

Elaboración de un bioplástico con almidón de maíz/glicerol/anhídrido maleico/prolicaprolactona: estudio preliminar

Elaboration of a bioplastic with corn starch/glycerol/maleic anhydride/polycaprolactone: preliminary study

María Maldonado-Santoyo¹, Luz Adriana Arías-Hernández², Eladio Delgadillo-Ruiz³

Fecha de recepción: 18 de setiembre, 2024

Fecha de aprobación: 3 de diciembre, 2024

Maldonado-Santoyo, M; Arías-Hernández, L.A; Delgadillo-Ruiz, E. Elaboración de un bioplástico con almidón de maíz/glicerol/anhídrido maleico/prolicaprolactona: estudio preliminar . *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 3. Julio-Setiembre, 2025. Pág. 3-13.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i3.7240>

1 Dirección de Investigación y Soluciones Tecnológicas. Centro de Innovación Aplicadas en Tecnologías Competitivas. México.

 msantoyo@ciatec.mx

 <https://orcid.org/0000-0001-7205-0240>

2 Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica. División de Ingenierías. Universidad de Guanajuato. México.

 arhadriana@ugto.mx

 <https://orcid.org/0000-0001-5456-8046>

3 Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. División de Ingenierías. Universidad de Guanajuato. México.

 e.delgadillo@ugto.mx

 <https://orcid.org/0000-0002-2004-5340>

Palabras clave

Ecoplástico; extrusión; biodegradabilidad acuosa; acolchado plástico; plástico ecológico.

Resumen

Este trabajo presenta los resultados obtenidos en la elaboración de un bioplástico empleando almidón de maíz, glicerol, anhídrido maleico y policaprolactona (Alm/G/Am/PCL). Para ello, se prepararon tres mezclas: M1(Alm/G), M2(Alm/G/Am) y M3(Alm/G/Am/PCL) usando una mezcladora de cocina. Después fueron procesados en una extrusora de doble husillo (80 rpm) y con un perfil de temperaturas entre 75-112°C. Los filamentos obtenidos fueron enfriados y cortados y por moldeo con una prensa hidráulica (130°C/20000lbf/3min) se obtuvieron las láminas. Los bioplásticos se caracterizaron en algunas propiedades mecánicas, análisis de infrarrojo, absorción de agua, color y biodegradabilidad primaria aerobia en medio acuoso. Los resultados muestran valores de tensión a la rotura 1.40 ± 0.10 , 1.12 ± 0.07 y 0.38 ± 0.06 MPa; deformación a la rotura 23.36 ± 2.3 , 20.46 ± 2.6 y 22.33 ± 1.6 % y módulo de elasticidad de 1.31 ± 0.39 , 1.43 ± 0.16 y 2.74 ± 0.18 MPa para M1, M2 y M3, respectivamente. La interacción molecular más destacada, fue el cambio en el grupo carbonilo. La absorción de agua para todas la mezclas, superó el 60% (26h) y la biodegradabilidad primaria alcanzada fue entre 30-34%. Los bioplásticos M2 y M3 mejoraron algunas propiedades mecánicas con la adición de anhídrido maleico y policaprolactona. Todos los bioplásticos presentaron buena procesabilidad por extrusión a las condiciones propuestas.

Keywords

Ecoplastic; extrusión; aqueous biodegradability; plastic padding; ecological plastic.

Abstract

This work presents the results obtained in the preparation of a bioplastic using corn starch, glycerol, maleic anhydride and polycaprolactone (Alm/G/Am/PCL). For this, three mixtures were prepared: M1(Alm/G), M2(Alm/G/Am) and M3(Alm/G/Am/PCL) using a kitchen mixer. They were then processed in a twin-screw extruder (80 rpm) and a temperature profile between 75-112°C. The filaments obtained were cooled and cut and, by molding with a hydraulic press (130°C/20,000lbf/3min) the sheets, were obtained. The bioplastics were characterized in some mechanical properties, infrared analysis, water absorption, color and aerobic primary biodegradability in aqueous medium. The results show stress values at break 1.40 ± 0.10 , 1.12 ± 0.07 and 0.38 ± 0.06 MPa; strain of break 23.36 ± 2.3 , 20.46 ± 2.6 and 22.33 ± 1.6 % and, modulus of elasticity of 1.31 ± 0.39 , 1.43 ± 0.16 and 2.74 ± 0.18 MPa for M1, M2 and M3, respectively. The most prominent molecular interaction was the change in carbonyl group. The water absorption for all mixtures exceeded 60% (26h) and the primary biodegradability achieved was between 30-34%. Bioplastics M2 and M3 improved some mechanical properties with the addition of maleic anhydride and polycaprolactone. All bioplastics presented good processability by extrusion at the proposed conditions.

