

Desarrollo de productos de vida útil corta con polímeros sostenibles

A. Estrada-Monje ^{a*}, M. Maldonado-Santoyo ^a, E. A. Zaragoza-Contreras ^b, S. Alonso-Romero ^a

^a Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas, Departamento de procesos industriales y energía. Omega No. 201, Industrial Delta, León, Guanajuato, CP 37545, México

^b Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Departamento de Ingeniería y Química de Materiales. Miguel de Cervantes, No. 120, Complejo Industrial Chihuahua, Chihuahua, Chihuahua, CP 31136, México.

ABSTRACT

Scientific research is focused on solving the country's priority problems and contributing to environmental protection. In this regard, plastics have greatly contributed to making people's lives easier. However, poor management of petroleum-based plastic waste has also led to increased environmental pollution, making it necessary to establish global agreements to reduce the consumption of single-use plastics. In this context, this article focuses on the development of a biodegradable biopolymer that can be used to replace commonly used petroleum-based materials, such as polyethylene and polypropylene, among others, and that can be used to manufacture various short-life products. The biopolymer that was developed is based on the use of renewable raw materials derived from plants such as corn and cassava, through a chemical modification that allows processing using conventional plastic transformation methods, such as injection or extrusion. Prototype products were obtained that reveal the potential applications of the materials developed.

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Recibido 20 Octubre, 2025

Revisado 05 Diciembre, 2025

Aceptado 30 Diciembre, 2025

KEYWORDS

Thermoplastic starch, short shelf life, polycaprolactone, biopolymer.

Introducción

Los plásticos derivados del petróleo han contribuido a mejorar la calidad de vida de las personas gracias a su notable versatilidad, que permite la fabricación de una infinidad de productos. Sin embargo, la gestión deficiente de los residuos y la falta de una cultura de reciclaje, afectan a los diferentes ecosistemas debido a la acumulación de residuos plásticos no biodegradables. Por ello, en el informe Perspectiva Mundial de la Gestión de Residuos 2024 se evidenció que, sin un cambio radical de las sociedades desde un modelo de consumo "extraer-producir-desechar" hacia una economía circular y enfoques de cero desechos, la acumulación mundial de residuos podría crecer en dos tercios para 2050 [1]. Ante la creciente necesidad de cuidar el medio ambiente y encontrar materiales alternativos más ecológicos para la fabricación de productos de un solo uso, se ha incrementado cada vez

AUTOR DE CORRESPONDENCIA Anayansi Estrada  aestrada@ciatec.mx  Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas, Departamento de procesos industriales y energía. Omega No. 201, Industrial Delta, León, Guanajuato, CP 37545, México. Se puede acceder a los datos complementarios en línea en <https://doi.org/10.71103/eex84g59>

© 2026 Los autores. Publicado por la Asociación Mexicana en Ciencias en Soldadura, Metalurgia e Ingeniería, A.C. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>), que permite la reutilización, distribución y reproducción sin fines comerciales en cualquier medio, siempre que la obra original esté debidamente citada y no sea alterada, transformada o construida de ninguna manera. Los términos en los que se ha publicado este artículo permiten la publicación del Manuscrito Aceptado en un repositorio por parte del autor o con su consentimiento.

más la investigación y el desarrollo de polímeros biodegradables y bioplásticos [2], que, en condiciones adecuadas, se biodegradan bajo la acción microorganismos [3] en dióxido de carbono, metano, agua, biomasa y otras sustancias inocuas que se incorporan al suelo [4]. Por ejemplo, se utilizó una formulación a partir de harina de semillas, goma xantana y aceite de palma para la obtención de cucharas biodegradables como una alternativa al uso de cubiertos de plástico [5]. El almidón es la materia prima esencial para el desarrollo de mezclas y compuestos de base biológica, ya que es un biopolímero natural y abundante que proviene de maíz, yuca, papa, arroz, entre otros [6]. El almidón nativo consta de dos polisacáridos químicamente diferentes: amilosa y amilopectina [7]. El primero es un polímero lineal compuesto por unidades de glucosa unidas por enlaces (1-4) y algunos enlaces (1-6). Según Bertolini et al. [8], los almidones se diferencian entre sí por su contenido de amilosa y amilopectina, dependiendo de su origen, así también el grado de cristalinidad depende del contenido de estos dos polímeros, a mayor contenido de amilopectina, mayor cristalinidad [9]. El almidón de yuca contiene un 17 % de amilosa y un 83 % de amilopectina, mientras que el almidón de maíz contiene un 28 % de amilosa y un 72 % de amilopectina [10]. El almidón nativo tiene propiedades limitadas para algunas aplicaciones en las que se requiere cierta flexibilidad; sin embargo, al ser sometido a esfuerzos mecánicos, bajo la acción de la temperatura y en presencia de un plastificante, se puede obtener un almidón termoplástico (TPS) [11]. Un TPS se puede fundir y transformar mediante métodos de procesamiento convencionales. El plastificante rompe las fuertes interacciones intramoleculares formando enlaces de hidrógeno con el almidón, lo que resulta en plastificación [12]. El agua, el glicerol, el sorbitol y compuestos con grupos funcionales como la urea, el formaldehído, el anhídrido o la acetamida pueden ser utilizados como plastificantes [13–17]. El políácido láctico también se ha utilizado en combinación con el almidón, utilizando aceite de cáñamo modificado con anhídrido maleico como plastificante y compatibilizador para modificar las propiedades del TPS. El plastificante añadido mostró mejoras en la ductilidad y la resistencia al impacto de la mezcla [18]. El quitosano también se ha utilizado como fase dispersa en TPS, incorporándolo mediante métodos termomecánicos y sin añadir ningún compatibilizador. Se ha observado que la adición de quitosano aumenta considerablemente el módulo de Young y la resistencia a la tracción [19].

