

Fabricación de Filamento de PLA para Impresión 3D Reforzado con Bagazo de Cebada Malteada

Mónica Yolotzin Velasco-Gómez^a, Ramón Valdivia-González^a, Leonardo Chávez-Guerrero^{a*}

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Pedro de Alba SN, Niños Héroes, Ciudad Universitaria, 66455 San Nicolás de los Garza, N.L.
leonardo.chavezgr@uanl.edu.mx

Resumen: La impresión 3D ha emergido como un elemento de transformación para sectores como la manufactura y desarrollo de prototipos/productos, permitiendo a su vez la personalización de modelos y fabricación bajo demanda, consolidándose como una herramienta esencial para la innovación. Este estudio se enfoca en la valorización de residuos orgánicos como el bagazo de cebada malteada, un material lignocelulósico, para la fabricación de biocompositos aptos para impresión 3D. La metodología propuesta abarca el pretratamiento y pulverización de la materia prima, su incorporación en una matriz de ácido poliláctico (PLA) mediante extrusión, y la optimización de los parámetros de fabricación del filamento. La caracterización se orienta en el estudio de su composición mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), identificando los principales grupos funcionales de la maltosa presentes en la matriz, como el grupo carbonilo en 1750 cm^{-1} y vibraciones de estiramiento de los enlaces (C-O) en el grupo éster en 1083 cm^{-1} , característicos del PLA, así como vibraciones de estiramiento de los enlaces (C-O) entre 1000 cm^{-1} y 1200 cm^{-1} , típicos de polisacáridos como la cebada. Adicionalmente, con la microscopía electrónica de barrido (MEB), se obtuvieron imágenes de la morfología superficial, proporcionando una vista clara de las nanopartículas de proteínas integradas en el PLA, con un tamaño entre 40-80 nm, confirmando su presencia en la matriz polimérica. Este trabajo busca ofrecer soluciones innovadoras para la gestión de residuos y la fabricación sostenible, promoviendo los principios de la economía circular y reduciendo el impacto ambiental de la industria y el consumo.

Introducción.

La industria cervecera en México es un motor económico, manteniendo su primer puesto como la bebida mexicana más producida durante 2025. Según el Grupo Consultor de Mercados Agrícolas (GCMA), durante el periodo de Enero a Julio del 2025, México logró exportar alrededor de 4,014 millones de dólares (mdd) en cerveza de malta, convirtiéndose en el producto más comercializado del sector agroalimentario, quedando por encima de otros productos como el aguacate, el tequila, el tomate y la carne de bovino.

Estados como Guanajuato, Hidalgo, Tlaxcala, Puebla, Chihuahua y Nuevo León, son los sectores principales agricultores de cebada, aumentando progresivamente su producción con el paso de los años gracias a la gran variedad de cervezas “artesanales” que existen en la actualidad.

La alta variedad de productos cerveceros trae en consecuencia una problemática de residuos que se relaciona con la contaminación de suelo, aire y agua, siendo a su vez un riesgo para la salud, ya que en promedio se generan alrededor de 20kg de bagazo húmedo por cada hectolitro (100 litros) de cerveza producida. Los volúmenes masivos de subproductos (bagazo húmedo y sedimentos), los cuales, pese a ser predominantemente orgánicos, pueden provocar severos problemas ambientales y logísticos si no se logran gestionar y revalorizar de manera adecuada.

Debido a esto surge un proyecto diseñado para abordar ambos problemas de manera simultánea, promoviendo una economía circular para la resolución de problemas como la pérdida de valor proteico en los residuos cerveceros y el uso de aditivos perjudiciales con el medio ambiente en la industria de la manufactura aditiva.

Parte experimental.

Diagrama de flujo.

En la Figura 1 se muestran las cuatro fases correspondientes para la elaboración de filamento de PLA mediante la implementación de cebada malteada.



Figura 1. Diagrama de flujo de las fases más importantes para el desarrollo metodológico del proyecto.

En resumen, éstas constan de la recolección de la materia prima, pretratamiento del bagazo de cebada recolectado para hacerlo apto para el tratamiento posterior, mezcla polímero (PLA y biomasa) e impresión 3D para la obtención de prototipos y modelos funcionales o de entretenimiento.