Introducción

Los plásticos de origen petroquímico son ampliamente utilizados en diversos mercados industriales en todo el mundo, para el desarrollo de una extensa gama de productos que mejoran el confort social cotidiano y de la industria, principalmente por sus buenas propiedades físico-mecánicas, bajo costo, fácil procesabilidad y alta estabilidad y durabilidad [1-5]. Sin

embargo, su extensa versatilidad ha provocado su producción acelerada y en gran escala a nivel mundial, destacando la producción de plásticos de polietileno, polipropileno y el policloruro de vinilo, entre otros [3][6-8]. Esto ha atraído la atención tanto de sectores gubernamentales como de la sociedad, debido a su impacto en la economía global, así como al hecho, de que son materiales que provienen de fuentes fósiles no renovables; además del impacto causado por su uso indiscriminado, las bajas tasas de recuperación, alta permanencia en diferentes ecosistemas y su inadecuado manejo al fin de su ciclo de vida, ha ocasionado diversas perturbaciones adversas a los ecosistemas, tanto acuáticos como terrestres [3][9]-[11].

Aunado a ello, el uso de estos plásticos también se ha extendido a la agricultura, principalmente como acolchados agrícolas, siendo el polietileno el más ampliamente utilizado a nivel mundial. Su incursión en este sector se debe principalmente a las ventajas que prestan los plásticos en sus diferentes propiedades y colores, pues coadyuvan a recuperar tierras que carecían de potencial agrícola para transformarlas en tierras productivas, defender los cultivos y al suelo de agentes perjudiciales e incrementar la producción [11][12]. Lo anterior es de gran relevancia, pues la agricultura tradicional está dando un giro importante, transformándose de un sector industrial marginal, a situarse como una de las principales fuentes económicas y de abastecimiento para numerosas poblaciones y “comarcas tradicionalmente desfavorecidas”. Derivado de ello, es que el uso de plásticos en la agricultura se ha ido incrementando paulatinamente durante los últimos años alrededor del mundo [11][13], ya que provee de varias ventajas para la agricultura, sin embargo, también está creando grandes desafíos para el medio ambiente. Según algunos estudios, alrededor del 80 % de los desechos plásticos, provienen de acolchados utilizados en la agricultura, siendo su recolección, al final de su ciclo de vida, un poco complicado y, además, algunos se descomponen en microplásticos, ocasionando que algunas partes significativas se queden en los suelos de cultivo y terminen en ríos y océanos derivados de la filtración y escorrentía [11]-[14].

Ante esta problemática, tanto en la agricultura como en el sector industrial y social, se han planteado el desarrollo de nuevas propuestas de materiales plásticos que estén más comprometidos con la salud del planeta. Una de estas propuestas de plásticos ecológicos son los denominados “bioplásticos”, que tienen como ventaja primordial que pueden obtenerse de diversas fuentes renovables y disponibles tanto de origen animal (proteínas: colágeno, queratina, seda, gelatin, quitosán); vegetal (polisacáridos como el almidón de maíz, papa o de yuca, productos lignocelulósicos, resinas o proteínas vegetales como soya, gluten o algas) o bien, obtenerse sintéticamente vía fermentativa como el ácido poliláctico y los polihidroxialcanoatos, entre otros [3][5][11][15]-[18]. También existen algunos plásticos de origen petroquímico, que son biodegradables como la policaprolactona y algunos derivados del polibutileno [3][5][9][19]. Sin embargo, es de suma importancia considerar que, una adecuada selección de los materiales/sustancias, el mezclado y su procesamiento, son factores de importancia que permiten o no, obtener bioplásticos con propiedades físico-mecánicas y químicas adecuadas para su uso en la fabricación de los diferentes artículos que la sociedad demanda, y de esta manera, coadyuvar a sustituir de a poco, a los plásticos tradicionales de origen petroquímico. Además, otra ventaja de los bioplásticos es que no suelen producir residuos tóxicos al descomponerse y presentan una desaparición rápida bajo condiciones determinadas de humedad, luz solar y oxígeno, permitiendo que los componentes se reintegren a la naturaleza en menor tiempo, mediante la acción de los microorganismos, lo cual contribuye a que el ciclo vital siga su curso sin menoscabo del medio ambiente [3][20].