Por otro lado, la policaprolactona (PCL), un termoplástico semicristalino y biodegradable que se caracteriza por su alta flexibilidad, bajo punto de fusión y alta compatibilidad con otros polímeros, se ha explorado para modificar el TPS [20,21]. Por ejemplo, para un TPS plastificado con glicerol, es posible aumentar la hidrofobicidad de la mezcla incorporando PCL [13,20,22]. En otro trabajo, en una mezcla de almidón de yuca y PCL, se observó que la incorporación de PCL generó inmiscibilidad, formando sistemas con almidón como fase dispersa, observada mediante microscopía electrónica. Además, la adición de PCL provocó un aumento del módulo elástico y la resistencia a la tensión a una humedad relativa del 54 % [23]. En este trabajo, se utilizó almidón de maíz y de yuca en mezclas con PCL, en la generación de materiales con propiedades adecuadas sin el uso de agentes de acoplamiento, para promover el uso de plásticos ecológicos.

Metodología

Materiales

En el experimento se utilizaron almidón de yuca (AY) y almidón de maíz (AM) (Best Ingredients México, Santa Catarina, México), policaprolactona (CAPA 6506, TRiISO, CA, EE. UU.). Glicerol (CTR Scientific, Monterrey, México). Todos los reactivos se utilizaron tal como se recibieron.

Procesamiento de las mezclas

El AY y AM plastificados se prepararon mediante mezcla manual, 70 % en peso de almidón nativo y 30 % en peso de glicerol. Los materiales se alimentaron a una extrusora de doble tornillo (Micro 27, Leistritz, Núremberg, Alemania) con una relación L/D de 32:1. La velocidad del tornillo fue de 80 rpm y el perfil de temperatura fue de 110, 110, 120, 120, 130, 120 y 110 °C. Los filamentos obtenidos se enfriaron al aire y se peletizaron.

Posteriormente, los pellets se mezclaron con un 20 % en peso de PCL. Las mezclas se procesaron en la misma extrusora de doble tornillo a 80 rpm y un perfil de temperatura de 110, 110, 120, 120, 130, 120 y 110 °C. Al final del proceso, las mezclas se

peletizaron y se denominaron AYP-PCL y AMP-PCL. Finalmente, las mezclas fueron inyectadas para obtener probetas Tipo 1 según procedimiento ASTM D-638 para evaluar la resistencia a la tracción y el porcentaje de elongación en equipo de tracción universal (modelo 5565 estándar, Instron, Norwood, MA, EE. UU.). Esta máquina de inyección se utilizó para obtener el plato pastelero prototipo. Para obtener las bolsas desechables prototipo se utilizó una extrusora de película soplada marca Beutelspacher, L/D 30:1 ancho de película de 250 mm, capacidad de 3 Kg/h y un perfil de temperatura de 110, 120 y 120 °C. En la tabla 1 se presenta la nomenclatura de los materiales utilizados.