Recolección y Pretratamiento.

El bagazo de cebada malteada recolectado (con temperatura de 60 – 80 °C) de cervecerías artesanales locales, se sometió a un proceso de separación mecánica diseñado para la estabilización inmediata y concentración proteica del bagazo de cebada; de esta forma se obtiene una fracción sólida de cascarilla fragmentada con bajo contenido de humedad y, por otro lado, una fracción semisólida que contiene almidón, proteína y maltosa.

Después, se utiliza un sistema de secado de baja energía durante 6 horas (solar-asistido, o calor residual) y, posteriormente, un pulverizador para obtención de polvos (harinas) para su posterior integración al polímero (1 min).

Mezcla Polímero.

Se adquirieron pellets de PLA puro (sin aditivos) para elaboración del polímero. Mediante un molino de bolas Simoloyer Simoloyer modelo CM20 de la empresa Zoz GmbH a 1000 rpm durante 5 min, se integró el material pulverizado previamente de la proteína/maltosa (cebada) con el polímero (pellets de PLA). Una vez integrados, los pellets pasan por un proceso de extrusión para la obtención del filamento (Figura 2) mediante un extrusor NFM modelo TEM-26SS, con un rango de temperatura de 160 °C a 200 °C.



Figura 2. Filamento de PLA-Cebada obtenido.

Impresión 3D.

Para la elaboración de pruebas y piezas funcionales, se utilizaron diversas impresoras tipo FDM para confirmar la versatilidad del material frente a diversos equipos. Entre los equipos se destacan distintos modelos de la marca Kingroon y Creality, siendo esta última la principal para el ajuste de parámetros y fabricación de impresiones (Creality Ender 3 V3). Además, para las pruebas también se implementaron distintos tipos de camas, entre ellas la original, vidrio templado y PEI flexible.

En la Figura 3 se presenta un resumen de la metodología utilizada.

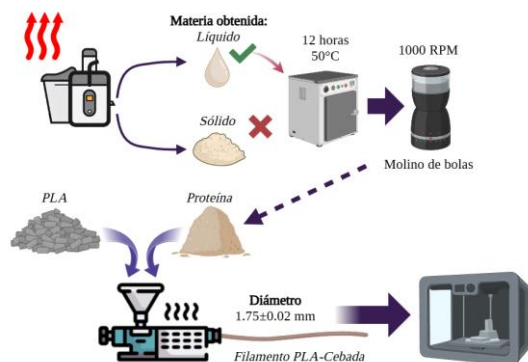


Figura 3. Esquema del proceso aplicado para la obtención de filamento de PLA-Cebada. Creado con BioRender.

Resultados y discusión.

A continuación, se muestran los resultados de ambas técnicas de caracterización utilizadas para determinar la composición química del polímero mediante la identificación de sus grupos funcionales, así como la morfología de la materia prima utilizada durante la fabricación del biocompuesto.

FTIR.

El espectro de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR) fue fundamental para confirmar la composición del biocompuesto, contrastando el Ácido Poliláctico comercial (puro) con respecto al compuesto con cebada.

El espectro superior de la Figura 4 (PLA) exhibe las señales características de los poliésteres alifáticos: la banda prominente en 1750 cm^{-1} se asigna a la vibración de estiramiento del grupo carbonilo ($\text{C}=\text{O}$), indicando el enlace éster del polímero. Las vibraciones de estiramiento del grupo C-H se localizan en 2935 cm^{-1} (CH_3 y CH), mientras que las vibraciones de flexión asimétrica y simétrica del grupo CH_3 se encuentran alrededor de 1448 cm^{-1} .

Finalmente, la banda ancha en la región de 3530 cm^{-1} corresponde a la vibración de estiramiento del grupo hidroxilo (O-H), generalmente asociada a los grupos terminales del PLA.

