

Efecto de arcilla Montmorillonita K10 como refuerzo mecánico en almidón termoplástico de yuca.

Effect of Montmorillonite K10 clay as mechanical reinforcement in thermoplastic cassava starch.

Carlos Julian Noguera-Guayacan¹, Alejandra María Fernández-Solarte², Jorge Armando Villalba-Vidales³

^{1,2,3}Fundación Universitaria Los Libertadores, Bogotá D.C - Colombia

ORCID: ¹[0000-0002-6194-1395](https://orcid.org/0000-0002-6194-1395), ²[0000-0003-2496-9986](https://orcid.org/0000-0003-2496-9986), ³[0000-0001-6921-0565](https://orcid.org/0000-0001-6921-0565)

Recibido: 19 de abril de 2022.

Aceptado: 16 de agosto de 2022.

Publicado: 01 de septiembre de 2022.

Resumen- Una amplia gama de productos plásticos de origen petroquímico se encuentran en el mercado debido a sus buenas propiedades mecánicas y bajo costo, sin embargo, es de conocimiento público el alto impacto negativo que estos materiales están ocasionando en el medio ambiente que terminan afectando la vida biológica en todo aspecto. Es así, que la búsqueda de nuevas alternativas que permitan sustituir dichos plásticos se ha convertido de interés tanto para el sector industrial como para científicos, por lo que en el presente trabajo se tuvo la iniciativa de la obtención de nanocompositos biopolímeros en forma de película delgada a partir del almidón de yuca termoplástico y arcillas tipo Montmorillonita K10, siendo esta última empleada como refuerzo mecánico del producto final. El objetivo principal de la investigación fue evaluar el efecto de la inserción de arcilla en la matriz biopolimérica sobre las propiedades mecánicas de las películas termoplásticas. La preparación de las muestras se realizó mediante el proceso de gelatinización del almidón, donde la formulación base (BPG), conocida también como matriz termoplástica se realizó con 30% en peso de glicerina (plastificante), la cual posteriormente fue reforzada con tres porcentajes de arcilla Montmorillonita K10 diferentes (MMT): 3%, 5% y 10%, denominadas BPGK-3%, BPGK-5% y BPGK-10%, respectivamente. Se midieron las propiedades mecánicas y se visualizó por microscopía óptica todas las películas termoplásticas. La formulación con mejores propiedades mecánicas fue la BPGK-5% con valores de esfuerzo máximo, alargamiento a la rotura y módulo de Young de: 1.9 Mpa, 34% y 15.3 Mpa, respectivamente, como consecuencia de la distribución de las partículas de la arcilla en la matriz termoplástica.

Palabras clave: montmorillonita, almidón, yuca, propiedades mecánicas.

Abstract— A wide range of plastic products of petrochemical origin are in the market due to their good mechanical properties and low cost, however, it is of public knowledge the high negative impact that these materials are causing in the environment that end up affecting biological life in every aspect. Thus, the search for new alternatives to replace these plastics has become of interest for both the industrial sector and scientists, so in the present work the researchers explored the initiative of obtaining biopolymer nanocomposites in the form of thin film from thermoplastic cassava starch and Montmorillonite K10 type clays, the latter being used as mechanical reinforcement of the final product. The main objective of the research was to evaluate the effect of clay insertion in the biopolymeric matrix on the mechanical properties of the thermoplastic films. The preparation of the samples was carried out by the starch gelatinization process, where the baseline formulation (BPG), also known as thermoplastic matrix, was made of glycerin (plasticizer) 30% by weight. This matrix was subsequently reinforced with three different percentages of montmorillonite K10 clay (MMT): 3%, 5% and 10%, called BPGK-3%, BPGK-5% and BPGK-10%, respectively. Mechanical properties were measured and all thermoplastic films were observed by optical microscopy. The formulation with the best mechanical properties was BPGK-5% with maximum stress, elongation at break and Young's modulus values of: 1.9 Mpa, 34% and 15.3 Mpa, respectively, as a consequence of the distribution of the clay particles in the thermoplastic matrix.

Keywords: Montmorillonite, starch, cassava, mechanical properties.

