

Characterization of biodegradable polymers nanocomposites made from tuber starches such as cassava and otoi, reinforced with yerba mate nanoparticles

Abstract– The development of materials based on natural materials has gained relevance in recent decades, due to the impact they can generate as an alternative to the sustainable reduction of environmental pollution. Currently, biodegradable polymers based on natural starches are used in the manufacture of single-use products. This research focuses on the continuity of the study entitled “Manufacture of starch-based polymers from selected Panamanian tubers”, with the objective of characterizing biodegradable polymers based on starch obtained from Panamanian tubers. The objective was to characterize biodegradable polymers based on starch obtained from Panamanian tubers, such as cassava (*Manihot esculenta* Crantz) and otoi (*Xanthosoma* spp), reinforced with yerba mate nanoparticles, through tests including water vapor permeability, thermogravimetric analysis, stress test and biodegradation test. To achieve this objective, bioplastic sheets were fabricated using the solvent-casting technique. The starch polymeric matrix was plasticized with 25% (AL1) and 35% (AL2) w/w glycerol and the plasticized composition with 25% glycerol was reinforced with 1% (AL3) w/w of yerba mate nanoparticles. The results obtained when evaluated and analyzed demonstrate the functionality of the compositions studied, since they exhibit remarkable resistance and are biodegradable, which offers a viable solution for the manufacture of products from natural sources.

Keywords– Starch, biodegradation, bioplastic, mechanics.

Caracterización de nanocomposites poliméricos biodegradables hechos de almidón derivado de tubérculos como la yuca y otoo reforzado con nanopartícula de yerba mate

Virna Montenegro¹, Marina P. Arrieta², Nacarí Marín-Calvo³

^{1,3}Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, virna.montenegro@utp.ac.pa, nacari.marin@utp.ac.pa

²Universidad Politécnica de Madrid, España, marina.arrieta@upm.es

Abstract– El desarrollo de materiales en base a materiales naturales ha tomado relevancia en las últimas décadas, debido al impacto que pueden generar como alternativa a la reducción sostenible de la contaminación ambiental. En la actualidad, polímeros biodegradables a base de almidones naturales son empleados en la fabricación de productos de un solo uso. Esta investigación se enfoca en dar continuidad al estudio titulado “Fabricación de polímeros a base de almidón de tubérculos panameños seleccionados”, con el objetivo de caracterizar polímeros biodegradables a base de almidón obtenido de tubérculos panameños, como es el caso de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y el otoo (*Xanthosoma spp*), reforzado con nanopartículas de yerba mate, mediante ensayos dentro de los que se incluyen la permeabilidad al vapor de agua, análisis termogravimétrico, ensayo de tensión y ensayo de biodegradación. Para lograr este objetivo, se fabricaron láminas de bioplástico mediante la técnica de solvent-casting. La matriz polimérica de almidón se plastificó con glicerol al 25%(AL1) y 35% (AL2) p/p y a la composición plastificada con un 25% de glicerol se reforzó con un 1% (AL3) p/p de nanopartículas de yerba mate. Los resultados obtenidos al ser evaluados y analizados demuestran la funcionalidad de las composiciones estudiadas, puesto que exhiben una resistencia notable y son biodegradables, lo que ofrece una solución viable para la fabricación de productos a partir de fuentes naturales.

Palabras clave-- Almidón, biodegradación, bioplástico, mecánica.

I. INTRODUCCIÓN

El ser humano es responsable de desechar el 80% de la basura que se encuentra en el mar, siendo más del 75% de esta basura plásticos asociados principalmente a envolturas de alimentos y bebidas [1]. Estos plásticos atraviesan un ciclo de vida de cientos de años, y con el tiempo se descomponen en microplásticos, convirtiéndose en fragmentos que miden menos a 5 mm, pero aun así continúan siendo perjudiciales para el medio ambiente [1][2]. Se proyecta que para el año 2050, habrá más plástico que peces en el mar, y las aves se verán afectadas por la ingesta de microplásticos, lo que podría llevar a la desaparición de especies [2].

Elevadas cantidades de plástico se consumen cada año, que se convierten en basura. Sin un manejo adecuado, la basura termina en océanos, ecosistemas terrestres y vertederos. Estos últimos representan un riesgo sanitario inminente debido

a las prácticas de incineración, que liberan una multitud de partículas tóxicas al ambiente, afectando la salud humana [3].

Los plásticos derivados del petróleo son extremadamente persistentes en el medio ambiente, tardando miles de años en descomponerse. Un ejemplo de esto, son las bolsas de plástico, las que pueden permanecer en la tierra cientos de años, contribuyendo así a la acumulación de residuos no biodegradables en el planeta [3].

En Panamá, más del 19% de la basura consiste en plásticos, de los cuales solo el 5% se maneja de manera adecuada. El creciente reconocimiento de los daños irreversibles causados por los plásticos petroquímicos ha llevado a investigadores y autoridades gubernamentales en Panamá y el todo el mundo, a buscar alternativas más amigables con el medio ambiente [4].