En este contexto, el almidón es un importante polisacárido producido en las plantas. Es de bajo costo, un recurso renovable, biodegradable y presenta degradación inocua en los productos que lo contienen; esto ha hecho que sea ampliamente estudiado como materia prima para diferentes aplicaciones tanto ambientales, biomédicas, materiales o alimentos [18][21][22]. Es

un biopolímero de glucosa, formado por dos unidades estructurales: amilosa (aprox. 25 %) y amilopectina (aprox. 75 %) con pesos moleculares altos que típicamente superan los 48000 g/mol [21][23]. Se puede encontrar en vegetales, semillas de plantas, raíces o frutas [20][24]. Sin embargo, por sí solo no se puede procesar, para ello requiere de un plastificante u otros aditivos que permitan su adecuado procesamiento y mejoren sus propiedades. Diversos trabajos han sido reportados en la literatura, en los cuales se emplea el almidón como fuente biológica principal para la elaboración de plásticos ecológicos, combinado con algún otro polímero, sustancias orgánicas e inorgánicas y/o aditivos y utilizando plastificantes ya sean líquidos o sólidos, como agua, glicerol, urea, etilenglicol, ácido acético, azúcar, polialcoholes, lípidos, sorbatos, entre otros [18][22][25]. Jalalvandi et al. [26], desarrollaron un bioplástico para su uso como material de empaque para comida, utilizando una mezcla de almidón de tapioca, ácido poliláctico, glicerol, anhídrido maleico y montmorillonita el cual es un mineral del grupo de los silicatos. Mientras que, Álvarez y Vázquez [27], elaboraron un plástico biodegradable a partir de mezclas de celulosa/almidón reforzadas con fibras de sisal. Otros autores han incluido el uso del almidón ya sea de papa, maíz, yuca o quinoa, plastificando con glicerol, ácido acético u otros aditivos [22][24][25][28] y empleando diversos tipos de fibras vegetales, como material de refuerzo [20][25].

Con base en lo expuesto, este trabajo presenta los resultados preliminares obtenidos en la elaboración de un bioplástico de base biológica, a partir de la mezcla de almidón de maíz con glicerol, anhídrido maleico y/o policaprolactona que pueda usarse como acolchado agrícola.

Materiales y métodos

Reactivos

Los reactivos utilizados fueron almidón de maíz nativo (Meelunie), glicerol (Meyer, pureza 99.5 %), anhídrido maleico (Meyer, pureza >95 %), policaprolactona (PCL) (SUM China), agua desionizada 18.2 M Ω -cm (Sartorius). Fosfato monopotásico (Karal, pureza 99 %), fosfato dipotásico (Karal, pureza >98 %), fosfato disódico heptahidratado (Karal, pureza >98 %), cloruro de amonio (Karal, pureza 99 %), cloruro de calcio dihidratado (Karal, pureza 99 %), sulfato de magnesio (Baker, pureza 98 %), cloruro férrico hexahidratado (Karal, pureza 97 %), hidróxido de sodio (Karal, pureza 97 %), hidróxido de potasio (Merk, >85 %), ácido clorhídrico solución 1.0 N (Karal).

Procesamiento

Los bioplásticos se prepararon de acuerdo a las formulaciones presentadas en el cuadro 1. Las mezclas se realizaron utilizando una batidora marca KitchenAid Artisan durante 5 minutos hasta obtener una mezcla homogénea. Después, cada mezcla se alimentó a una extrusora de doble tornillo (Micro27, Leistriz, Nuremberg, Alemania) con una relación longitud/diámetro (L/D) de 32:1. La velocidad del tornillo fue de 80 rpm y el perfil de temperatura fue de 75, 95, 105, 112, 112, 100, 90 y 80 °C en cada sección. Los filamentos obtenidos se enfriaron con aire y se cortaron en pedazos pequeños (<1 cm) de forma manual. Luego, utilizando una prensa hidráulica (marca Carver, Autoserie NE, Indiana, USA), fueron prensados en caliente (130 °C, 20000 lbf, 3 min) hasta obtener una lámina delgada. Una vez frías las láminas, fueron cortadas utilizando una prensa manual para obtener los especímenes de prueba. Para cada bioplástico se analizaron 5 especímenes de prueba.

Cuadro 1. Formulación de los bioplásticos.

Bioplástico	Almidón de maíz (Alm), g	Glicerol (G), g	Anhídrido maleico (Am), g	Policaprolactona (PCL), g
M1	700	300	-	-
M2	700	300	10	-
M3	700	300	10	100

Caracterización

El espesor de las láminas obtenidas fue medido utilizando un medidor vernier digital con resolución de 0.01 mm (marca Keatronic) [25]. La humedad en los bioplásticos fue determinada por gravimetría, calentando una muestra de cada bioplástico a 105 °C hasta su peso constante. El análisis se realizó por triplicado.