Tabla 1. Nomenclatura de los materiales

Mezcla	Clave
Almidón de maíz	AM
Almidón plastificado de maíz con glicerol	AMP
Almidón plastificado de maíz con glicerol + PCL	AMP-PCL
Almidón de yuca	AY
Almidón plastificado de yuca con glicerol	AYP
Almidón plastificado de yuca con glicerol + PCL	AYP-PCL

Caracterización

Se utilizó un calorímetro diferencial de barrido (DSC, Pyris 1, Perkin-Elmer, Akron, OH, EE. UU.) en atmósfera de nitrógeno, desde temperatura ambiente hasta 200 °C a una velocidad de calentamiento de 10 °C min, para estudiar las transiciones térmicas. El índice de cristalinidad (IC) se determinó según la ecuación (1) [24]:

$$IC (\%) = \frac{\Delta H_{exp}}{\Delta H_{of}} \times 100 \quad (1)$$

Donde ΔH_{exp} es la entalpía de fusión obtenida experimentalmente en Jg^{-1} , ΔH_o es la entalpía de fusión teórica para la PCL totalmente cristalina e Jg^{-1} , f es el porcentaje en peso de la PCL en la mezcla. Para el análisis de TGA, los termogramas se obtuvieron en una balanza termogravimétrica (Q500, TA Instruments, DE, EE. UU.) en el intervalo de temperatura de 40 a 700 °C, con una velocidad de calentamiento de 10 °C min⁻¹, un flujo de purga de nitrógeno de 20 mL min⁻¹.

Evaluación de la biodegradabilidad y la ecotoxicidad

La biodegradabilidad y la ecotoxicidad de una de las formulaciones de biopolímero obtenidas se evaluó en los laboratorios NYCE (laboratorio externo a donde se desarrolló la presente investigación), bajo la norma NMX-E-273-NYCE-2019.

Resultados y Discusión

Cristalinidad

La Figura 1 muestra los termogramas de la PCL, AMP-PCL y AYP-PCL. Como se observa, el PCL presentó una transición intensa a 65.5 °C, mientras que las mezclas preparadas con almidón de yuca y maíz exhibieron una endoterma a 61 °C y 61.5 °C, respectivamente. Dado que el contenido del componente cristalino (PCL) fue bajo (20 % en peso), las transiciones fueron mucho menos intensas que en la PCL. El dominio continuo en las mezclas fue almidón plastificado, lo que probablemente provocó que los cristales de PCL estuvieran menos compactados y fueran más heterogéneos, requiriendo menos energía para fundirse [35]. Cabe mencionar que se cree que el almidón interfiere en el proceso de cristalización del PCL, causando cambios en el empaquetamiento y la calidad de los cristales de PCL en las mezclas. La Tabla 2 presenta las propiedades térmicas y la cristalinidad de las mezclas y de la PCL.

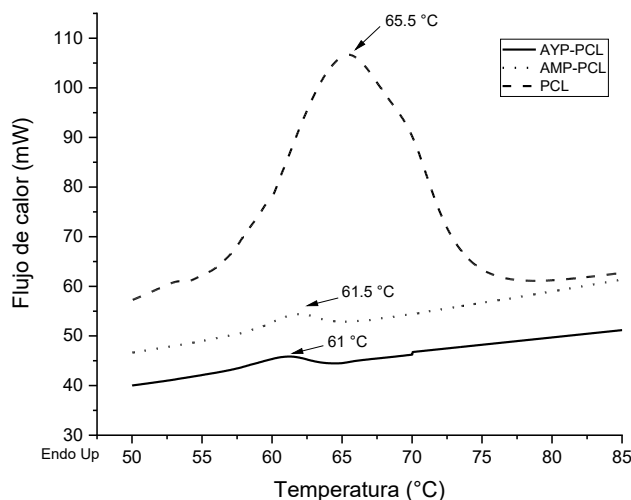


Figura 1. Termogramas de DSC de AYP-PCL, AMP-PCL y de la PCL.

A continuación, se presentan los datos de temperaturas de cristalización, entalpía de fusión y porcentaje de cristalinidad de los materiales (ver Tabla 2).

Tabla 2. Temperaturas de cristalización (T_c), entalpía de fusión (ΔH_m), temperatura de fusión (T_m) y porcentaje de cristalinidad (IC) de la PCL y las mezclas AMP-PCL y AYP-PCL.

Muestra	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	T_c (°C)	ΔH_c (J/g)	IC (%)
PCL	16.6	10.0	65.5	233	28.5
AMP-PCL	61.0	16.5	-	-	62.0
AYP-PCL	61.5	39.7	-	-	38.0

Como se observa, los IC calculados a partir de la Ecuación (1) para AMP-PCL y AYP-PCL fueron del 62 % y el 38 %, respectivamente, lo que indica que la cristalización de la PCL se vio menos afectada por la presencia de AMP que por la presencia de AYP. Esto se correlaciona con el contenido de amilopectina en el AY que es de ~83 %, mientras que en el AM es de ~72 %. Según la literatura, la amilopectina tiene una estructura ramificada y un tamaño mucho mayor que el de la amilosa, por lo que su estructura probablemente interferiría con el orden estructural del PCL, lo que se manifiesta en un bajo porcentaje de cristalinidad.