Una de las alternativas que se presenta para la reducción del consumo de productos plásticos se refiere al desarrollo de bioplásticos de origen natural, que tienen una vida útil más corta y, al descomponerse, provocan menor impacto en el ambiente [5]. Los bioplásticos elaborados a partir de almidón de tubérculos panameños, como la yuca (*Manihot esculenta*) y el otoo (*Xanthosoma sagittifolium*), representan una alternativa ecológica y viable frente a los plásticos derivados del petróleo [6][7]. Estos almidones son biodegradables, renovables y de fácil obtención, lo que reduce el impacto ambiental asociado a su producción y disposición final [6]. Además, su procesamiento no requiere de tecnologías altamente especializadas, lo que facilita su fabricación a nivel local y fomenta el aprovechamiento de materias primas propias de la región, generando oportunidades de desarrollo económico en comunidades agrícolas [8][9][10]. El uso de tubérculos en la elaboración de bioplásticos también permite transformar productos agrícolas de bajo valor comercial o excedentes de cosecha en materiales útiles para aplicaciones industriales, lo que contribuye a disminuir el desperdicio de alimentos y a fortalecer una economía circular en el país [8][9][23]. El objetivo de esta investigación es continuar la investigación previa titulada “Fabricación de polímeros a base de almidón de tubérculos panameños seleccionados” donde se sientan las bases de la fabricación de la lámina y para esta investigación se busca caracterizar mediante ensayo mecánico, análisis termográfica y biodegradación el polímero biodegradable hechos a base de almidón de tubérculos como la

yuca y otoo, reforzado con nanopartícula de yerba mate (provenientes de desechos de postconsumo), considerando la viabilidad de su fabricación y uso en Panamá [6][7][10][22].

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Entre los materiales usados en esta investigación se contempla el almidón de tubérculos como la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y el otoo (*Xanthosoma* spp) de cosechas panameña, específicamente de la provincia de Los Santos, distrito de Tonosí, glicerol con 99 % de pureza (Panreac Química Sau, Barcelona, España) y residuos de yerba mate (*Ilex Paraguariensis*) (Tragüi, Argentina) recolectado en el laboratorio de Química I, de Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid.

A. Extracción del almidón

En este proceso se lavan los tubérculos (yuca, otoo) y se les retira la cáscara. Luego se rayan para ser licuado a proporción de 1 ml por cada gramo de tubérculo sin cáscara. El líquido obtenido, se encuentra el almidón y agua se deja sedimentar por 24 horas. Trascurrido este tiempo se descarta el agua y se deja secar el sedimento a temperatura ambiente para obtener el almidón en polvo [6].

B. Extracción de nanopartículas presentes en residuos de yerba mate

Para la materia prima se utilizan residuos de Yerba Mate Tragüi, originaria de Argentina y obtenidas después del consumo de la infusión en el laboratorio de Química I de la de Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales Universidad Politécnica de Madrid (ETSII-UPM), se coloca por 24hr en la estufa a 40 °C para retirarle la humedad. La mezcla de la infusión es de 3g de yerba mate en 100 mL de agua destilada esto se coloca en un matraz de fondo redondo y se coloca en baño de aceite hasta alcanzar el reflujo con agitación magnética de 1000 rpm por 60 minutos. Posterior a este tiempo se retira el calor y se deja enfriar hasta alcanzar temperatura ambiente, para entonces ser filtrado con papel Whatman de Grado 41. El proceso de filtrado se hace dos veces con el mismo tipo de papel de filtro para eliminar el sedimento. El líquido filtrado se coloca en viales que luego son congelados para ser sometidos al proceso de liofilización y se obtiene el polvo que contiene las nanopartículas [10].

C. Fabricación de películas de bioplástico

Las composiciones se plastifican con glicerol (G) en un 25% (AL1) y 35% (AL2) p/p (tabla 1). La composición de 25% de G, es reforzado con un 1% (AL3) p/p de nanopartículas de yerba mate [2][6]. Se disuelve la mezcla en 100 mL de agua y se coloca en agitación magnética a 400 rpm en baño hasta alcanzar 72°C tardando 40 minutos para obtener el punto de gelatinización.

Mediante el proceso de *solvent-casting* se obtiene las láminas de bioplástico, posterior de lo colocarlas en placas Petri y dejarlas en estufa a 60 °C por 24 horas para eliminarle el exceso de agua [9][10][11].

Tabla 1. Composiciones estudiadas

Material	AL1	AL2	AL3
Glicerol (g)	1.25	3.75	1.23
Almidón (g)	1.75	3.25	3.72
Agua destilada (ml)	100	100	100
Nanopartículas de Yerba Mate (g)	--	--	0.05

D. Análisis de permeabilidad al vapor de agua

Para analizar el índice de permeabilidad al vapor de agua (WVP) se emplea el método en base a la norma ASTM E96. Esta indica que se deben colocar láminas de material en celdas de permeación de aluminio que crean una diferencia de humedad entre los espacios. Estas muestras son colocadas dentro de una cámara con temperatura y humedad controlada (25°C y humedad relativa de 74%), con solución salina. humedad entre los espacios. Dentro de las celdas se colocan 2g de sílica gel. Se hace por triplicado el ensayo para cada muestra. La ecuación utilizada:

$$WVP = \frac{W}{tA} \frac{e}{\Delta p} \quad (1)$$

WVP corresponde la permeabilidad del vapor de agua ($\text{g mm m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$); W es la cantidad de masa que atraviesa la lámina (g); e el espesor de lámina (mm); A área de permeabilidad; t es el tiempo de ensayo (h) y Δp es la diferencia de presión entre los espacios que están en contacto con la lámina (kPa). Se registra el peso cada hora hasta las primeras 9 horas y una última a las 24 horas [10][13].