El contenido de carbono total en los bioplásticos fue estimado de forma teórica a partir de la composición de los materiales reportada en el cuadro 1.

Para evaluar la absorción de agua, se tomó una pequeña cantidad de cada material y fue secado a 50 °C durante 20 h y se registró su peso inicial. Después, se sumergieron en agua destilada (24±2 °C) y se registró su peso a las 26 h de contacto [26]. El color en los bioplásticos fue obtenido, utilizando un colorímetro CM-700d/600g, calibrando a blanco con 5 disparos, para cada espécimen de prueba. Los análisis se realizaron por triplicado.

El peso molecular en el almidón de maíz fue estimado por viscosimetría empleando la ecuación de Mark-Houwink $[\eta] = K \cdot M^a$, donde $[\eta]$ es la viscosidad intrínseca; K y a son constantes específicas del soluto-solvente y M es el peso molecular. Para ello, se utilizó un viscosímetro de Ostwald para evaluar el tiempo de fluidez del almidón de maíz a diferentes concentraciones (0.2, 0.5, 1.0, 1.5 g/dL) utilizando una solución de KOH 1N como solvente y a una temperatura de 35 °C en baño maría. Las constantes empleadas fueron $K = 1.4 \times 10^{-4}$ dL/g y $a = 0.73774$ [29]. Todos los análisis fueron realizados por triplicado.

Algunas interacciones moleculares se evaluaron empleando un espectrofotómetro de infrarrojo de transformada de Fourier (Thermo Fisher Nicolet), en un intervalo de número de onda de 4000-400 cm^{-1} con 16 escaneos y una resolución de 4 cm^{-1} . El análisis se realizó para el almidón de maíz, anhídrido maleico y PCL puros y en los bioplásticos (M1, M2 y M3) para su comparación.

Las pruebas mecánicas de tensión a la rotura, deformación a la rotura y módulo de elasticidad fueron evaluadas utilizando una máquina de ensayos mecánicos (marca Galdabini).

De forma preliminar, la biodegradabilidad primaria aeróbica en medio acuoso se realizó para el almidón de maíz, la policaprolactona y los tres bioplásticos (M1, M2 y M3) de acuerdo al método OECD 301B [10] con ligeras modificaciones. Para ello, una cantidad conocida de cada bioplástico, equivalente a 10-20 mg de carbono orgánico/L, fue colocada en un reactor de vidrio de 1L con solución mineral (fósforo, nitrógeno, potasio, calcio, magnesio y hierro) e inoculada con licor de lodos activados recolectado en la planta de tratamiento de aguas residuales Villas de San Juan, León, Gto., acondicionado previamente durante 7 días en el medio mineral, para permitir el desarrollo microbiano. Después, los reactores se colocaron en una placa con agitación magnética suave y flujo de aire a 22±2°C e iluminación difusa durante 28 días. La cantidad de CO₂ formado fue capturado en una trampa de hidróxido de sodio 0.1 N y medido por titración con una solución de ácido clorhídrico 0.1 N. Los análisis se realizaron por duplicado para cada bioplástico.

Resultados

En la figura 1 se muestran las estructuras moleculares de las sustancias utilizadas para la elaboración de los materiales plásticos M1, M2 y M3: almidón de maíz, glicerol, anhídrido maleico y policaprolactona, utilizando ChemSketch. Se puede apreciar, que los grupos funcionales que destacan en todas ellas son enlaces de tipo O-H, C-H, C=O y C-O-C. El peso molecular de cada uno de ellos es de 92.0, 98.06 y 50,000 g/mol para el glicerol, el anhídrido maleico y la policaprolactona, respectivamente y fueron obtenidos directamente de la hoja técnica del proveedor. Mientras que, el peso molecular para el almidón de maíz utilizado, estimado por viscosimetría, fue de 363,095 g/dL.

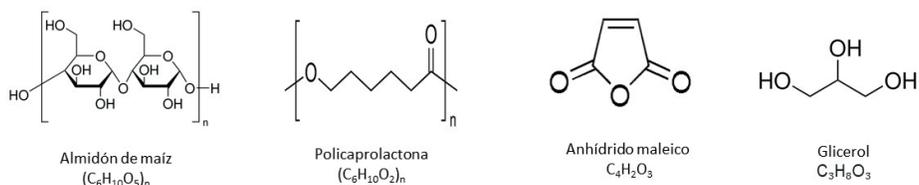


Figura 1. Estructuras moleculares de los materiales puros.

