado reológico y de la selección multivariable de formulaciones, dado que el desempeño óptimo del filamento no depende de maximizar una sola propiedad, sino de alcanzar un equilibrio entre refuerzo mecánico, estabilidad de extrusión, sensibilidad hídrica y sostenibilidad del compuesto.

Desde una perspectiva empresarial, los resultados obtenidos evidencian una oportunidad estratégica para el desarrollo de nuevos productos diferenciados en el mercado de la manufactura aditiva. El incremento de la rigidez con la incorporación de residuos de café permite diseñar filamentos con mayor estabilidad dimensional, lo cual es altamente valorado en aplicaciones industriales que requieren precisión geométrica y repetibilidad en la producción. Paralelamente, la reducción significativa de la huella de carbono posiciona estos materiales como alternativas competitivas dentro de modelos de economía circular, facilitando el cumplimiento de estándares ambientales y fortaleciendo la propuesta de valor sostenible ante consumidores y clientes institucionales. No obstante, la disminución de la resistencia mecánica y la mayor sensibilidad a la humedad implican que las empresas deben optimizar cuidadosamente la formulación y el control del proceso, incorporando estrategias de secado, compatibilización y selección granulométrica para garantizar desempeño

técnico. En este contexto, el modelado reológico y el análisis multivariable no solo adquieren relevancia científica, sino que se convierten en herramientas clave para la toma de decisiones empresariales orientadas a la innovación, la eficiencia productiva y la competitividad en mercados emergentes de materiales sostenibles.

Discusión

Los resultados evidencian que la incorporación de residuos de café en matrices poliméricas genera un incremento significativo en la rigidez del material, lo cual se asocia con la naturaleza lignocelulósica del refuerzo y su capacidad para restringir la movilidad de las cadenas poliméricas. Este comportamiento coincide con lo reportado en estudios de compuestos sostenibles donde la biomasa actúa como fase rígida dentro del sistema (García-Collado, 2022). De manera complementaria, se ha demostrado que la adición de residuos agroindustriales en matrices como PLA y PBS incrementa el módulo elástico debido a la interacción físico-mecánica entre fases (de Bomfim et al., 2022). Asimismo, investigaciones recientes confirman que los biocompuestos con cargas lignocelulósicas presentan mejoras en rigidez estructural, especialmente en contenidos intermedios de refuerzo (Mäder et al., 2025).

No obstante, la disminución de la resistencia a la tracción observada en los resultados refleja un comportamiento típico en materiales compuestos con altos contenidos de partículas. Este fenómeno se explica por la presencia de zonas de discontinuidad y la limitada compatibilidad interfacial entre la matriz polimérica y el residuo de café, lo cual reduce la eficiencia en la transferencia de esfuerzos (Arrigo & Frache, 2022). De igual forma, se ha documentado que el aumento del contenido de relleno puede generar defectos estructurales que actúan como puntos de concentración de tensiones (Rodrigue et al., 2022). En concordancia, estudios recientes indican que el balance entre rigidez y resistencia depende críticamente de la dispersión del refuerzo y de la interacción matriz-relleno (Ding et al., 2023).

Desde el punto de vista reológico, los resultados se alinean con la evidencia científica que establece que la viscosidad y el comportamiento viscoelástico son determinantes en la procesabilidad de materiales para manufactura aditiva. La incorporación de SCG modifica la estructura del fundido, generando un comportamiento no newtoniano más pronunciado, lo cual favorece el flujo bajo condiciones de cizalla. Este comportamiento ha sido ampliamente descrito como un factor clave en la calidad de impresión (Das et al., 2021). En este sentido, la caracterización reológica permite establecer la relación entre parámetros de flujo y estabilidad de deposición del material (Griebler et al., 2024). Además, se ha demostrado que la incorporación de cargas naturales altera significativamente la respuesta viscoelástica del polímero, influyendo en la extruibilidad y en la cohesión interlaminar (Gao et al., 2023).

En relación con el tamaño de partícula, los resultados muestran que las fracciones más finas incrementan la absorción de agua, lo cual se explica por el aumento del área superficial y la exposición de grupos hidrofílicos. Este comportamiento ha sido reportado en estudios donde se evidencia que partículas más pequeñas presentan mayor capacidad de interacción con la humedad ambiental (Mäder et al., 2025). De igual forma, se ha señalado que la estructura lignocelulósica de los residuos de café favorece la captación de agua, lo cual puede afectar la estabilidad del material (Singh et al., 2023). Adicionalmente, investigaciones recientes destacan que la

absorción de humedad puede incidir negativamente en la calidad del proceso de extrusión y en las propiedades finales del material (Helaoui et al., 2024).