F. Análisis termogravimétrico (TGA)

Durante el análisis termográfico se somete el material a altas temperaturas y se registra a través del tiempo la variación de la masa.

Para esta investigación se utilizó el equipo TGA de TA instrument disponible en laboratorio de química I de la ETSII-UPM, en donde se analizaron muestras de los almidones, glicerol, nanopartículas de yerba mate y las películas de cada composición. La cantidad de material ensayado es 10-15mg. El material se calienta en modo dinámico de 30°C hasta 700°C a una velocidad de 10°C/min y se utiliza nitrógeno para crear la atmósfera inerte, con un flujo de 30mL/min. Al encontrarse a altas temperatura se va evaporando el o los componentes registrando así la temperatura de inicio de degradación (T_0). Para el estudio se analiza la máxima temperatura (T_{max}) al degradarse el 10% de la masa inicial [10][11].

G. Prueba mecánica

Los ensayos mecánicos de tracción se llevan a cabo con la máquina universal Shimadzu Autograph AGS-X 100N (Koyoto, Japón) disponible en el laboratorio de química I de la ETSII-UPM. La celda de carga utilizada es de 50N. Las probetas ensayadas son tipo 1BB de acuerdo con la norma ISO 527-2 con una longitud de 20mm, estas son elaboradas con el troquel hidráulico JBA (Barcelona, España) [6][7][14].

H. Desintegración por compostaje

Las películas fabricadas se desintegran en compostaje a escala de laboratorio bajo la norma ISO 20200. Las dimensiones de la muestra (15 mm ×15mm) se pesan. Luego son enterradas a 40-60mm, en recipientes de plásticos con orificios. Dentro se encuentra la mezcla de los siguientes residuos sólidos: 10% de compost, 10% de almidón de maíz, 30% de comida para conejo, 4% de aceite de girasol, 5% de azúcar, 1% urea y 40% serrín y se le agrega un 50% de agua. Luego se coloca en un entorno anaeróbico a 60°. Al encontrarse las películas dentro de este entorno de desintegración se extraen a diferentes tiempos (0.5, 1, 2, 4, 22, 24, 48, 72, 98 y 120 horas), se dejan secar en una estufa a 37°C durante 24 h y se registra el peso. Los resultados se registran por fotografías y cálculo del porcentaje de pérdida de masa a través del tiempo [10].

III. RESULTADOS

A. Fabricación de película de bioplástico

Con el método de *solvent-casting* se obtienen las láminas de bioplástico que posteriormente se le realizan las pruebas de caracterización [6]. Los resultados obtenidos para las láminas que solo contienen almidón tienen un aspecto transparente observar la figura 1. Y las composiciones que contenían el 1% de yerba mate se tornan de color verde oscuro ver figura 2.



Figura 1. Lámina de bioplástico AL1.



Figura 2. Lámina de bioplástico AL3.

B. Análisis de permeabilidad al vapor de agua

En la Figura 3 se muestra las formulaciones AL1 y AL2 en relación con la permeabilidad al vapor de agua. Se observa que la formulación AL2, que contiene una mayor concentración de glicerol, muestra un incremento en la permeabilidad en comparación con AL1. Este comportamiento se debe al efecto plastificante del glicerol, que al estar en mayor proporción reduce las interacciones intermoleculares en la matriz polimérica, aumentando la flexibilidad y disminuyendo la densidad. Como consecuencia, se generan trayectorias más accesibles para el paso de moléculas de agua y una estructura con mayor afinidad hacia la humedad, esto debido a la naturaleza higroscópica del glicerol [11] [12].

En la Figura 4 se presentan los valores de permeabilidad al vapor de agua obtenidos para las formulaciones AL3 con respecto a las muestras AL1. En estas muestras, la concentración de glicerol se mantuvo constante, mientras que se incorporó un 1% de nanopartículas de yerba mate a las matrices AL3. Los resultados de la formulación con almidón de otoi muestran una disminución en la permeabilidad, en comparación con la matriz sin refuerzo. Este comportamiento sugiere que la incorporación de nanopartículas favoreció la formación de una estructura más compacta, donde las partículas actúan como una barrera física que dificulta la difusión de las moléculas de agua a través de la matriz polimérica. Este efecto ha sido reportado previamente por diversos autores, quienes señalan que la incorporación de nanopartículas puede reducir la permeabilidad al generar trayectorias más tortuosas para el transporte de vapor, aumentando la resistencia de la matriz [13][14].