El espesor logrado en las placas obtenidas por compresión fue de 3 mm de espesor. En la figura 2 se presentan imágenes de los especímenes de prueba obtenidos con el procedimiento propuesto para M1, M2 y M3.



Figura 2. Imágenes de los especímenes de prueba de M1, M2 y M3.

La humedad estuvo entre 5.3-5.9 % y la absorción de agua a las 26 h de contacto entre 57-73 % para los tres bioplásticos. Siendo M3 el que mayor absorción de agua presentó (70.89±1.6 %). Lo anterior, se debe principalmente al alto contenido de almidón en los bioplásticos (60-70 %), pues como ya se mencionó, por su naturaleza higroscópica, tiende a absorber agua y se hincha. Estos valores son similares a lo obtenido por otros autores, por ejemplo, Oluwasina et al. [25] reportan para su bioplástico usando almidón de ñame (55 %) con glicerol (12 %) y variando la cantidad de dialdehído, un contenido de humedad entre 6.62-11.85 % y cuando se adiciono sílica fue 11.24-14.26 %; mientras que, la absorción de agua a los 24 h de contacto fue entre 60-80%. Por otro lado, en el material elaborado por Jalalvaldi et al. [26], mezclando una cantidad baja de almidón de tapioca (28 %) con glicerol (12 %), anhídrido maleico (2 %) y un alto contenido de ácido poliláctico (58 %), a las 24 h de contacto con agua, reportó valores de absorción de agua entre 38 y 40 %. Por su parte, Barrios et al. [20] para su bioplástico a base de almidón y glicerol (65/35 %) reporta valores cercanos al 29 % con solo 5 h de contacto. Con base a esta información, se puede deducir que el contenido de almidón presente en un material bioplástico tiene efecto sobre la absorción de agua del material, lo cual puede afectar sus propiedades físico-mecánicas.

Cuadro 2. Valores obtenidos en la caracterización química y de color de los bioplásticos.

Material plástico	Humedad, %	Carbono teórico total, %	Absorción de agua, %	Color*		
				L	a	b
M1	5.3±0.2	42.8	60.39±3.0	39.8	-0.5	+8.7
M2	5.5±0.1	42.9	64.5±2.8	26.7	+2.3	+4.3
M3	5.9±0.1	44.7	70.89±1.6	39.8	+0.5	+4.7

*Espacio Cie Lab donde L: Luminosidad; a: coordenadas rojo/verde (+a: indica rojo, -a indica verde) y b: coordenadas amarillo/azul (+b indica amarillo, -b indica azul). Fuente [Elaboración propia]

Ahora bien, teniendo en consideración que los bioplásticos elaborados en este trabajo, puedan utilizarse como acolchados plásticos en agricultura, también se midió el color en cada bioplástico. Este parámetro es de suma importancia en los acolchados plásticos, ya que contribuye, ya sea en el rebote o absorción de luz, la cual posteriormente se convierte en calor y puede afectar benéfica o adversamente en el desarrollo de los cultivos. Para los bioplásticos aquí propuestos, los valores obtenidos en coordenadas espacio CIE Lab están reportados en el cuadro 2. La luminosidad obtenida fue entre 26 al 40 %, esto es bueno, pues nos indica que pueden absorber luz hasta en un 60 %. Mientras que, las coordenadas obtenidas en los bioplásticos, a y b están dentro de la circunferencia de +10 a -10 cuyo color predominante en esta zona es el color grisáceo; esto es benéfico, ya que el color gris, en un acolchado plástico, puede coadyuvar en el control de malezas.

Por otro lado, los espectros obtenidos en el análisis de FTIR (cuadro 3), mostraron que el cambio y el desplazamiento en la absorción del grupo carbonilo ($1830-1650\text{ cm}^{-1}$) fue el más evidente. Sin embargo, también se observaron cambios en la banda ($3800-3000\text{ cm}^{-1}$), la cual se debe a enlaces de tipo O-H y C-H. Esta banda al ser amplia y alta (3500 y 3200 cm^{-1}) puede deberse al enlace O-H del agua, observándose principalmente en los materiales que contienen el almidón (M1, M2 y M3) pues este tiene un comportamiento higroscópico, es decir, que absorbe agua [20]. Mientras que, las interacciones debidas a estiramientos C-H ($3000-2800\text{ cm}^{-1}$) se observaron en todos los materiales (puros y en mezcla).