*Autor para correspondencia.

Correo electrónico: cjnoguera@libertadores.edu.co (Carlos Julian Noguera Guayacan).

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad de Santander.

Este es un artículo bajo la licencia CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Como citar este artículo: C. J. Noguera-Guayacan, A. M. Fernández-Solarte y J. A. Villalba-Vidales, "Efecto de arcilla Montmorillonita K10 como refuerzo mecánico en almidón termoplástico de yuca", *Aibi revista de investigación, administración e ingeniería*, vol. 10, no. 3, pp. 80-85, 2022. doi: [10.15649/2346030X.2989](https://doi.org/10.15649/2346030X.2989)

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existe un gran interés empresarial por el desarrollo de nuevos productos, que minimicen el efecto ambiental que generan los plásticos de origen petroquímico, debido a que estos demoran aproximadamente un promedio de 500 años para degradarse, lo que afecta la vida biológica de los ríos, océanos y silvestre, además de infiltrarse en nuestra cadena alimentaria y contribuir al cambio climático [1]. Esto ha encendido las alarmas a nivel mundial para establecer políticas y cambios respecto al uso del plástico tradicional. Así, el primer informe de La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, OCDE [2], titulado: Perspectivas Globales del Plástico, indica que, a la fecha, el mundo está produciendo el doble de residuos plásticos respecto al año 2000, en donde solo el 9% se recicla y en donde hay una proyección de triplicar el nivel de contaminación para el año 2060. Particularmente en Colombia, una investigación realizada por la Universidad de los Andes, indica que en la ciudad de Bogotá aproximadamente el 56% de la basura diaria, es desecho plástico y las cifra sigue en aumento [3], por lo que gobernantes han empezado a hallar nuevas políticas que protejan al medio ambiente, así en el año 2022 se expidió la Ley 2232 por el Congreso de la República de Colombia, en donde se busca la eliminación de plásticos de un solo uso.

Por lo anterior, investigaciones en diferentes campos se están realizadas para contribuir a la solución de este problema mundial. Así en lo que respecta a la búsqueda de nuevos materiales, la obtención de plásticos a partir de materiales renovables es un tema en auge, en donde la obtención de películas delgadas con fines de embalaje o empaques de alimentos es de interés por su uso a diario [4]. Almidones de diferentes fuentes [5], entre los que se encuentra el de maíz [6], papa [7], trigo [8] y yuca [9] [10], se han mostrado como una alternativa, por lo cual está siendo ampliamente investigado, ya que sus propiedades mecánicas aun no son comparables a los de los materiales tradicionales. En concreto, la adición de nanomateriales como arcillas a una matriz polimérica, permite optimizar algunas de estas propiedades obteniendo nanocompositos más resistentes.

Concretamente, la utilización de arcillas tipo Montmorillonita (MMT) como refuerzo mecánico [11]-[13] para la obtención de nanocompositos poliméricos, son consideradas una buena opción, debido a que este mineral cuenta con características de rigidez, flexibilidad, resistencia y estabilidad dimensional necesarias como para mejorar las propiedades del material final [14], [15]. Estructuralmente las MMT están conformadas por láminas, donde cada lámina a su vez consta de tres capas unidas: dos capas de sílice tetraédricas y en el medio de ellas una capa de alúmina octaédrica. Adicionalmente, la asociación de forma apilada de entre 20 a 30 láminas, forman las partículas de MMT, en donde el espacio generado entre cada lamina llamado interlamina, se alojan iones positivos que pueden estar hidratados, los cuales se encargan de compensar el déficit de carga estructural generado por las sustituciones isomorfas que se crean entre las capas tetraédricas y octaédricas. Este ordenamiento estructural y compensación de carga es lo que le confiere a este tipo de arcillas características hidrofílicas, alta capacidad de intercambio catiónico, capacidad de adsorción y desorción, toxicidad cero, convirtiendo a este mineral en una buena opción para ser insertado en una gran variedad de polímeros e incluso cerámicos, tales como: Polistanamida (PEA) [16], copolímero de poliuretano urea (PUU)[17], polipropileno (PP)[18], poli(hidroxibutirato) (PHB)[19], policaprolactona (PCL) [20], etc., y en lo referente a biopolímeros en: almidón de trigo[21][22][23], Polihidroxialcanoatos (PHA) [24], celulosa [25].