Sin embargo, en la formulación elaborada con almidón de yuca, bajo las mismas condiciones de plastificación y nanopartículas, se observó un comportamiento opuesto, evidenciando un aumento en la permeabilidad al vapor de agua. Esta diferencia podría deberse a la naturaleza de cada tipo de almidón, ya que factores como la organización molecular, la morfología de la red polimérica y la interacción matriz-refuerzo influyen directamente en la capacidad de las nanopartículas para ejercer un efecto barrera efectivo [14]. Es posible que, en la matriz de yuca, las nanopartículas no hayan logrado una dispersión homogénea o que la afinidad química entre las fases no fuera suficiente para reducir la permeabilidad, tal como también ha sido descrito en otros estudios donde la eficiencia de refuerzo depende en gran medida de la compatibilidad entre la matriz polimérica y el aditivo incorporado [13].

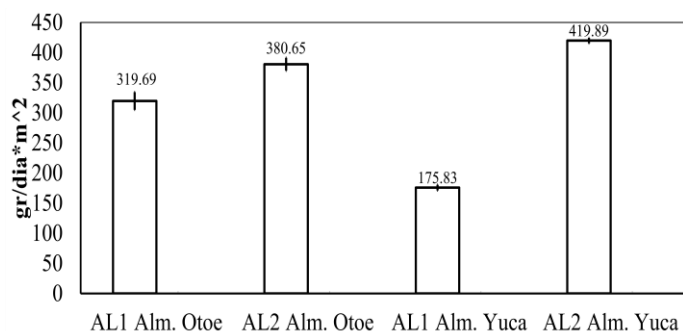


Figura 3. Permeabilidad al vapor de agua de las composiciones AL1 y AL2.

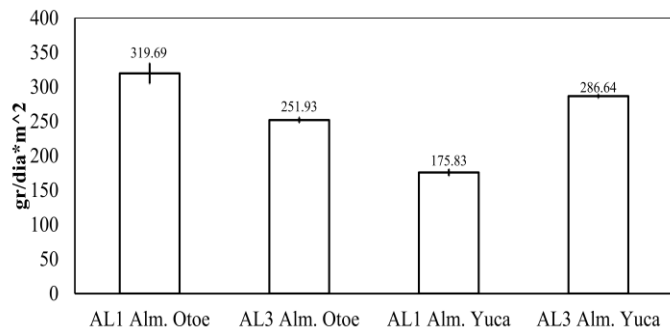


Figura 4. Permeabilidad al vapor de agua de las composiciones AL1 y AL3.

C. Análisis termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico (TGA) de las muestras de almidón de yuca y otoe, plastificadas con glicerol y nanopartículas de yerba mate, permite observar diferencias en su estabilidad térmica. Se observa en las curvas del TGA pérdida de peso inicial por debajo de los 200 °C ver figura 5, esto puede deberse a la evaporación del agua, un fenómeno común en materiales como los almidones [15].

La etapa principal de degradación térmica, observada entre los 280 °C y 350 °C, donde se da la ruptura de enlaces glicosídicos y descomposición de la estructura polisacárida. Este comportamiento es reportado en la literatura de biopolímeros derivados del almidón [15], [16].

Se observa que el plastificante (glicerol) reduce significativamente la temperatura de degradación. Este comportamiento se debe a que el glicerol, incrementa la movilidad de las cadenas poliméricas, disminuyendo el enlace de las moléculas facilitando la descomposición térmica [16]. Este efecto fue más notorio en la formulación AL2, la cual contenía una mayor concentración de glicerol.

Por el contrario, la incorporación de nanopartículas de yerba mate (AL3) mejoró la resistencia térmica del sistema. Este resultado muestra que las nanopartículas actúan como agentes reforzantes, formando posibles interacciones físicas o químicas con la matriz polimérica, restringiendo la movilidad de las cadenas y retardando la descomposición térmica [16].

Estos resultados son comparables con otros estudios donde el uso de nanopartículas naturales como refuerzo en matrices de almidón ha demostrado mejorar la resistencia térmica [17].

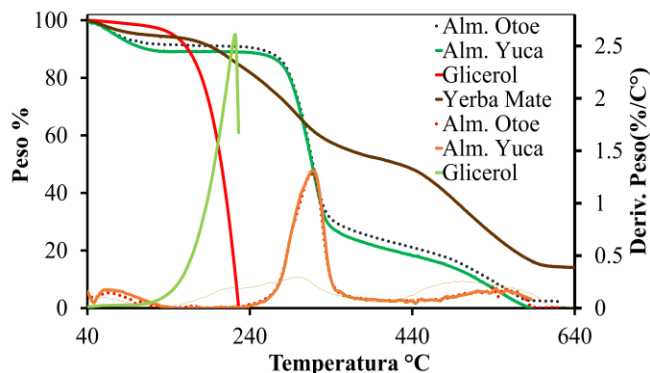


Figura 5. TGA de la materia prima.

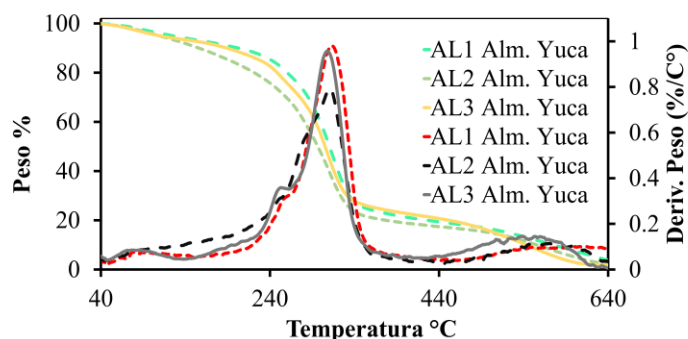


Figura 6. TGA de las composiciones AL1, AL2 y AL3 para el almidón de yuca.

