

Evaluación de un biopolímero a base de almidón de arroz (*Oryza sativa*) y zeolita clinoptilolita como material de embalaje para semiconductores

Evaluation of a rice starch (*Oryza sativa*) and clinoptilolite zeolite biopolymer as a packaging material for semiconductors

Edgardo Antonio Peralta Lasso¹, Silvia Elena Cedeño Núñez¹, Jovanny Ariel Díaz Gonzalez^{1*}

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Panamá

*Autor de correspondencia: jovanny.diaz@utp.ac.pa

Fecha de recepción: 2 de marzo de 2026. Fecha de aceptación: 15 de mayo de 2026.

Resumen. El uso masivo de plásticos en el embalaje de productos, especialmente en el sector electrónico, genera una creciente preocupación ambiental por su alta demanda y escasa biodegradabilidad. En respuesta, esta investigación plantea el desarrollo de un biopolímero a partir del almidón extraído de *Oryza sativa* (arroz) y zeolita clinoptilolita, con el fin de evaluar su viabilidad como material de embalaje para componentes electrónicos. Para cumplir con los criterios de sostenibilidad, funcionalidad y resistencia, se combinaron propiedades biodegradables y estabilidad estructural del almidón, con las propiedades antiestáticas aportadas por la clinoptilolita-zeolita. Se formularon siete mezclas experimentales variando proporciones a razón de 1:1, así se fabricó un prototipo en forma de lámina, mediante gelatinización y secado controlado. La caracterización del material incluyó espectroscopía infrarroja por reflectancia total atenuada por transformada de Fourier (FTIR), espectroscopía ultravioleta-visible (UV-Vis), microscopía electrónica de barrido (SEM), absorción de agua (ASTM D570), ensayos de tracción (ASTM D638), pruebas de resistividad superficial (IEC 61340-2-3) y biodegradabilidad (ISO 14855). Los análisis evidenciaron que las formulaciones M3, M4 y M6 presentan mejor desempeño mecánico, dieléctrico y compostable. Al final, los resultados permitieron identificar oportunidades de mejora mediante el intercambio iónico con metales como Ag^+ , Zn^{2+} , Cu^{2+} , con el fin de optimizar su durabilidad frente a hongos saprófitos sin comprometer su biodegradabilidad.

Palabras clave. Almidón de arroz, biodegradable, biopolímero, clinoptilolita-zeolita, embalaje, semiconductores.

Abstract. The massive use of plastics in product packaging, particularly in the electronics sector, has generated growing environmental concern due to their high demand and low biodegradability. In response, this research proposes the development of a biopolymer based on *Oryza sativa* (rice starch) and clinoptilolite zeolite, aiming to evaluate its viability as a packaging material for electronic components. To meet sustainability, functionality, and strength criteria, biodegradable and structurally stable properties of rice starch were combined with the antistatic capabilities provided by clinoptilolite zeolite. Seven experimental formulations were prepared by varying proportions at a 1:1 ratio, and a prototype in the form of a film was fabricated using controlled gelatinization and drying processes. The material was characterized through attenuated total reflectance Fourier-Transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR), ultraviolet-visible spectroscopy (UV-Vis), scanning electron microscopy (SEM), water absorption testing (ASTM D570), tensile testing (ASTM D638), surface resistivity measurement (IEC 61340-2-3), and biodegradability assessment (ISO 14855). The analysis revealed that formulations M3, M4, and M6 demonstrated superior mechanical, dielectric, and compostable properties. Ultimately, the results confirm the opportunities for improvement through ionic exchange with metals such as Ag^+ , Zn^{2+} , or Cu^{2+} to enhance durability against saprophytic fungi without compromising biodegradability.

Keywords. Rice starch, biodegradable, biopolymer, clinoptilolite-zeolite, packaging, semiconductors.

1. Introducción

La acumulación de residuos plásticos produce microplásticos que afectan la fauna y flora, y liberan gases de efecto invernadero durante su degradación abiótica y biótica, agravando la crisis climática y afectando ecosistemas y comunidades humanas [1], [2].

Desde la década de 1970, la ciencia de materiales ha investigado almidones nativos como el maíz, la papa y el arroz para el desarrollo de biopolímeros biodegradables. En los años noventa, la incorporación de glicerina mejoró su flexibilidad, aunque aumentó la higroscopicidad y disminuyó la estabilidad en ambientes húmedos [3].