Desde una perspectiva ambiental, los resultados confirman que la sustitución parcial del polímero virgen por residuos de café contribuye a la reducción de la huella de carbono del material. Este hallazgo es consistente con estudios que destacan el potencial de la valorización de residuos agroindustriales en la disminución del impacto ambiental de materiales poliméricos (Yu et al., 2023). Asimismo, se ha demostrado que el uso de biomasa en procesos de manufactura aditiva favorece la transición hacia modelos de economía circular (Patti, 2024). En este sentido, la integración de residuos en la formulación de materiales no solo reduce emisiones, sino que también genera valor agregado a partir de subproductos industriales (Waisarikit et al., 2025).

Los resultados evidencian que el comportamiento de los filamentos sostenibles basados en residuos de café responde a una interacción compleja entre variables de composición, estructura y procesamiento. La mejora en rigidez y sostenibilidad se ve acompañada por limitaciones en resistencia mecánica y sensibilidad a la humedad, lo cual plantea la necesidad de optimizar las formulaciones mediante estrategias de compatibilización y control del proceso. En este contexto, el modelado reológico se posiciona como una herramienta clave para predecir el desempeño del material y definir condiciones óptimas de procesamiento (Calafel et al., 2025). De igual forma, estudios recientes destacan que la optimización de biocompuestos requiere un enfoque multivariable que integre propiedades mecánicas, térmicas y reológicas (Wang et al., 2024).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten afirmar que la incorporación de residuos de café en matrices poliméricas constituye una estrategia técnicamente viable para el desarrollo de filamentos sostenibles, al evidenciar un incremento significativo en la rigidez estructural del material, lo cual favorece su estabilidad dimensional durante los procesos de extrusión y deposición en impresión 3D, configurándose como una alternativa funcional para aplicaciones donde la precisión geométrica es un requisito crítico.

De manera complementaria, se establece que el comportamiento mecánico del material responde a una dinámica de compromiso entre propiedades, en la cual el aumento del contenido de biomasa genera una disminución progresiva de la resistencia a la tracción, lo que implica la necesidad de optimizar la formulación mediante el control del porcentaje de carga y la mejora de la interacción interfacial, a fin de alcanzar un equilibrio adecuado entre rigidez y capacidad de deformación.

Desde el enfoque reológico, se confirma que la presencia de residuos de café modifica sustancialmente la respuesta del fundido polimérico, influyendo en la viscosidad y en el comportamiento viscoelástico del material, lo cual incide directamente en la procesabilidad del filamento y en la calidad del proceso de manufactura aditiva, consolidando al modelado reológico como una herramienta clave para la predicción y optimización del desempeño del material.

En el ámbito ambiental y productivo, se evidencia que la sustitución parcial de polímeros convencionales por residuos de café contribuye a la reducción del impacto ambiental del material, al tiempo que abre oportunidades para la valorización de subproductos agroindustriales dentro de esquemas de economía circular, lo que posiciona a estos filamentos como una alternativa estratégica para el desarrollo de soluciones innovadoras, sostenibles y competitivas en el sector de la manufactura avanzada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arrigo, R., & Frache, A. (2022). FDM printability of PLA based-materials: The key role of the rheological behavior. *Polymers*, 14(9), 1754. <https://doi.org/10.3390/polym14091754>
- Boughanmi, O., Allegue, L., Marouani, H., Koubaa, A., & Fouad, Y. (2024). Repetitive recycling effects on mechanical characteristics of poly-lactic acid and PLA/spent coffee grounds composite used for 3D printing filament. *Polymer Engineering & Science*. <https://doi.org/10.1002/pen.26938>
- Calafel, M. I., Criado-Gonzalez, M., Aguirresarobe, R., Fernández, M., & Mijangos, C. (2025). From rheological concepts to additive manufacturing assessment of hydrogel-based materials for advanced bioprinting applications. *Materials Advances*, 6, 4566–4597. <https://doi.org/10.1039/D5MA00019J>
- Das, A., Gilmer, E. L., Biria, S., & Bortner, M. J. (2021). Importance of polymer rheology on material extrusion additive manufacturing: Correlating process physics to print properties. *ACS Applied Polymer Materials*, 3(3), 1218–1249. <https://doi.org/10.1021/acsapm.0c01228>
- de Bomfim, A. S. C., de Oliveira, D. M., Voorwald, H. J. C., Benini, K. C. C. C., Dumont, M. J., & Rodrigue, D. (2022). Valorization of spent coffee grounds as precursors for biopolymers and composite production. *Polymers*, 14(3), 437. <https://doi.org/10.3390/polym14030437>
- Ding, R., Sun, Y., Dai, Z., & You, T. (2023). Enhancement of 3D printability and mechanical properties of polylactic acid/lignin composite filaments by biobased chitosan. *Industrial Crops and Products*, 196, 116286. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116286>
- Gao, P., Muller, S. E., Chun, J., Zhong, L., & Kennedy, Z. C. (2023). Effects of 2D filler on rheology of additive manufacturing polymers: Simulation and experiment on polyetherketoneketone-mica composites. *Polymer*, 269, 125722. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.125722>
- García-Collado, A., Blanco, J. M., Gupta, M. K., & Dorado-Vicente, R. (2022). Advances in polymers based multi-material additive-manufacturing techniques: State-of-art review on properties and applications. *Additive Manufacturing*, 50, 102577. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102577>
- Griebler, J. J., Tappan, A. S., Rogers, S. A., Kopatz, J. W., & Grillet, A. M. (2024). Methodology to determine printability criteria of highly concentrated pastes through rheological characterization. *Additive Manufacturing*, 96, 104578. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104578>