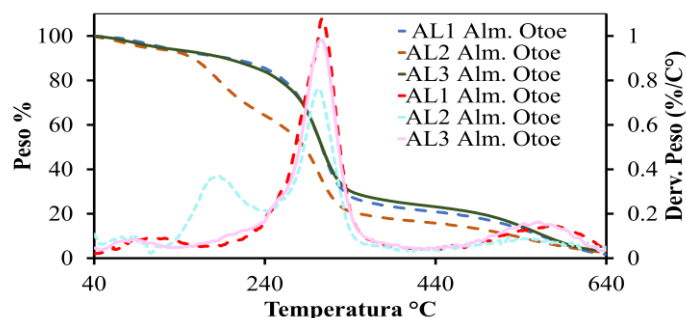


Figura 7. TGA de las composiciones AL1, AL2 y AL3 para el almidón de otoe.

D. Ensayo de Tracción

Los ensayos mecánicos de tracción permitieron obtener los valores de resistencia, elongación y módulo de Young realizados a cada una las composiciones que se muestran en la figura 8. Se observa que la composición con mayor cantidad de glicerol AL2 y menor contenido de almidón presenta una resistencia a la tracción menor y la deformación en el punto de fractura aumenta, indicando que el aumentar la cantidad de plastificante las fuerzas intermoleculares, como lo es el

de hidrógeno le da características flexibles y con menor resistencia ver figura 8. Las composiciones que contiene mayor cantidad de almidón AL1 y menor porcentaje de glicerol tienen un punto de fractura más alto obteniendo un 232%, teniendo una resistencia a la tracción muy baja. En cuanto a las composiciones AL3 ver figura 9 se mantienen las mismas características y se nota aumento en la resistencia a la tensión a las composiciones de almidón de yuca [10][17].

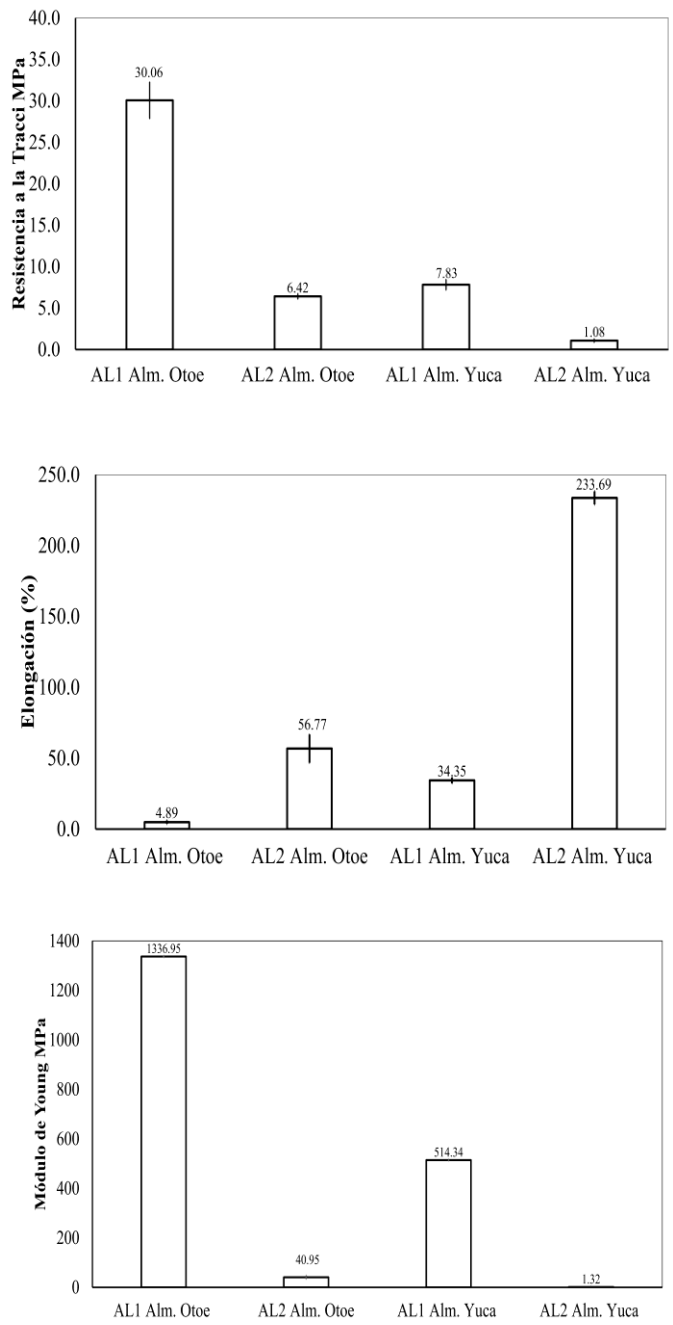


Figura 8. Propiedades mecánicas de las composiciones AL1 y AL2.