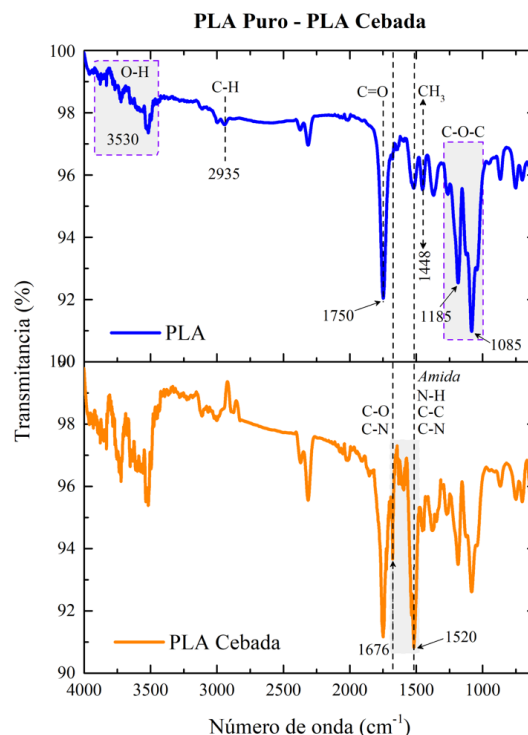


Figura 4. Espectros de FTIR mediante ATR de PLA puro y PLA-Cebada.

En el espectro de PLA Cebada (parte inferior), se mantienen todas las señales clave del PLA, lo que confirma que el polímero es la matriz principal. No obstante, se observan nuevas señales en el espectro del biocompuesto que evidencian la incorporación exitosa del polvo proteína de cebada y sus compuestos.

La señal en 1676 cm^{-1} y otra alrededor de 1520 cm^{-1} son altamente indicativas de la presencia de Amida I ($\text{C}=\text{O}$ de péptidos) y Amida II (N-H de flexión y C-N de estiramiento), respectivamente, que provienen de los componentes proteicos y la lignina presentes en la fibra de cebada.

La presencia de estas bandas en el espectro de PLA-Cebada confirma la incorporación de la materia orgánica y permite demostrar que el material afirma ser un biocompuesto con componentes proteicos (principalmente) derivados del subproducto agrícola.

MEB.

La Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) fue empleada para visualizar la estructura superficial y la morfología de los componentes extraídos de la cebada, revelando la presencia de dos fases morfológicas claramente diferenciadas.

La micrografía A de la Figura 5 presenta estructuras a escala micrométrica, caracterizadas por partículas predominantemente esféricas e irregulares que forman agregados densos y superpuestos. Esta morfología es típica de grandes gránulos de almidón o proteína de cebada que han experimentado aglomeración durante el procesamiento, lo cual es consistente con la naturaleza polimérica de estos biocomponentes.

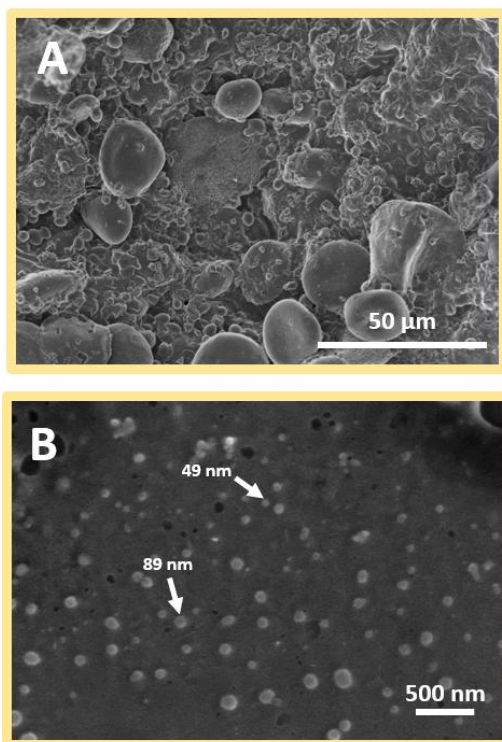


Figura 5. Micrografías MEB de la proteína integrada en la cebada (A) y (B).