De esta manera, en el presente trabajo se realiza el proceso de gelatinización para la obtención de nanocompositos con diferentes cantidades de arcilla, con la finalidad de determinar el mejoramiento de propiedades mecánicas, en donde se utilizó glicerina como plastificante.

II. METODOLOGÍA O PROCEDIMIENTOS

a. *Materiales*

La obtención de almidones termoplásticos se realizó a partir de insumos biodegradables y biocompatibles. La matriz biopolimérica se obtuvo a partir de almidón grado alimenticio. Con la finalidad de mejorar propiedades de los almidones termoplásticos se empleó como plastificante Glicerina industrial, para así mejorar la elasticidad final de los nanocompuestos obtenidos; también Arcilla tipo Montmorillonita K10 marca Sigma-Aldrich, fue empleado como refuerzo mecánico.

Para el secado de las mezclas gelatinizadas se utilizaron moldes antiadherentes, lo que facilitó el desmoldé de las muestras finales.

b. *Preparación de biopolímeros termoplásticos BPG y BPGK*

Películas delgadas de biopolímero termoplástico de almidón de yuca se prepararon haciendo reaccionar soluciones de 10 g de soluto en 200 ml de solvente. Para ello se consideró la relación almidón/plastificante 70:30 en porcentaje en peso. Inicialmente se realizó una mezcla de agua destilada y almidón, la cual se agitó vigorosamente durante 15 minutos a temperatura ambiente, transcurrido dicho tiempo se procedió a adicionar el plastificante y se continuó mezclando la solución, pero a una temperatura de 100°C, esto con el fin de producir la gelatinización de la mezcla, la cual se da a 70°C. Una vez homogeneizada la mezcla, se vació en un molde de teflón donde se dejó reposar a temperatura ambiente y posteriormente se llevó a una mufla para secar la muestra de biopolímero con glicerina (BPG) a 50°C.

La preparación de los nanocompositos biopoliméricos se realizó de manera similar al procedimiento anterior, con la única diferencia de que se debió realizar dos mezclas por separado en las que se dividió el agua destilada en dos partes iguales. De esta forma, en una primera mezcla se dispersó la arcilla en el agua destilada y en una segunda se realizó la suspensión de BPG, como se indicó anteriormente. Cuando el proceso de gelatinización avanzó en la segunda mezcla, donde se observaron dos fases diferentes en la suspensión, las dos mezclas se unieron para formar una única mezcla, finalmente esta se dejó en agitación hasta completar el proceso de gelatinización.

Películas delgadas de nanocompositos biopoliméricos se obtuvieron a partir de diferentes cantidades de arcilla K10 (de 0 a 10% p/p) las cuales fueron dispersas en la suspensión de BPG. Para diferenciar los nanocompositos se empleó la nomenclatura BPGK acompañado por un número que indica el porcentaje de arcilla K10 incorporado en la matriz biopolimérica, de esta manera se obtuvieron tres composiciones en formato de película delgada; 3%, 5% y 10% de arcilla denominados BPGK-3%, BPGK-5% y BPGK-10%, respectivamente.

c. *Propiedades Mecánicas*

Las propiedades mecánicas de las diferentes películas de almidón termoplástico con y sin arcilla, fueron llevadas a cabo en una maquina universal GALBADINI Quasar 10. Las películas se mantuvieron almacenadas en condiciones ambientales (18 ± 2 °C y $53\pm 1\%$ HR) durante tres semanas. Las pruebas de tensión se realizaron siguiendo la norma ASTM D882, en donde se tomaron de 7 a 10 especímenes por cada formulación. Cada probeta fue cortada considerando que el área longitudinal a ensayar fuese de 100 mm de largo por 10 mm de ancho, adicionalmente los ensayos se realizaron a una velocidad de 50 mm/min. De esta manera, se registraron las curvas tensión-deformación de las diferentes películas y se midió la resistencia a la tracción, deformación y módulo de Young.

d. *Microscopía óptica*

Las diferentes películas termoplásticas fueron caracterizadas mediante el uso del microscopio óptico Olympus GX41, con la finalidad de observar estructuralmente la dispersión de la arcilla en la matriz biopolimérica.