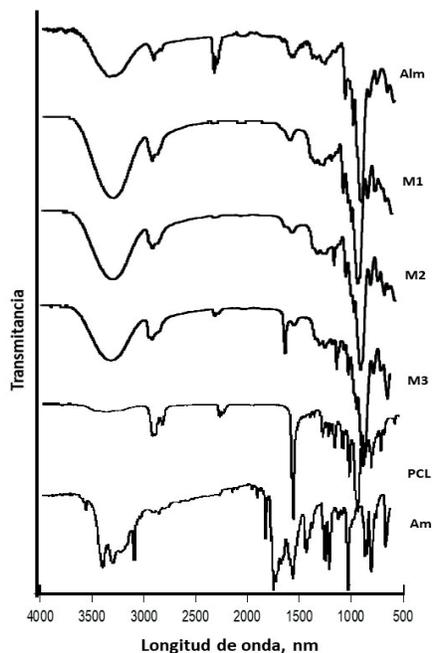


Figura 3. Espectros obtenidos por FTIR.

Respecto a la evaluación de las propiedades mecánicas de tensión a la rotura, deformación a la rotura y módulo de elasticidad se utilizaron cinco especímenes de prueba (figura 1) para cada material bioplástico. Los valores obtenidos (cuadro 3) muestran que, de forma general, las propiedades mecánicas evaluadas fueron mejoradas al adicionar, además del glicerol que tuvo la función como plastificante, el anhídrido maleico sin o con adición de la PCL (M2 y M3), con respecto a M1 que solo tiene el plastificante. Otros estudios como el reportado por Ledesma-Ugsiña et al., [24] en el cual elaboraron una película a base almidón de maíz/glicerol/ácido acético/agua presentaron valores de 0.64 MPa, 33.78 % y 2.44 MPa para la tensión a la rotura, deformación a la rotura y módulo de elasticidad, respectivamente. Mientras que, Meza et al. [28] reporta valores de tensión a la rotura (0.6 y 2.5 MPa) y deformación a la rotura (15 y 30 %) para diferentes bioplásticos a base de almidón y Barrios et al. [20] reporta 0.85 MPa y 13 %, respectivamente, para almidón termoplastificado con glicerol (65/35 %)[20]. Estos valores son cercanos a lo obtenido en el bioplástico M3 (0.38 ± 0.06 MPa y 22.33 ± 1.6 %), desarrollado en este trabajo, sin embargo, es importante destacar que tanto el procesamiento como la composición de los materiales es diferente, razón por la cual los valores en algunas propiedades pueden diferir.

Cuadro 3. Valores obtenidos en las propiedades mecánicas de los bioplásticos

Bioplástico	Tensión a la rotura MPa	Deformación a la rotura %	Módulo elástico MPa
M1	1.40 ± 0.10	23.36 ± 2.3	1.31 ± 0.39
M2	1.12 ± 0.07	20.46 ± 2.6	1.43 ± 0.16
M3	0.38 ± 0.06	22.33 ± 1.6	2.74 ± 0.18

Por otro lado, la biodegradabilidad aeróbica alcanzada en medio acuoso a los 28 días, a las condiciones propuestas, fueron de 31.8 ± 2.3 y 22.78 ± 2.5 %, para el almidón de maíz y la PLC en forma pura, respectivamente. Mientras que, para los tres bioplásticos (M1, M2 y M3) la biodegradabilidad fue muy similar obteniendo valores que oscilaron entre el 30-34 %. Estos valores son cercanos a los reportados por otros autores. Por ejemplo, el estudio realizado por Ledesma-Ugusiña et al. (2021) para una película plástica mezclando almidón de maíz (2.5g)/ glicerol (2 mL)/ácido acético (4 mL)/agua (35 mL), reporta una biodegradabilidad en medio acuoso, cercana al 55 % a los 20 días de contacto[24]. Meza et al., (2019) obtuvo valores que oscilan entre 50-65 % en medio acuoso a los 60 días de contacto[28]). Es importante comentar, que estas diferencias están estrechamente relacionadas con la composición y procesamiento del bioplástico analizado, ya que cualquier cambio en las sustancias y cantidad empleadas en la elaboración y las condiciones de procesamiento influyen directamente en sus propiedades.

Conclusiones y/o recomendaciones

Se obtuvieron tres bioplásticos de base biológica utilizando almidón de maíz y el glicerol como plastificante, que mejoró sus propiedades mecánicas con la adición de anhídrido maleico (M2) y policaprolactona (M3). Los tres bioplásticos mostraron buena procesabilidad por extrusión de doble husillo a las condiciones propuestas. La biodegradabilidad primaria alcanzada en los bioplásticos, en medio acuoso, a los 28 días de contacto, fue mayor al 30 %. Sin embargo, la permeación al agua sobrepasó al 60 % para los tres bioplásticos, por lo cual se plantea continuar con los estudios para mejorar esta propiedad y, además, evaluar la biodegradabilidad bajo condiciones de composteo y realizar pruebas de ecotoxicidad en el crecimiento de plantas.