Sin embargo, en el periodo del 2000 al 2010, la incorporación de nano rellenos inorgánicos, como arcillas, sílice y zeolitas, mejoró la rigidez y estabilidad térmica de los biopolímeros, destacando la importancia de la compatibilidad entre fases orgánicas e inorgánica [4].

Desde 2020, la economía circular promueve el uso de subproductos agroindustriales locales. En este contexto, la *Oryza sativa* (arroz), abundante y de bajo costo, se planteó como matriz biodegradable ideal.

Paralelamente, la zeolita clinoptilolita, un mineral natural con propiedades adsorbentes y conductividad iónica se ha incorporado a biopolímeros para mejorar sus propiedades mecánicas y funcionales. En este contexto, la presente investigación busca desarrollar un bioplástico de alto valor funcional a partir de un recurso agroindustrial nacional y un mineral natural.

La combinación de almidón de arroz (*Oryza sativa*) y zeolita clinoptilolita se propone no solo para cerrar ciclos de materiales, sino también para desarrollar un embalaje para semiconductores que brinde protección durante su uso y se degrade eficientemente al final de su vida útil, reduciendo la huella ecológica de los residuos electrónicos.

Las formulaciones con mejor desempeño servirán como base para futuras optimizaciones mediante recubrimientos biodegradables y aditivos antimicrobianos [5], [6].

2. Metodología

Este estudio tiene un enfoque experimental con el fin de crear y analizar un biopolímero que pueda usarse para empacar componentes electrónicos. Se empleó un método cuantitativo para comparar mezclas de harina de arroz (fuente de almidón) y zeolita clinoptilolita. Las muestras fueron sometidas a pruebas físicas, mecánicas y eléctricas para observar cómo se comporta el material en distintas condiciones y evaluar su viabilidad como un polímero biodegradable y protector contra descargas electrostáticas [7–9].

2.1 Elaboración del biopolímero

Los procedimientos empleados para la fabricación del biopolímero se adaptaron en base a la literatura científica, donde quedan evidenciados las medidas utilizadas en cada una de las experimentaciones [10], [11].

Se emplearon de manera constante 120 ml de agua destilada, 5 ml de vinagre, 5 ml de glicerina y 7 g de gelatina en polvo. Las variaciones en la composición corresponden a las proporciones relativas de harina de arroz y zeolita, calculadas sobre un total fijo de 20 g (100 %), las cuales se detallan en la tabla 1.

Tabla 1. Formulaciones del biopolímero: proporciones empleadas

Experiencia	Arroz (g)	Zeolita (g)	%
M1	20	0	100 – 0
M2	0	20	0 – 100
M3	14	6	70 – 30
M4	10	10	50 – 50
M5	6	14	30 – 70
M6	16	4	80 – 20
M7	18	2	90 – 10

En cada experiencia los componentes se mezclaron en un recipiente antiadherente según las proporciones establecidas. La mezcla fue agitada y calentada progresivamente hasta la gelatinización del almidón, integrando la zeolita y distribuyendo uniformemente el plastificante. Tras la aparición de burbujas, se apagó la fuente de calor y se dejó secar a temperatura ambiente durante un periodo de tres días. De manera sintetizada, se detallan a continuación las etapas seguidas en la elaboración del biopolímero en la figura 1.

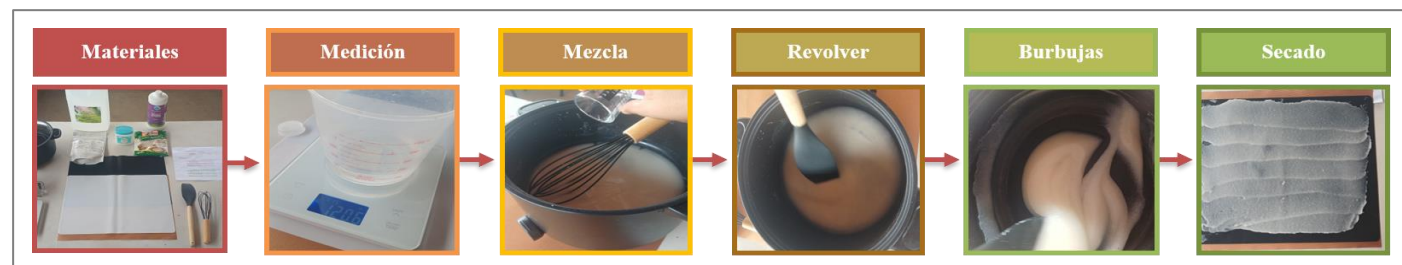


Figura 1. Pasos utilizados para la creación de los biopolímeros

2.2 Caracterización por espectroscopía infrarroja por reflectancia total atenuada (ATR-FTIR)

Los análisis se realizaron en dos grupos, el A (siete muestras expuestas al ambiente) y el grupo B (siete muestras preservadas de la humedad), mediante (ATR-FTIR) con el espectrómetro Shimadzu IRXROCC, conforme a la norma ASTM E1252-98. El análisis se realizó en el rango de medición de 4000 a 400 cm^{-1} , con resolución espectral de 16 cm^{-1} y 40 barridos [12].