III. RESULTADOS ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

1. *Propiedades de resistencia a la tracción de las películas.*

El esfuerzo máximo para cada una de las formulaciones se muestra en la Figura 1, estos valores medio reflejan la mayor tensión soportada por el material durante el ensayo de tracción. La matriz BPG, correspondiente al biopolímero puro, muestra un valor medio de 1,3 MPa mientras que los nanocompositos BPGK, aquellos que contienen arcilla, muestran un valor de 1,8, 1,9 y 1,68 MPa para las formulaciones BPGK-3%, BPGK-5% y BPGK-10%, respectivamente. Estos valores indican que la arcilla MMT K10 funciona como refuerzo del biopolímero termoplástico BPG, indicando un mejor rendimiento en las formulaciones con 3 y 5% de arcilla, mientras que para la formulación con 10% el esfuerzo máximo se ve disminuido. Por lo que una mayor concentración de arcilla puede generar una saturación en el biopolímero termoplástico generando una menor dispersión de las partículas de la arcilla, lo que conlleva a la formación de agregados que deterioran las propiedades mecánicas, adicionalmente la saturación de arcilla en la matriz puede producir un menor grado exfoliación en las laminillas de la montmorillonita [8].

Estudios realizados por Mina et al., [9] y Majdzadeh-ardakani et al., [8] evidencian resultados similares para el almidón termoplástico sin refuerzo, sin embargo, otros autores reportan valores más altos, entre 4-16 MPa, [26] [10], la diferencia de estos resultados entre distintas investigaciones se debe a que los almidones termoestables se degradan estructuralmente con los días, Mina et al. [10], demostró la influencia del tiempo de almacenamiento en las propiedades estructurales de un almidón termoplástico de yuca, y de su gran variación al ser almacenados los bioplásticos en tres días. Particularmente, en el presente trabajo las probetas fueron almacenadas por dos semanas, y posteriormente sometidas a pruebas de tracción, por lo que esto explicaría los bajos valores observados en las formulaciones en general.

En la Figura 2, se observa el porcentaje de deformación antes de la ruptura o alargamiento a la rotura de las diferentes películas termoplásticas. En esta se evidencia que la película con formulación BPG, correspondiente al biopolímero puro sin arcilla presenta un alargamiento del 22%, aproximadamente, mientras que las formulaciones BPGK, con arcilla, presentan una deformación a ruptura de 31, 34, y 16% para las películas BPGK-3%, BPGK-5% y BPGK-10% respectivamente. El porcentaje de Glicerina utilizado en el proceso de obtención de los termoplásticos de almidón es de importancia, Majdzadeh et al. [8], en su trabajo en almidones de maíz, papá y trigo, ha demostrado que cantidades suficientes de glicerina (hasta 15% en peso) actúa como plastificante de la matriz de almidón, mejorando adicionalmente el proceso de intercalación de la arcilla en esta. Sin embargo, una cantidad adicional de glicerina contribuye a una mayor interacción entre almidón-plastificante, provocando una mayor deformación del material. Adicionalmente, Tarique et al. [27], explica los cambios estructurales que se producen con un alto contenido de plastificante (de 15% o más). Particularmente, el 30% en peso de glicerina empleado en esta investigación favorece las interacciones almidón-plastificante evidenciando un alargamiento a la ruptura significativo para todas las formulaciones, sin embargo, la adición de 3 y 5% de arcilla a la matriz polimérica ha generado un incremento de éste.

El módulo de young de las diferentes formulaciones se ilustra en la Figura 3, su valor medio está en 10, 15,8, 15,3 y 16,5 MPa, para las películas termoplásticas de composiciones BPG, BPGk-3%, BPGk-5% y BPGK-10%, respectivamente. Estos valores reflejan un aumento en la tenacidad de los nanocompositos con la incorporación de la arcilla en general.