Estabilidad térmica

Las Figuras 2a y 2b muestran las trazas de TGA de los almidones plastificados de yuca y maíz y las mezclas con PCL. Las curvas muestran una pérdida de peso inicial entre 10 y 150 °C, correspondiente a la evaporación del agua y otros volátiles presentes en las muestras, de acuerdo con la literatura [25]. La transición a aproximadamente 250 °C en AYP y AYP-PCL corresponde a la disociación de las cadenas de amilosa a altas temperaturas, lo que provocó una ruptura estructural [26]. Esta transición no se observó en AMP ni en la mezcla AMP-PCL. Se sabe que la amilosa puede formar complejos con algunos alcoholes, como el 1-butanol [26], lo que aumenta su estabilidad térmica debido a la formación de fuertes interacciones moleculares que requieren mayor energía para romper los enlaces. Se cree que en el caso del AMP, que contenía más amilosa que el AYP, se pudo haber generado un complejo amilosa-glicerol, lo que aumentó la temperatura de descomposición de la amilosa, lo anterior se reflejó en una única transición en el análisis termogravimétrico, correspondiente a la descomposición del complejo amilosa-glicerol y la amilopectina. El segundo evento de descomposición a 316 °C coincidió aproximadamente con la descomposición de la amilopectina en AYP y AYP-PCL o del complejo amilosa-glicerol y amilopectina (Figura 2a) en MaPS y MaPS-PCL (Figura 2b), lo que representa, en todos los casos, una pérdida de peso significativa. Para AYP-PCL, la descomposición del PCL ocurrió a 408 °C, mientras que para AMP-PCL, el almidón se degradó a 312 °C y en la PCL esta descomposición ocurrió a 404 °C. En

consecuencia, la incorporación de PCL en los almidones termoplásticos no afectó su perfil de temperatura de descomposición; por lo tanto, AYP y AMP mostraron un comportamiento similar con pérdidas de peso significativas en las mismas temperaturas.

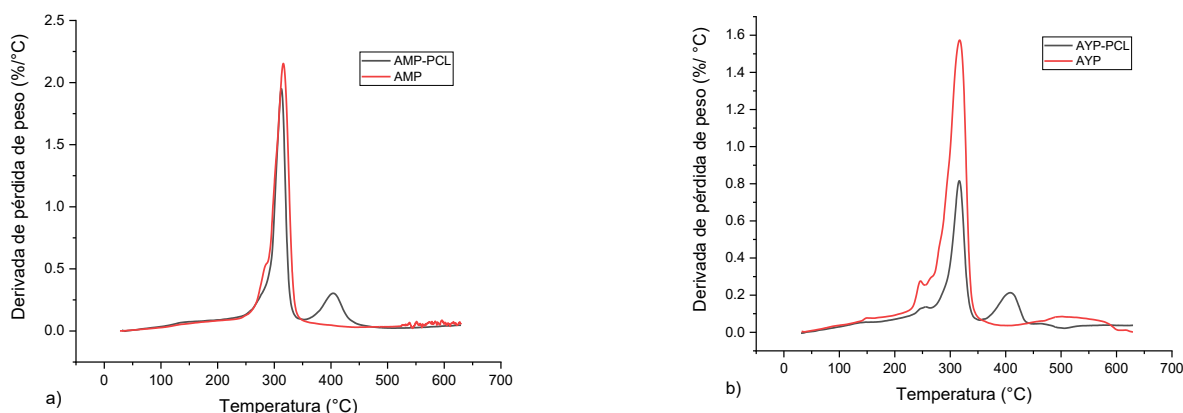


Figura 2. Termogramas de DTG de (a) AMP y AMP-PCL y (b) AYP y AYP-PCL.

Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de los materiales AYP, AMP, AYP-PCL y AMP-PCL se evaluaron mediante ensayos de esfuerzo-deformación. En cuanto a las propiedades mecánicas se observó que las mezclas de almidón de yuca con PCL (AYP-PCL) presentaron una resistencia a la tensión y un módulo de Young superiores a los materiales obtenidos con almidón de maíz (AMP-PCL). Estas diferencias posiblemente pueden atribuirse nuevamente a la variación en el contenido de amilosa y amilopectina presentes tanto en el AM y en el AY. En relación a las propiedades mecánicas, otras investigaciones se han centrado en modificar algunas características del almidón plastificado, como la absorción de agua, la resistencia a la tensión o la modificación de la temperatura de transición vítrea. En este sentido, posiblemente la incorporación de PCL en los almidones plastificados de maíz y yuca, modificó la susceptibilidad al agua en las mezclas, sin embargo, esto no fue evaluado en el presente trabajo.