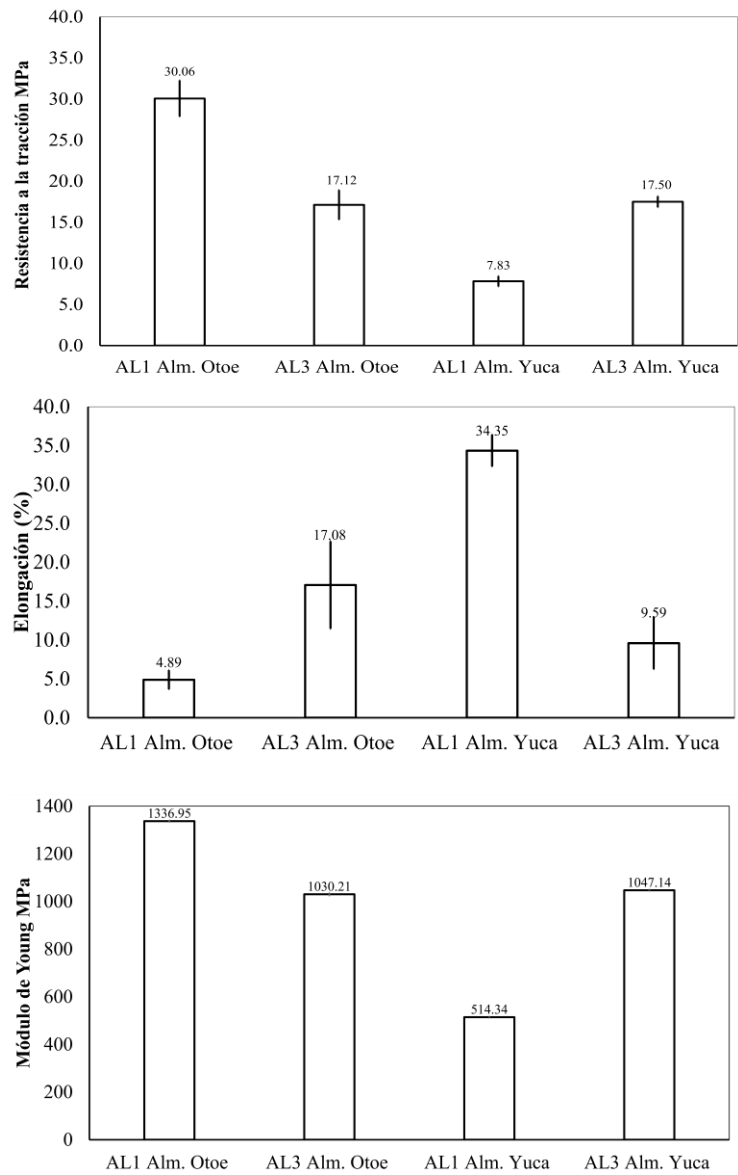


Figura 9. Propiedades mecánicas de las composiciones AL1 y AL3.

E. Desintegración en compostaje

Los resultados obtenidos del estudio de compostabilidad evidencian un comportamiento de desintegración uniforme en todas las composiciones analizadas. Tras 120 horas de exposición en condiciones controladas de compostaje, cada una de las matrices poliméricas mostró una pérdida de masa cercana al 90% respecto a su peso inicial. Este análisis se llevó a cabo conforme a los lineamientos establecidos por la norma ISO 20200, la cual establece que un material puede ser considerado biodegradable si alcanza una pérdida mínima del 90% de su masa original bajo condiciones específicas de ensayo [18]. La Figura 10 presenta la gráfica de

desintegración, reflejando el comportamiento de cada composición a lo largo del tiempo. En la Figura 11 se muestra el registro fotográfico del estado físico de los materiales en el ensayo, evidenciando una desintegración casi total de las muestras. Estos resultados confirman que las composiciones desarrolladas poseen un alto grado de biodegradabilidad, lo que refuerza su potencial como materiales sostenibles [19].

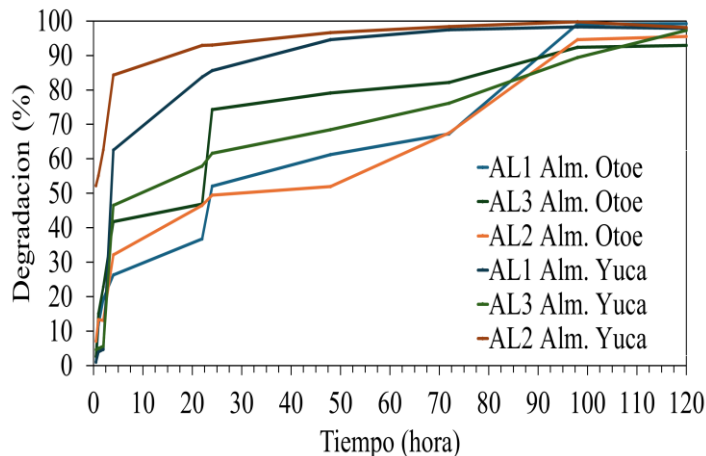


Figura 10. Pérdida de masa de las composiciones por hora.