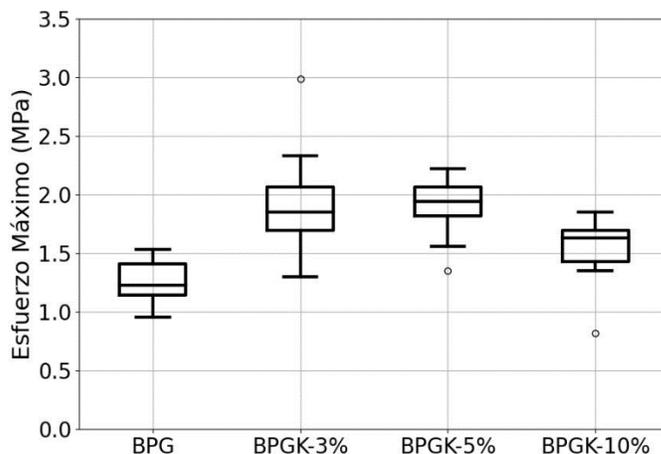


Figura 1: Distribución del esfuerzo máximo de las diferentes películas termoplásticas: BPG, BPGK-3%, BPGk-5% y BPGk-10%. Fuente: Elaboración propia.

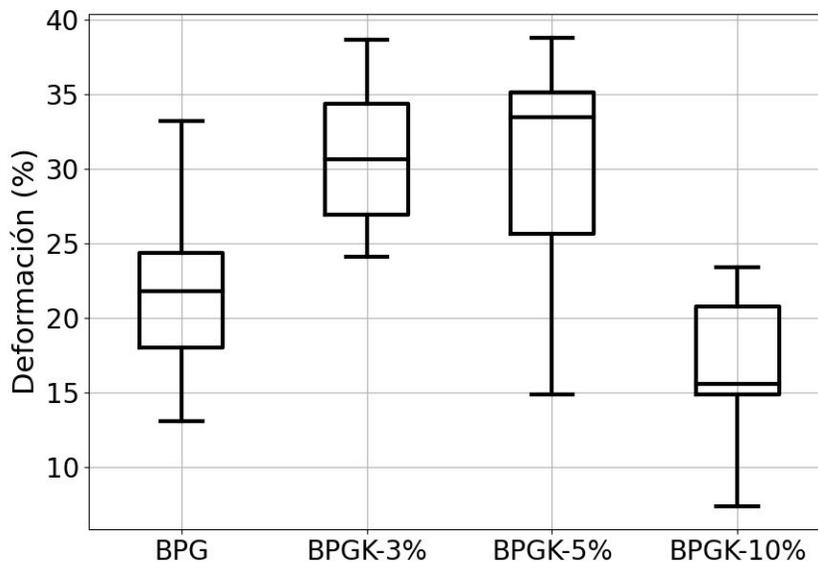


Figura 2: Distribución de la deformación o alargamiento a la rotura de las diferentes películas termoplásticas: BPG, BPGK-3%, BPGk-5% y BPGk-10%. Fuente: Elaboración propia.