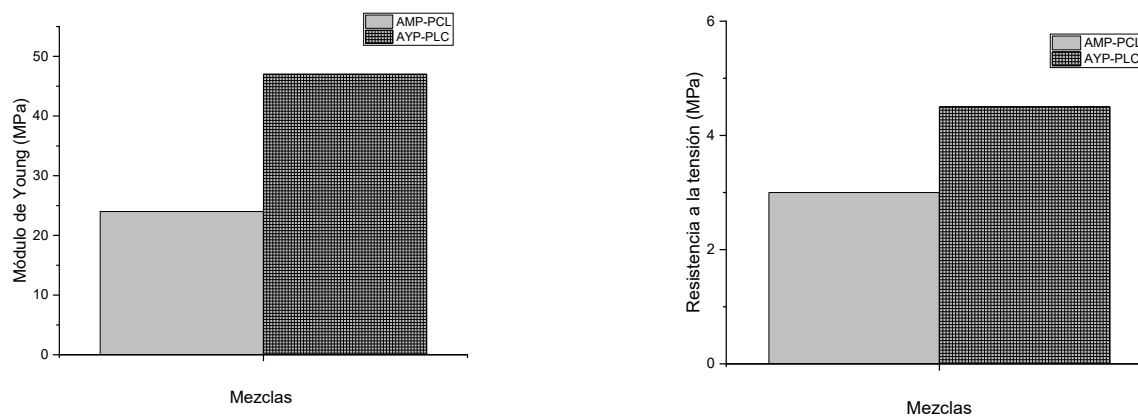


Figura 3. Propiedades mecánicas de resistencia a la tensión y módulo de Young de los materiales AMP, AMP y las mezclas con PCL.

Mahieu et al. obtuvieron mezclas de TPS con PCL de diferentes pesos moleculares encontraron una disminución en la deformación, atribuida a la falta de compatibilidad entre ambos componentes, al utilizar 30 % en peso de PCL [27]. En el caso de Correa et al., se mezclaron diferentes concentraciones de PCL con TPS, observando que las propiedades mecánicas mejoraron en comparación con el TPS puro. Además, debido a que las mezclas son totalmente biodegradables, pueden utilizarse como vehículos para la liberación controlada de nutrientes en el suelo mientras se biodegradan [25]. En el trabajo de Mina et al., donde se utilizó entre un 40 y un 60 % en peso de PCL, se estudió la retrodegradación de las mezclas y se llegó a la conclusión de que el efecto de la PCL era insignificante debido a que las mezclas eran predominantemente inmiscibles [28]. Sin embargo, debido a la estructura del almidón y el PCL, cabría esperar la formación de enlaces de hidrógeno e interacciones secundarias que podrían

intervenir en los cambios estructurales dentro del TPS. Los TPS son una nueva clase de polímeros ecológicos que pueden desecharse después de su uso sin contaminación. En este trabajo, las propiedades que presentan las mezclas pueden ser útiles para la fabricación de productos de corta duración, como utensilios y platos desechables. En la presente investigación se obtuvieron productos desechables prototipo que pudieran servir para demostrar el potencial de aplicaciones que tienen los materiales desarrollados.

Primeramente, mediante inyección convencional, se obtuvo el prototipo de un plato pastelero, con los materiales AMP y AMP-PCL, cuyas fotografías pueden observarse en la Figura 4. El plato pastelero prototipo está diseñado para utilizarse una sola vez y desecharse, como parte de la estrategia de disminución de plásticos de un solo uso que no son biodegradables. Como se verá más adelante, las pruebas de biodegradabilidad y ecotoxicidad fueron muy favorables.