Agradecimientos

Los autores agradecen al CIATEC A.C. y a la Universidad de Guanajuato por el apoyo brindado para el desarrollo de este trabajo.

Referencias

- [1] J. Ru, Y. Huo and Y. Yang. "Microbial degradation and valorization of plastic wastes", *Front. Microbiol*, vol. 11, no. 442, pp. 1-20, 2020. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00442>
- [2] A.K. Khan and T. Majeed. "Biodegradation of synthetic and natural plastics by microorganisms: a mini review", *Journal of Natural and Applied Sciences Pakistan*, Vol. 1, No. 2, pp. 180-184, 2019.
- [3] T. Ahmed, M. Shahid, F. Azeem, I. Rasul, A. Shah, M. Noman, A. Hameed, N. Manzoor, I. Manzoor and S. Muhammad. "Biodegradation of plastic: current scenario and future prospects for environmental safety", *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 25, no. 1, pp. 7287-7298, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1234-9>
- [4] F. Portillo, O. Yashchuk and É. Hermida. "Evaluation of the rate of abiotic and biotic degradation of oxo-degradable polyethylene". *Polymer Testing*, vol. 53, pp. 58-69, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.04.022>
- [5] T.F. Garrison, A. Murawski and R.L. Quirino. "Bio-based polymers with potential for biodegradability", *Polymers*, vol. 8, no. 7, pp. 262, 2016. <https://doi.org/10.3390/polym8070262>
- [6] F.M. Lamberti, L.A. Román-Ramírez and J. Wood. "Recycling of bioplastic: routes and benefits", *Journal of polymers and the Environmental*, vol. 28, no. 10, pp. 2551-2571, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01795-8>
- [7] I.S. Sidek, S.F.S. Draman, S.R.S. Abdullah and N. Anuar. "Current development on bioplastic and its future prospects: an introductory review", *INWASCON Tech Mag*, vol. 1, pp. 03-08, 2019. <http://doi.org/10.26480/itechmag.01.2019.03.08>