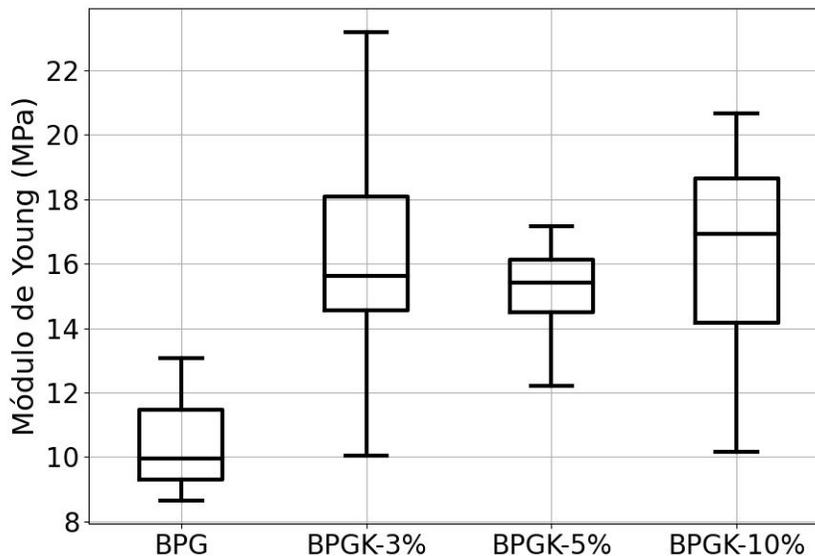


Figura 3: Distribución del Módulo de Young de las diferentes películas termoplásticas: BPG, BPGK-3%, BPGk-5% y BPGk-10%. Fuente: Elaboración propia.

2. Microscopia Óptica y Análisis superficial

En la Figura 4. Se indican las imágenes de las diferentes películas delgadas termoplásticas realizadas todas a un aumento de 20X con la finalidad de que sean comparables entre sí. La Figura 4a, corresponde a la formulación BPG, en donde se evidencia homogeneidad superficial, sin embargo, cuando se incorpora arcilla a la matriz polimérica, se observa que con el 3% de arcilla, Figura 4b, se ve pequeño material particulado correspondiente a la arcilla y bien distribuido manteniendo homogeneidad de la película termoplástica. Con el 5% de arcilla, al haber una mayor concentración de partículas arcillosas, se ve que hay una pequeña aglomeración de estas en ciertas zonas, dando indicio que hay una menor exfoliación de la arcilla comparado con el termoplástico BPGK-3%, a pesar del mayor tamaño de estas tienen una buena distribución en la matriz biopolimérica. Por último, la formulación que contiene arcilla al 10%, evidencia una densidad más alta de las partículas de mayor tamaño, indicativo de una mayor aglomeración, además visualizarse una mayor rugosidad de la muestra. Estos resultados, explican en parte los observados por propiedades mecánicas, en donde concentraciones altas de MMT genera alta densidad de aglomerado, minimizando el rendimiento mecánico. Finalmente, en la Figura 5. Se muestra una imagen fotográfica de la formulación BPGK-5%, se observa que es transparente un poco opaca por el contenido de la arcilla, pero visualmente sin burbujas. Todas las formulaciones fueron similares, con la pequeña diferencia que la película BPGK-10%, presento más opacidad y mostró más material particulado de la arcilla a simple vista.



(a)



(b)

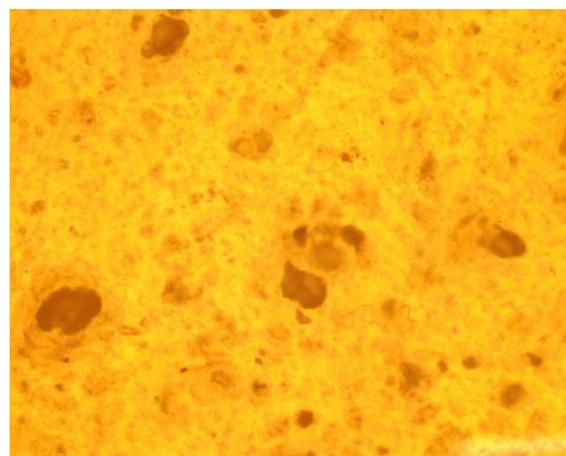
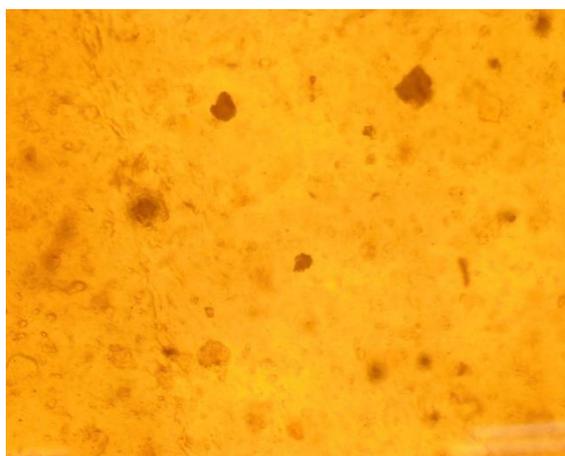


Figura 4: Imágenes obtenidas del microscopio óptico de las películas termoplásticas de formulación: (a) BPG, (b) BPGK-3%, (c) BPGk-5% y (d) BPGk-10%. Fuente: Elaboración propia.