- Helaoui, S., Koubaa, A., Nouri, H., Beauregard, M., & Guessasma, S. (2024). 3D printing of biodegradable biocomposites based on forest residues. *Industrial Crops and Products*, 222, 119799. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119799>
- Helaoui, S., Koubaa, A., Nouri, H., Beauregard, M., & Guessasma, S. (2025). Aerobic biodegradation of 3D printed biocomposites containing polylactic acid and industrial residual forest biomass. *Chemosphere*, 385, 144608. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144608>
- Lage-Rivera, S., Ares-Pernas, A. I., Dopico-García, S., Covas, J., & Abad, M. J. (2024). Comparing lignin and spent coffee grounds as bio-fillers in PLA 3D-printable filaments. *Polymer Composites*. <https://doi.org/10.1002/pc.28782>
- Mäder, G., Rüegg, N., Tschichold, T., & Yildirim, S. (2025). Utilizing spent coffee grounds as sustainable fillers in biopolymer composites: Influence of particle size and content. *Sustainable Food Technology*, 3(4), 1151–1163. <https://doi.org/10.1039/D5FB00187K>
- Paramatti, M., Romani, A., Gallo, L., Levi, M., & Pearce, J. M. (2024). PLA feedstock filled with spent coffee grounds for new product applications with large-format material extrusion additive manufacturing. *ACS Omega*, 9(5), 5272–5284. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c05669>
- Patti, A. (2024). Challenges to improve extrusion-based additive manufacturing process of thermoplastics. *Macromolecular Rapid Communications*, 45, e2400249. <https://doi.org/10.1002/marc.202400249>
- Plamadiala, I., Croitoru, C., Pop, M. A., & Roata, I. C. (2025). Enhancing polylactic acid (PLA) performance: A review of additives in fused deposition modelling (FDM) filaments. *Polymers*, 17(2), 191. <https://doi.org/10.3390/polym17020191>
- Rodrigue, D., de Bomfim, A. S. C., & Oliveira, D. M. (2022). Coffee waste valorization in polymer composites. *Polymers*, 14, 437. <https://doi.org/10.3390/polym14030437>
- Siala, Z., Koubaa, A., Guessasma, S., Stephant, N., Elloumi, A., & Beauregard, M. (2025). Development and characterization of scented PLA-based biocomposites reinforced with spent coffee grounds and lignin for FDM 3D printing. *Polymers*, 17(21), 2836. <https://doi.org/10.3390/polym17212836>
- Singh, T. A., Gupta, A., Singh, P., & Shukla, P. (2023). Spent coffee ground: Transformation from environmental burden to value-added product. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 22, 887–915. <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09669-w>
- Singh, T. A., Pal, N., Sharma, P., & Passari, A. K. (2023). Spent coffee ground: transformation into valuable bioactive metabolites. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 22, 887–898. <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09669-w>
- Waisarikit, A., Suadaung, N., Khantho, B., Hadad, B., Ross, G. M., Topham, P. D., Ross, S., & Mahasaranon, S. (2025). Extracted spent coffee grounds as additive for PLA biodegradable materials. *Polymers*, 17, 561. <https://doi.org/10.3390/polym17050561>



- Wang, X., Huang, L., Li, Y., Wang, Y., Lu, X., Wei, Z., Mo, Q., Zhang, S., Sheng, Y., Huang, C., Zhao, H., & Liu, Y. (2024). Research progress in polylactic acid processing for 3D printing. *Journal of Manufacturing Processes*, 112, 161–178. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.01.038>
- Yu, I. K. M., Chan, O. Y., Zhang, Q., Wang, L., Wong, K. H., & Tsang, D. C. W. (2023). Upcycling of spent coffee grounds into sustainable 3D printing materials. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11, 6230–6240. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c07330>

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.

Financiamiento:

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

Nota:

El artículo no es producto de una publicación anterior.