- [8] S. Kubowicz and A.M. Booth. "Biodegradability of plastics: challenges and misconceptions", *Environmental Science and Technology*, vol. 51, no. 21, pp. 12058-12060, 2017. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04051>
- [9] A.K. Delgado-Villaseñor y M. Maldonado-Santoyo. "Circularidad para los plásticos: Reciclado post-uso vs fabricación de plásticos biodegradables", *Revista Electrónica de Divulgación de la Investigación*, no. 21, pp. 60-70, 2021.
- [10] OCDE Environment Policy. "Improving plastics management: trends, policy responses and the role of international co-operation and trade". Background report. 2018. Disponible en: https://read.oecd-ilibrary.org/environment/improving-plasticsmanagement_c5f7c448-en#page1
- [11] J.A. Schrader, K.G. McCabe, D. Grewell and W.R. Graves. "Bioplastics and biocomposites for sustainable horticulture containers: performance and biodegradation in home compost", *Acta Horti*, vol. 1170, pp. 1101-1108, 2017. Doi: 10.17660/ActaHortic.2017.1170.142
- [12] S. Bahadur, S. Pradhan, S. Verma, R. Maurya, and S.K. Verma. "Role of plastic mulch in soil health and crop productivity" in *Climate change and its implications on crop production and food security*. Mahima publications, Varanasi, India: Editores: Rao, R.K., Sharma, P.K., Jirli, B. and Raghuraman, M., 2018, pp. 338-344. ISBN: 978-81-926935-4-5
- [13] S. Kasirajan and N. Ngouajio. "Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: a review", *Agronomy for sustainable development*, vol. 32, pp. 501-529, 2012. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0068-3>
- [14] G.C. Silva, F.M. Galleguillos, D. Hernández, G. Pincheira, A.K. Peralta, M. Urrestarazu, V. Vergara-Carmona and F. Fuentes-Peñailillo. "Microplastics and Their Effect in Horticultural Crops: Food Safety and Plant Stress", *Agronomy*, vol. 11, no. 8, pp. 1528-1545, 2021. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081528>
- [15] S. Kumar and K. Thakur. "Bioplastic-classification, production and their potential food applications", *Journal of Hill Agriculture*, vol. 8, no. 2, pp. 1128-129, 2017. Doi: HYPERLINK "<http://dx.doi.org/10.5958/2230-7338.2017.00024.6>"10.5958/2230-7338.2017.00024.6
- [16] M. Rubio-Anaya y J.A. Guerrero-Beltrán. "Polímeros utilizados para la elaboración de películas biodegradables", *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, vol. 6, no. 2, pp. 173-181, 2012.
- [17] L.J. Rodríguez, W.A. Sarache and C.E. Orrego. "Compuestos de poliéster reforzados con fibra de plátano/banano (*musa paradisiaca*) modificada químicamente. Comparación con fibra de vidrio y fique (*furcraea andina*)", *Información Tecnológica*, vol. 25, no. 5, pp. 27-34, 2014. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7376925>
- [18] H.S. Villada, H.A Acosta y R.J. Velasco. "Investigación de almidones termoplásticos, precursores de productos biodegradables", *Información Tecnológica*, vol. 19, no. 2, pp. 3-14, 2008. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642008000200002>
- [19] M. Nevoralová, M., Koutný, A. Ujcic, Z. Starý, I. Šerá, H. Vlková, M. Šlouf, I. Fortelný and Z. Kruliš. "Structure Characterization and Biodegradation Rate of Poly(ϵ -caprolactone)/Starch Blends", *Front. Mater*, vol. 7, pp. 141, 2020 Doi: 10.3389/fmats.2020.00141
- [20] A.J. Barrios, S. García, R. Manríquez-González, J.J. Rivera y M.G. Lomelí. "Compósitos biodegradables elaborados a partir de almidón termoplástico y partículas de madera de fresno", *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, vol. 6, no. 28, pp. 26-41, 2015. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322015000200003&script=sci_arttext
- [21] G. León-Méndez, D. León-Méndez, M.R. Monroy-Arellano, S. Espriella-Angarita y A. Herrera-Barros. "Modificación química de almidones mediante reacciones de esterificación y su potencial uso en la industria cosmética", *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, vol. 39, no. 5, pp. 620-629, 2020. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4263365>
- [22] R. Shi, Z. Zhang, Q. Liu, Y. Han, L. Zhang, D. Chen and W. Tian. "Characterization of citric acid/glycerol coplasticized thermoplastic starch prepared by melt blending", *Carbohydrate polymers*, vol. 69, no. 2, pp. 748-755, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.02.010>
- [23] W. Brooke Zhao. "Starch" in *Polymer Data Handbook*. Editor: James E. Mark, University of Cincinnati, USA: Published by Oxford University Press, 1999, pp. 975-979
- [24] A.A. Ledesma-Ugasiña, V.M. Dalgo-Flores, L.M. Flores-Fiallos y G.C. Chango-Lescano. "Bioplásticos de almidón de maíz y quinoa para uso como envolturas alimenticias biodegradables", *Dom. Cien.*, vol. 7, no. 4, pp. 39-56, 2021. Doi: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v7i4.2080>
- [25] O.O. Oluwasina, B. P. Akinyele, S.J. Olusegun, O.O. Oluwasina and N.D.S. Mohallem. "Evaluation of the effects of additives on the properties of starch-based bioplastic film", *SN Applied Sciences*, vol. 3, pp. 421, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04433-7>

- [26] E. Jalalvandi, R.A. Majid and T. Ghanbari. "Processing, morphological, thermal and absorption behavior of PLA/thermoplastic starch/montmorillonite nanocomposites". *International Journal of material and Metallurgical Engineering*, vol. 6, no. 12, pp.1128-1132, 2012. HYPERLINK "<https://doi.org/10.5281/zenodo.1080654>"doi. org/10.5281/zenodo.1080654
- [27] V.A. Alvarez and A. Vázquez. "Thermal degradation of cellulose derivatives/starch blends and sisal fibre biocomposites", *Polymer Degradation and Stability*, vol. 84, no. 1, pp. 13-21, 2004. Doi: 101016/j.polyimdegradstab.2003.09.003
- [28] P. Meza, L. Quipuzco y V. Meza. "Elaboración de bioplásticos y determinación de su biodegradabilidad-Proyecto de laboratorio", *Rev. del Instituto de Investigación FIGMMG-UNMSM*, vol. 22, no. 43, pp. 67-80, 2019. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v22i43.16691>
- [29] K. Ezzeroug, N. Moulai-Mostefa and A. Hadjsadok. "Rheology, dynamic light scattering and physicochemical characterization of octenyl succinic anhydride (OSA) modified starch in aqueous solutions", *Journal. of Food Science Technology*, vol. 55, no. 11, pp. 4485-4491, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3377-6>

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.