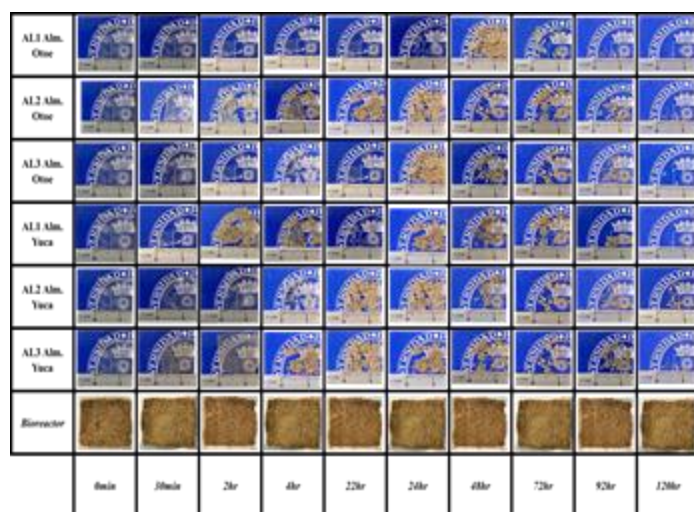


Figura 11. Desintegración de las composiciones por horas.

IV. CONCLUSIÓN

Mediante esta investigación se verifica la variable de extracción del almidón de los tubérculos de yuca y otoe se obtiene las cantidades de almidón necesarias para el desarrollo de las láminas de polímero biodegradable. Esto también sucede con la extracción de la nano partícula de yerba mate.

El aspecto de las láminas de bioplástico es transparente, a excepción de las que contienen el 1% de nanopartícula de yerba mate se tornan de color verde oscuro.

Con el análisis de los resultados del TGA se verificar la variabilidad de estabilidad térmica, manteniéndose las temperaturas dentro de los rangos 150-250 °C para las distintas concentraciones.

Luego de evaluar los resultados de ensayo de tensión se determina que, a menor cantidad de plastificante, mayor resistencia a la tracción, pero la elongación disminuye.

El material al estar en un ambiente de compostaje pierde hasta un 90% de su masa inicial indicando que es un material biodegradable.

Finalmente se obtiene un material con alto potencial para ser utilizado en aplicaciones de un solo uso, que se debe continuar evaluando para determinar su vida útil.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Esta investigación ha sido financiada por el proyecto PID2021-123753NA-C32 del Ministerio de Ciencia e Innovación de España MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 y por ERDF, una manera de hacer Europa. Agradezco a la Dirección de Relaciones Internacionales y la SENACYT por la oportunidad de participar en la convocatoria de movilidad de investigación. De igual manera a Ángel Agüero y Simón Fabra por su disposición en la ayuda del desarrollo de las pruebas de caracterización en la Universidad Politécnica de Madrid. Al compañero de investigación previa el Ing. José Rodríguez.

REFERENCIAS

- [1] Slav, I. (2019) How much crude oil does plastic production really consume?. Recuperado de: <https://oilprice.com/Energy/Energy-General/How-Much-Crude-Oil-Does-Plastic-Production-Really-Consume.html#:~:text=Most%20of%20the%20natural%20gas,percent%20of%20global%20oil%20production>. Consultado el 31 de enero de 2024
- [2] Shafqat, A., Tahir, A., Mahmood, A., & Pugazhendhi, A. (2020). A review on environmental significance carbon foot prints of starch based bio-plastic: A substitute of conventional plastics. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 101540. doi:10.1016/j.bcab.2020.101540
- [3] Suyama, T., et al., (2020)"Ph 6,Noylogenetic affiliation of soil bacteria that degrade aliphatic polyesters available commercially as biodegradable plastic", (p. 3-4). Recuperado de: <http://www.sciencepublishinggroup.com/j/nano>. Consultado el 3 de octubre de 2024
- [4] Marivit, E. (2019) Panamá recicla el 5% de sus desechos; un país sin economía circular. La Prensa. Recuperado de: https://www.prensa.com/economia/Residuos-Reciclaje-Economia_Circular_0_5409959004.html. Consultado el 30 de enero de 2024
- [5] Secretaria Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT) (2020). Plan Estratégico Nacional de Ciencias, Tecnología e Innovación (PENCIYT) 2019-2024. Panamá
- [6] Rodríguez J., Montenegro V. & Marín N. (2021). Fabricación de polímeros a base de almidón de tubérculos panameños seleccionados. *Universidad Tecnológica de Panamá*, 55-78. Disponible en: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/338/3383062004/>.
- [7] K. Navarro, "Obtención de polímeros biodegradables a partir del almidón de yuca," *MQR, Ciencia y Tecnología*, vol. 5, no. 1, pp. 1-11, 2021. Disponible en: <https://www.investigarmqr.com/ojs/index.php/mqr/article/view/285>
- [8] A. Paredes Vega, "Propuesta de elaboración de bioplástico en base a almidón de yuca," Tesis de Licenciatura, Universidad Continental, 2020.