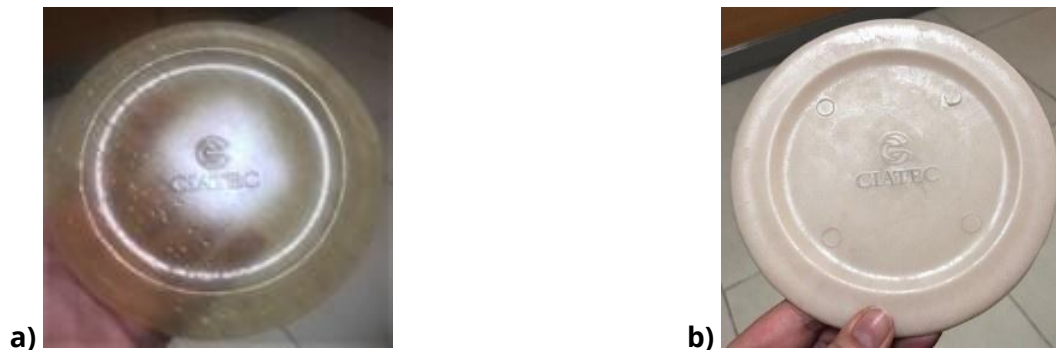


Figura 4. Prototipo de plato pastelero obtenido con a) AMP y b) con AMP-PCL

La formulación del material AMP-PCL se utilizó para obtener una bolsa desechable prototipo, mediante extrusión de película soplada, esta formulación tuvo que ser ajustada con algunos aditivos para facilitar el procesamiento del material y poder obtener el tubo en la extrusora con el que se fabrica la bolsa. En la Figura 5 se observa la extrusora de película soplada utilizada para la fabricación de las bolsas desechables prototipo y el tubo de película soplada, en la imagen de la derecha (b) se observan las bolsas obtenidas.

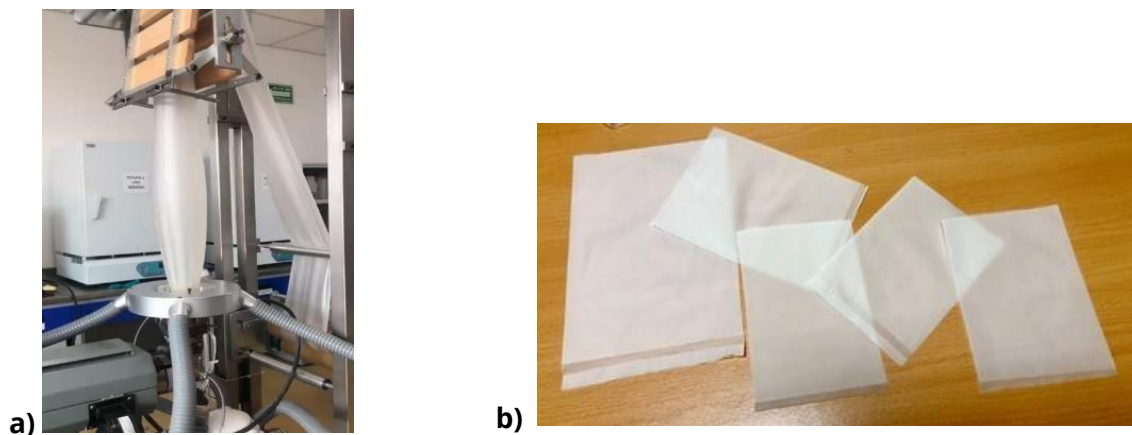


Figura 5. a) Extrusora para película soplada utilizada para obtener la bolsa prototipo, b) bolsa desechable prototipo

Biodegradabilidad y ecotoxicidad

El estudio de biodegradabilidad del biopolímero obtenido se realizó en los laboratorios de NYCE, los resultados muestran que el biopolímero tiene un grado de desintegración del 100 %, la norma marca un grado de desintegración $\geq 90\%$ para que un material

cumpla con ella. El reporte también señala que el biopolímero es biodegradable mediante la determinación de biodegradabilidad aerobia definitiva de materiales plásticos en condiciones controladas de compostaje, con un valor de 99.7 % cuando la norma pide que sea de $\geq 90\%$ para cumplir. Por otro lado, la evaluación de la ecotoxicidad mostró resultados muy buenos, en la tasa de germinación respecto al blanco, la norma marca $\geq 90\%$ para que un material cumpla, en el biopolímero se reportó un 118.2 %; en la biomasa germinada respecto al blanco, la norma marca $\geq 90\%$ para cumplir, con el biopolímero se obtuvo una biomasa del 410 %.

Estos resultados indican que los productos de la biodegradación del biopolímero, sirven como un fertilizante para las plantas, permitiendo que un número mayor de semillas germinen y que las plantas que nazcan tengan un mayor crecimiento, en comparación con los blancos.