Figura 5: Imágenes fotográficas de película termoplástica de formulación BPGk-5%, contenido 5% de arcilla. Fuente: Elaboración propia.

IV. CONCLUSIONES

De acuerdo a las propiedades mecánicas encontradas y a las imágenes microscópicas obtenidas de las películas termoplásticas de diferente formulación, la arcilla Montmorillonita K10 es una buena alternativa para ser usado como refuerzo mecánico de la matriz polimérica a base de almidón de yuca, sin embargo, ha de considerarse el porcentaje de arcilla utilizar. Según ésta investigación y el proceso empleado para la obtención de las películas, un 5 % de arcilla en peso permite obtener las mejores propiedades mecánicas de todas las formulaciones, con un

esfuerzo máximo, alargamiento a la rotura y módulo de Young de: 1.9 Mpa, 34% y 15.3 Mpa, respectivamente. Adicionalmente, Imágenes de microscopia óptica explican en parte, que dicho resultado mecánico se debe a la distribución homogénea y a la poca aglomeración de las partículas de la arcilla en la matriz termoplástica, que puede resultar en la formulación de nanocomposito BPGK-5%.

V. REFERENCIAS

- [1] M. B. Tekman, B. A. Walther, C. Peter, L. Gutow, and M. Bergmann, "Impacto de la contaminación por plásticos en los océanos sobre las especies, la biodiversidad y los ecosistemas marinos," WWF, Germany, 2022.
- [2] OCDE, "La contaminación por plástico crece sin cesar, en tanto que la gestión de residuos y el reciclaje se quedan cortos, dice la OCDE.," 2022.
- [3] MASP, "Situación actual de los plásticos en Colombia y su impacto en el ambiente," pp. 3–25, 2019.
- [4] S. M. Emadian, T. T. Onay, and B. Demirel, "Biodegradation of bioplastics in natural environments," *Waste Manag.*, vol. 59, pp. 526–536, 2017.
- [5] T. Jiang, Q. Duan, J. Zhu, H. Liu, and L. Yu, "Starch-based biodegradable materials: Challenges and opportunities," *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.*, vol. 3, no. 1, pp. 8–18, 2020.
- [6] B. Jiang, S. Li, Y. Wu, J. Song, and S. Chen, "Preparation and characterization of natural corn starch-based composite films reinforced by eggshell powder," *CyTA - J. Food*, vol. 16, no. 1, pp. 1045–1054, 2018.
- [7] P. Cheviron, F. Gouanvé, and E. Espuche, "Preparation, characterization and barrier properties of silver/montmorillonite/starch nanocomposite films," *J. Memb. Sci.*, vol. 497, pp. 162–171, 2016.
- [8] K. Majdzadeh-ardakani, A. H. Navarchian, and F. Sadeghi, "Optimization of mechanical properties of thermoplastic starch / clay nanocomposites," *Carbohydr. Polym.*, vol. 79, no. 3, pp. 547–554, 2010.
- [9] J. H. Mina., "caracterización físico-mecánica de un análisis interfacial con fibras de fique.," *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, vol. 10, no. 2, pp. 99–109, 2012.
- [10] J. H. Mina, A. Valadez, and P. J. H. Tanit, "Influencia del tiempo de almacenamiento en las propiedades estructurales de un almidón termoplástico de yuca (TPS).," *Ingeniería y Competitividad*, vol. 11, núm. 2, 2009.
- [11] H. Peidayesh, Z. Ahmadi, A. Khonakdar, M. Abdouss, and I. Chodák, "Fabrication and properties of thermoplastic starch / montmorillonite composite using dialdehyde starch as a crosslinker," *Vol 69, Issue 3*, pp 317-327, 2020.
- [12] C. Raúl, B. Bustos, J. Pablo, G. Sánchez, and D. Suarez, "Propiedades, modificaciones y usos de los almidones, con miras a la obtención de Películas biodegradables.," *Revista de Investigación*, vol. 10, pp. 135–152, 2017.