- Disponible en:
https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/12438/2/V_FIN_108_TI_Paredes_Vega_2020.pdf
- [9] Y. López y J. Carhuancho, "Bioplásticos: Una alternativa para reducir la contaminación," *Revista T'ikarinay*, vol. 1, no. 2, pp. 76-85, 2021. Disponible en:
<https://revistas.unat.edu.pe/index.php/RevTaya/article/download/220/207>
- [10] M.P. Arrieta, L. Peponi, D. López, M. Fernández-García M. Recovery of yerba mate (*Ilex paraguariensis*) residue for the development of PLA-based bionanocomposite films. *Industrial Crops and Products*. 2018, 111, pp. 317-328
- [11] K. Navarro, "Obtención de polímeros biodegradables a partir del almidón de yuca," *MQR, Ciencia y Tecnología*, vol. 5, no. 1, pp. 1-11, 2021. Disponible en:
<https://www.investigarmqr.com/ojs/index.php/mqr/article/view/285>
- [12] A. Paredes Vega, "Propuesta de elaboración de bioplástico en base a almidón de yuca," Tesis de Licenciatura, Universidad Continental, 2020. Disponible en:
https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/12438/2/V_FIN_108_TI_Paredes_Vega_2020.pdf
- [13] Y. López y J. Carhuancho, "Bioplásticos: Una alternativa para reducir la contaminación," *Revista T'ikarinay*, vol. 1, no. 2, pp. 76-85, 2021. Disponible en:
<https://revistas.unat.edu.pe/index.php/RevTaya/article/download/220/207>
- [14] A. González, M. Rojas, and L. S. De Vargas, "Water sorption and glass transition in starch films: Influence of plasticizers and humidity," *Carbohydr. Polym.*, vol. 76, no. 2, pp. 313–318, 2009.
- [15] M. S. Talja, M. H. Tapala, and L. H. R. Serimaa, "Effect of heat treatment on the physicochemical properties and thermal behavior of starch-based films," *Food Hydrocoll.*, vol. 21, no. 3, pp. 446–453, 2007.
- [16] M. M. S. Lima et al., "Effects of yerba mate nanoparticles on starch-based films: thermal and mechanical behavior," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 145, pp. 776–784, 2020.
- [17] E. Espinoza-Acosta, D. Torres-Chávez, and A. Ramírez-Wong, "Reinforcement of thermoplastic starch films with plant-derived nanoparticles," *Food Packag. Shelf Life*, vol. 24, pp. 100471, 2020.
- F. Xie, E. Pollet, and L. Avérous, "Biodegradable blends of starch and polyesters: a review," *Polym. Int.*, vol. 59, no. 7, pp. 835–855, 2010.
- [18] N. Rhim, H. Wang, "Preparation and characterization of agar/arginate/clay nanocomposite films: Comparison of physical, mechanical, and barrier properties," *Carbohydrate Polymers*, vol. 86, no. 2, pp. 691–699, 2011. Disponible en: doi: 10.1016/j.carbpol.2011.04.056.
- [19] R. T. Rosa, C. A. de Carvalho Benévolu Lugão, P. S. S. de Souza, y A. G. Fakhouri, "Effect of cellulose nanocrystals from yerba mate (*Ilex paraguariensis*) on the properties of cassava starch films," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 149, pp. 751–759, 2020. Disponible en: doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.01.257.
- [20] M. Paluch, J. Ostrowska, P. Tyński, et al., "Structural and Thermal Properties of Starch Plasticized with Glycerol/Urea Mixture," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 30, pp. 728–740, 2022.
- [21] C. Medina Jaramillo, T. J. Gutiérrez, S. Goyanes, C. Bernal, and L. Famá, "Biodegradability and plasticizing effect of yerba mate extract on cassava starch edible films," *Carbohydrate Polymers*, vol. 151, pp. 150–159, 2016.
- [22] Mali, S., Grossmann, M. V. E., Garcia, M. A., Martino, M. N., & Zaritzky, N. E. (2002). Microstructural characterization of yam starch films. *Carbohydrate Polymers*, 50(4), 379-386.
- [23] García, A. V. (2015). Obtención de un polímero biodegradable a partir de almidón de maíz. I ed. San Salvador, El Salvador: ITCA. Consultado: 03 de octubre de 2021.
- [24] Wondemu Bogale Terseme. Review on the Manufacturing of Biodegradable Plastic Packaging Film from Root and Tuber Starches. *American Journal of Nano Research and Applications*. Vol. No. 1, 2020, pp. 4-5. doi: 10.11648/j.nano.20200801.11. Consultado el: 03 de octubre de 2021.
- [25] Fundación Marea Verde (2019) Caracterización de la descarga de macro-plásticos y otros residuos sólidos flotantes post-consumo en la Bahía de Panamá por el Río Matías Hernández. Recuperado de:
<https://www.mareaverdepanama.org/proyecto-5#:~:text=Barrera%20o%20basura&text=B.O.B%20es%20una%20barra%20flotante,la%20recolecci%C3%B3n%20de%20los%20mismos.>
 Consultado el 6 de septiembre de 2024.
- [26] Instituto Nacional de la Yerba Mate – (INYM), 2016. <http://www.inym.org.ar>.
- [27] UNE-EN, "53097 Materiales en forma de hoja. Determinación del índice de transmisión de vapor de agua. Método gravimétrico (método de la cápsula)," 2002. [En línea]. Disponible:
<https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0026745>. Consulta: 21 de junio de 2024.
- [28] International Standards Organization, "ISO 527-1:2012 - Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles." 2012.