Los espectros de las muestras se registraron, normalizaron y corrigieron con el fondo (aire), para investigar las interacciones moleculares y los cambios estructurales dentro de las mezclas, como se ve la preparación inicial en la figura 2.



Figura 2. Preparación de la muestra para análisis (ATR-FTIR).

2.3 Caracterización por espectroscopía ultravioleta-visible (UV-Vis)

Se realizaron mediciones utilizando el espectrofotómetro Shimadzu UV-1800. El análisis se llevó a cabo en el rango de 190 nm a 1100 nm, con un intervalo de paso de 1,0 nm. Todas las muestras analizadas fueron láminas sólidas, como se muestra en la figura 3.



Figura 3. Preparación de la muestra para análisis por espectroscopía ultravioleta-visible.

2.4 Caracterización morfológica por microscopía electrónica de barrido (SEM)

Se empleó (SEM) con el microscopio Carl Zeiss ES BSD Evo 10 para examinar las características morfológicas de las mezclas. El análisis se realizó a M1, M2, M4 y M6 en forma de lámina fueron analizadas tras su exposición al ambiente durante siete días. Adicionalmente, se evaluó M1 y M2 en estado de pasta para comparar su morfología superficial, como se muestra en la figura 4.

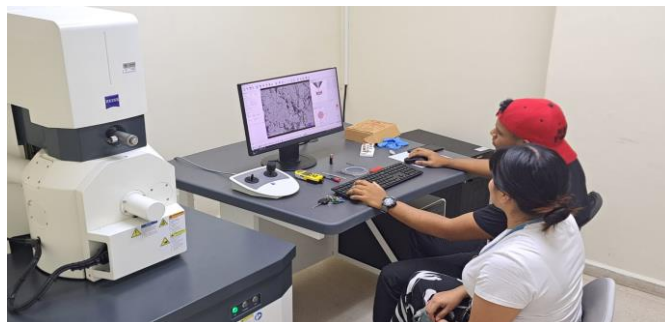


Figura 4. Preparación de la muestra para análisis por microscopía electrónica de barrido por emisión de campo (SEM).

2.5 Ensayo de absorción de agua por variación de peso

La evaluación de la capacidad de absorción de agua de las muestras de biopolímero se dio a cabo a partir de los principios de la norma ASTM D570-98 el cual describe un método de prueba estándar para determinar la absorción de agua en plásticos, específicamente cuando se sumergen en este fluido (agua destilada). Se recortaron siete muestras y se identificaron individualmente. A continuación, se pesaron en seco utilizando una balanza digital. Luego, todas las muestras fueron colocadas en un recipiente con 120.5 mL de agua destilada, procurando que permanecieran completamente sumergidas durante todo el ensayo [10].

Transcurridas las seis horas, las muestras fueron nuevamente pesadas. Posteriormente, se reintrodujeron en el mismo recipiente y se repitió el procedimiento de pesaje a las 12, 18, 24, 48 horas. Con estos datos se calculó el porcentaje de absorción de agua para cada intervalo (ecuación 1).

$$\% \text{ absorción de H}_2\text{O} = \frac{(\text{peso final} - \text{peso inicial})}{\text{peso inicial}} (100) \quad (1)$$

2.6 Ensayo de resistencia a la tracción

Los ensayos de tensión se realizaron adaptando el procedimiento descrito en la norma ASTM D638-14 tipo IV B para biopolímeros. Se cortaron las siete probetas y se sometieron a tensión usando un método casero: las probetas se fijaron con pinzas sujetapapeles en ambos extremos [13].

En la pinza inferior se colocó un recipiente que se llenó gradualmente con agua en incrementos de 30 mL. La deformación se registró mediante fotografías, usando una regla para medir el alargamiento, como se ilustra en la figura 5.