Por otro lado, la micrografía B revela una morfología a escala nanométrica, en la cual se observan partículas de forma esférica y tamaño reducido, dispersas sobre un fondo

que aparenta ser una superficie continua. El análisis dimensional indica que estas nanoestructuras poseen diámetros que oscilan significativamente, como se ejemplifica con las mediciones 49 nm y 89 nm. La uniformidad en la forma y el tamaño nanométrico sugieren que esta fracción podría corresponder a compuestos de baja masa molecular como la proteína o a nano-agregados de hidrolizados, que se han autoensamblado o cristalizado en esta escala durante la preparación de la muestra.

En conjunto, las micrografías confirman la coexistencia de componentes de cebada en las escalas micro y nano, un resultado crucial para la compresión estructural de los materiales utilizados.

Impresiones.

Con el filamento obtenido se realizaron diversas pruebas con modelos como figuras complejas, llaveros y figuras, esto para comprobar la resistencia y manejo de material al imprimir, como se muestra en la Figura 6.

A su vez, se realizaron pruebas de tortura donde se obtuvieron resultados prometedores y similares al PLA puro, logrando puentes de hasta 60°, construcción de voladizos y una buena retracción del material, así como una buena precisión dimensional y tolerancia, utilizando parámetros impresión similares al PLA comercial.



Figura 6. Diversas impresiones realizadas mediante el filamento de PLA-Cebada.

Conclusiones.

Se desarrolló un filamento funcional para la manufactura aditiva FDM, teniendo propiedades de impresión similares al PLA comercial. El biocompuesto PLA Cebada demostró la viabilidad técnica de revalorizar subproductos agroindustriales para la fabricación de materiales de base biológica.

Mediante el análisis de FTIR se confirmó la integración exitosa de los componentes de la cebada en la matriz de PLA, evidenciada por la aparición de las bandas de Amida I y Amida II, las cuales son indicativas de la presencia de proteínas y lignina de la fibra.

Complementariamente, el análisis MEB reveló que la fibra de cebada incorporada presenta una morfología dual, compuesta por estructuras micrométricas agregadas (almidón) y nanoestructuras esféricas (proteína). Se concluye que el material desarrollado es un biocompuesto funcional cuya composición y diversidad morfológica de la carga de cebada sientan las bases para el estudio de sus propiedades mecánicas y su aplicación potencial en procesos de manufactura aditiva y economía circular.

La presencia de proteína en el PLA-Cebada ofrece una nueva oportunidad para analizar su comportamiento al reducir la contaminación por colorantes.

Agradecimientos.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) por las becas otorgadas y al doctor Leonardo Chávez Guerrero por su apoyo y guía para la elaboración de este artículo.

Referencias.

[1] Kharfi, F.; Benkahila, K.; Boukhessaim, F.; Betka, A.; Meziri, A.; Khelfa, S.; Ghediri, N. Implementation of 3D printing and modeling technologies for the fabrication of dose boluses for external radiotherapy at the CLCC

of Sétif, Algeria. *Technology in Cancer Research & Treatment* 2024, 23, 15330338241266479.

<https://doi.org/10.1177/15330338241266479>.

[2] Thanni, Q. A.; De Boves Harrington, P.; Ajayi, O.; Walling, J.; Mahalingam, R. Rapid ATR-FTIR-Based prediction of Barley Malt quality. *ACS Food Science & Technology* 2025, 5 (4), 1338–1353. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.4c00907>.

[3] León, J. G.; Estrada-Villegas, G. M.; Olayo, R.; De Jesús Muñoz, E.; Morales-Corona, J.; Olayo-Valles, R.; Martínez-Hernández, R. C. CARACTERIZACIÓN y ESTUDIO DE LIBERACIÓN DE CURCUMINA CARGADA EN MICROFIBRAS DE ACIDO POLILACTICO. *Revista De La Facultad De Ciencias* 2020, 9 (1), 125–141. <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v9n1.81966>.

[4] Cerveceros de México. *El Libro de la Cerveza Mexicana*; Cerveceros de México: México, 2016. URL: [<https://cervecerosdemexico.com/revistas/libro-cerveza.pdf>] (<https://cervecerosdemexico.com/revistas/libro-cerveza.pdf>).

[5] Lukinac, J.; Jukić, M. Barley in the production of Cereal-Based products. *Plants* 2022, 11 (24), 3519. <https://doi.org/10.3390/plants11243519>.