Conclusiones

En este trabajo, se desarrollaron mezclas biobasadas derivadas de almidón de maíz y yuca con PCL. Los resultados de la calorimetría mostraron una compatibilidad parcial entre el almidón termoplástico y la PCL, evidenciada por el desplazamiento de la temperatura de fusión de la PCL. En consecuencia, de esta compatibilidad parcial, se logró un mejor rendimiento mecánico de las mezclas. El análisis termogravimétrico mostró evidencia de la formación de un complejo amilosa-glicerol en mezclas con almidón de maíz, lo que incrementó la temperatura de descomposición de la amilosa, superponiéndose con la temperatura de descomposición de la amilopectina y presentando una transición única. Las mezclas AMP-PCL y el AYP-PCL, mostraron una procesabilidad adecuada por extrusión e inyección. El análisis de biodegradabilidad demostró que es un material no contaminante y cuya reincorporación al suelo, después del proceso de biodegradación, lejos de ser perjudicial, ayuda al crecimiento de las plantas. Por otro lado, la obtención de productos prototipo con el biopolímero, demostró que tiene potencial para ser utilizado en productos de vida útil corta, coadyuvando a la disminución de la contaminación por la acumulación de plásticos no biodegradables. Cabe mencionar que ya se cuenta con una patente otorgada para el desarrollo de los materiales biobasados (patente mexicana No. 423164).

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la SECIHTI, a través de Finnovateg-IDEA por el apoyo al proyecto.

Declaración de conflicto de interés

Los autores no informaron ningún posible conflicto de intereses relacionado a esta publicación.

Referencias

- [1] La Asamblea de la ONU sobre el Medio Ambiente progresa en la cooperación frente a la triple crisis planetaria. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/la-asamblea-de-la-onu-sobre-el-medio-ambiente-progresa> 2024.
- [2] Muhammad Shamsuddin I. Bioplastics as Better Alternative to Petroplastics and Their Role in National Sustainability: A Review. *Advances in Bioscience and Bioengineering* 2017;5:63. <https://doi.org/10.11648/j.abb.20170504.13>.
- [3] Kwon S, Zambrano MC, Pawlak JJ, Venditti RA. Effect of lignocellulosic fiber composition on the aquatic biodegradation of wood pulps and the isolated cellulose, hemicellulose and lignin components: kinetic modelling of the biodegradation process. *Cellulose* 2021. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03680-6>.
- [4] Serwańska-Leja K, Lewandowicz G. Polymer Biodegradation and Biodegradable Polymers-a Review Characteristics of potato juice as a health-promoting foods ingredient View project SolanUP-Production technology of potato juice protein concentrate for food purposes View project. 2010.
- [5] Dordevic D, Necasova L, Antonic B, Jancikova S, Tremlová B. Plastic Cutlery Alternative: Case Study with Biodegradable Spoons. *Foods* 2021;10:1612. <https://doi.org/10.3390/foods10071612>.
- [6] Hassan MM, Le Guen MJ, Tucker N, Parker K. Thermo-mechanical, morphological and water absorption properties of thermoplastic starch/cellulose composite foams reinforced with PLA. *Cellulose* 2019;26:4463–78. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02393-1>.