- [13] Y. I. Kedang, A. Priyanga, L. Atmaja, and M. Santoso, "Characteristics and performance studies of on chitosan / glycerol – sulfosuccinic acid modified.," *RSC Adv.*, pp. 30742–30753, 2022.
- [14] Faheem Uddin, *Montmorillonite: An Introduction to Properties and Utilization*. IntechOpen, 2018.
- [15] M. Segad, Bo Jönsson, T. Åkesson, and B. Cabane, "Ca/Na Montmorillonite: Structure, Forces and Swelling Properties," *Langmuir*, vol. 26, pp. 5782–5790, 2010.
- [16] M. Z. Hui Mao, Yan Huang, Jiazheng Luo, "Molecular simulation of polyether amines intercalation into Na-montmorillonite interlayer as clay-swelling inhibitors.," *Appl. Clay Sci.*, vol. 202, no. 105991, 2021.
- [17] S. Špírková, M. Pavličević, J. Aguilar Costumbre, Y. Hodan, J. Urbanová, M. Krejčíková, "Mechanically strong waterborne poly(urethane-urea) films and nanocomposite films," *J Appl Polym Sci.*, no. 138:e50011, 2021.
- [18] L. B. Fitaroni, J. A. de Lima, S. A. Cruz, W. R. Waldman, "Thermal stability of polypropylene–montmorillonite clay nanocomposites: Limitation of the thermogravimetric analysis," *Polym. Degrad. Stab.*, pp. 102–108, 2015.
- [19] J.L Souza, A.de Campos, D. França, et al., "PHB and Montmorillonite Clay Composites as KNO3 and NPK Support for a Controlled Release.," *J Polym Env.*, vol. 27, pp. 2089–2097, 2019.
- [20] N. Seyrek, M. E., Okur, M., Saraçoğlu, "Improvement of mechanical, thermal and antimicrobial properties of organically modified montmorillonite loaded polycaprolactone for food packaging," *J. Vinyl Addit. Technol.*, vol. 27, no. 4, pp. 894–908, 2021.
- [21] R. Derungs, I. Rico, M. López, J. Barral, L. Montero, B. Bouza, "Influence of the hydrophilicity of montmorillonite on structure and properties of thermoplastic wheat starch/montmorillonite bionanocomposites," *Polym Adv Technol*, vol. 32, no. 11, pp. 4479–4489.
- [22] N. E. Kochkina, O. A. Butikova, and N. D. Lukin, "A study of films based on starch and Na-montmorillonite designed for prolonged release of oxytetracycline hydrochloride," *Starch/Stärke*, vol. 73, no. 7–8, pp. 1–8, 2021.
- [23] O Fričová, M Hutníková. and H. Peidayesh "DMA study of thermoplastic starch/montmorillonite nanocomposites," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2411, 2021.
- [24] C. P. García-Quiles L, Fernández Cuello Á, "Sustainable Materials with Enhanced Mechanical Properties Based on Industrial Polyhydroxyalkanoates Reinforced with Organomodified Sepiolite and Montmorillonite.," *Polymers.*, vol. 11, no. 4, 2019.
- [25] D. R. Menegasso JF, Moraes NAC, Vásquez TP, Felipetti FA, Antonio RV, "Modified montmorillonite-bacterial cellulose composites as a novel dressing system for pressure injury," *Int J Biol Macromol*, vol. 194, pp. 402–411, 2022.
- [26] N. Piñeros-guerrero, S. Collazo-bigliardi, and R. Ortega-toro, "Mechanical and barrier properties of thermoplastic starch based composites by the incorporation of montmorillonite clays," vol. 5, pp. 558–562, 2020.
- [27] J. Tarique, S. M. Sapuan, and A. Khalina, "Effect of glycerol plasticizer loading on the physical, mechanical, thermal, and barrier properties of arrowroot (*Maranta arundinacea*) starch biopolymers," *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–17, 2021.