- [7] Souza RCR, Andrade CT. Processing and properties of thermoplastic starch and its blends with sodium alginate. *J Appl Polym Sci* 2001;81:412–20. <https://doi.org/10.1002/app.1453>.
- [8] Bertolini A. *Characterization, Properties, and Applications*. 1st Edition. 2009.
- [9] García N, Aranguren M, Dufresne A, Goyanes S. Efecto de la concentración de amilopectina en la respuesta físico-mecánica de films de almidón. Congreso SAM/CONAMET 2007, 2007.
- [10] Hernández-Medina M, Torruco-Uco JG, Chel-Guerrero L, Betancur-Ancona D. Caracterización físico-química de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. *Food Science and Technology* 2008;28. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612008000300031>.
- [11] Rivadeneira-Velasco KE, Utreras-Silva CA, Díaz-Barrios A, Sommer-Márquez AE, Tafur JP, Michell RM. Green Nanocomposites Based on Thermoplastic Starch: A Review. *Polymers (Basel)* 2021;13:3227. <https://doi.org/10.3390/polym13193227>.
- [12] van Soest JJG, Vliegthart JFG. Crystallinity in starch plastics: consequences for material properties. *Trends Biotechnol* 1997;15. [https://doi.org/10.1016/S0167-7799\(97\)01021-4](https://doi.org/10.1016/S0167-7799(97)01021-4).
- [13] Averous L. Properties of thermoplastic blends: starch–polycaprolactone. *Polymer (Guildf)* 2000;41. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(99\)00636-9](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(99)00636-9).
- [14] Wang J, Liang Y, Zhang Z, Ye C, Chen Y, Wei P, Wang Y, Xia Y. Thermoplastic starch plasticized by polymeric ionic liquid. *Eur Polym J* 2021;148:110367. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110367>.
- [15] Abera G, Woldeyes B, Demash HD, Miyake G. The effect of plasticizers on thermoplastic starch films developed from the indigenous Ethiopian tuber crop Anchote (*Coccinia abyssinica*) starch. *Int J Biol Macromol* 2020;155:581–7. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.218>.
- [16] Giroto AS, Garcia RHS, Colnago LA, Klamczynski A, Glenn GM, Ribeiro C. Role of urea and melamine as synergic co-plasticizers for starch composites for fertilizer application. *Int J Biol Macromol* 2020;144:143–50. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.094>.
- [17] Hazrati KZ, Sapuan SM, Zuhri MYM, Jumaidin R. Effect of plasticizers on physical, thermal, and tensile properties of thermoplastic films based on *Dioscorea hispida* starch. *Int J Biol Macromol* 2021;185:219–28. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.06.099>.
- [18] Heidarian P, Behzad T, Sadeghi M. Investigation of cross-linked PVA/starch biocomposites reinforced by cellulose nanofibrils isolated from aspen wood sawdust. *Cellulose* 2017;24. <https://doi.org/10.1007/s10570-017-1336-4>.
- [19] Lerma-Canto A, Gomez-Caturla J, Herrero-Herrero M, Garcia-Garcia D, Fombuena V. Development of Poly(lactic Acid) Thermoplastic Starch Formulations Using Maleinized Hemp Oil as Biobased Plasticizer. *Polymers (Basel)* 2021;13:1392. <https://doi.org/10.3390/polym13091392>.
- [20] Balla B, Bartos A, Kun D, Csiszár E, Móczó J, Fekete E. Improving mechanical and water sorption properties of thermoplastic starch by incorporating chitosan filler. *Polym Test* 2021;101:107278. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107278>.
- [21] Carmona VB, de Campos A, Marconcini JM, Mattoso LHC. Kinetics of thermal degradation applied to biocomposites with TPS, PCL and sisal fibers by non-isothermal procedures. *J Therm Anal Calorim* 2014;115. <https://doi.org/10.1007/s10973-013-3259-0>.
- [22] Dubois P, Krishnan M, Narayan R. Aliphatic polyester-grafted starch-like polysaccharides by ring-opening polymerization. *Polymer (Guildf)* 1999;40. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(98\)00110-4](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(98)00110-4).
- [23] Piñeros-Guerrero N, Piñeros-Castro Y, Ortega-Toro R. Active biodegradable films based on thermoplastic starch and poly(ϵ -caprolactone): technological application of antioxidant extracts from rice husk. *Rev Mex Ing Quim* 2020;19:1095–101. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Poli898>.
- [24] Mina Hernandez JH. Effect of the Incorporation of Polycaprolactone (PCL) on the Retrogradation of Binary Blends with Cassava Thermoplastic Starch (TPS). *Polymers (Basel)* 2020;13:38. <https://doi.org/10.3390/polym13010038>.
- [25] Crescenzi V, Manzini G, Calzolari G, Borri C. Thermodynamics of fusion of poly- β -propiolactone and poly- ϵ -caprolactone. comparative analysis of the melting of aliphatic polylactone and polyester chains. *Eur Polym J* 1972;8:449–63. [https://doi.org/10.1016/0014-3057\(72\)90109-7](https://doi.org/10.1016/0014-3057(72)90109-7).
- [26] Correa AC, Carmona VB, Simão JA, Capparelli Mattoso LH, Marconcini JM. Biodegradable blends of urea plasticized thermoplastic starch (UTPS) and poly(ϵ -caprolactone) (PCL): Morphological, rheological, thermal and mechanical properties. *Carbohydr Polym* 2017;167:177–84. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.03.051>.

- [27] Lemos PVF, Barbosa LS, Ramos IG, Coelho RE, Druzian JI. Characterization of amylose and amylopectin fractions separated from potato, banana, corn, and cassava starches. *Int J Biol Macromol* 2019;132:32–42. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.086>.
- [28] Mahieu A, Terrié C, Agoulon A, Leblanc N, Youssef B. Thermoplastic starch and poly(ϵ -caprolactone) blends: Morphology and mechanical properties as a function of relative humidity. *Journal of Polymer Research* 2013;20. <https://doi.org/10.1007/s10965-013-0229-y>.
- [29] Mina AJ, Valadez G A, Toledano T T. PHYSICO-CHEMICAL STUDIED OF THERMOPLASTIC STARCH (TPS) AND POLYCAPROLACTONE (PCL). *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial* 2013;11.