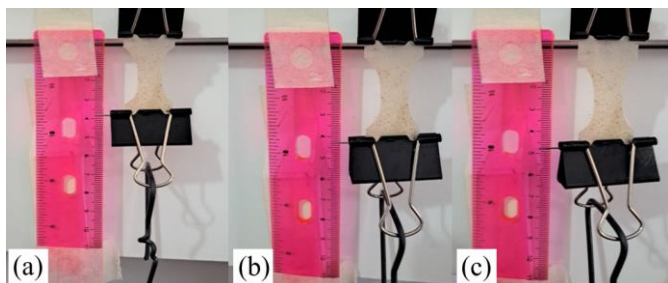


Figura 5. Deformación registrada: (a) posición inicial de M6, (b) posición luego de 150 ml y (c) posición final antes de la fractura.

2.7 Ensayo de resistividad y comportamiento electrostático

Los ensayos se adaptaron a los principios de la norma ASTM D257-14 (medición de resistividad en material aislante) e IEC 61340-2-3 (evaluación de materiales disipativos y antiestáticos), adecuándolos a las limitaciones en casa [14].

La resistencia superficial se midió con un multímetro digital (escala de 2000 k Ω), utilizando dos electrodos metálicos paralelos separados 0.5 cm. Se realizaron mediciones en condiciones secas (ambiente) y húmedas, tras aplicar una ligera humectación con agua destilada.

2.8 Ensayo de acumulación de carga electrostática por frotamiento

Como parte de la evaluación del comportamiento electrostático, se realizó una prueba casera para detectar acumulación de carga por fricción. Cada muestra fue frotada manualmente durante 15 segundos con un paño de lana sintética y luego se acercó a papel picado seco sobre una superficie no conductora, observando si ocurría atracción visible como indicio de carga acumulada.

2.9 Ensayo de biodegradación

Se prepararon siete muestras de biopolímero, las cuales fueron enterradas a una profundidad aproximada de 5 cm en tierra húmeda durante un período de tres días, basado en criterios ISO 14855. Para favorecer la actividad microbiana, la tierra fue regada periódicamente para mantener un nivel adecuado de humedad durante todo el ensayo. Transcurrido el tiempo establecido, las muestras fueron cuidadosamente extraídas del suelo y limpiadas de residuos de tierra adherida, con el fin de evaluar visualmente su estado físico, posibles cambios de color, textura y evidencia de degradación superficial.

3. Resultados

Los resultados permitieron caracterizar las propiedades del biopolímero, ya que permitieron validar experimentalmente cada una de las propiedades evaluadas del biopolímero. Estos hallazgos respaldan su potencial funcional y abren la posibilidad de desarrollar estudios adicionales que profundicen en su viabilidad técnica y ambiental para aplicaciones futuras.

3.1 Fabricación de biopolímero

Los biopolímeros desarrollados presentaron características físicas diferenciadas según la proporción relativa del almidón de arroz y zeolita utilizada en cada formulación. La mayoría de las muestras exhibieron comportamientos elásticos, con una flexibilidad apreciable al manipularlas manualmente tras el secado. La muestra número dos, compuesta únicamente por zeolita clinoptilolita, presentó una textura granular y compacta, similar al cartón húmedo. Su estructura no cohesionó adecuadamente y mostró un comportamiento frágil, comparable al de arena mojada, impidiendo un secado efectivo. Debido a esta falta de integridad mecánica, fue descartada de ensayos posteriores.

Tras el proceso de secado a temperatura ambiente durante tres días, todas las demás muestras fueron retiradas cuidadosamente de la superficie antiadherente utilizada (lámina de teflón), sin sufrir rupturas visibles, como se observa en la figura 6.

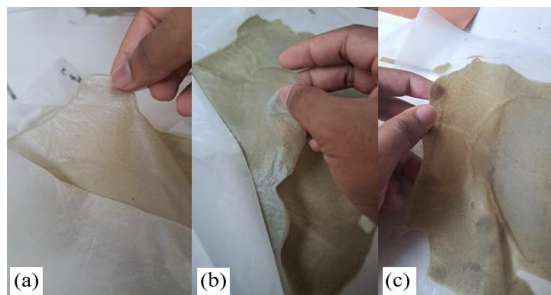


Figura 6. Secado al ambiente por tres días de: (a) M3, (b) M4 y (c) M5.

3.2 Método de caracterización por espectroscopía infrarroja por reflectancia total atenuada (ATR-FTIR)

En la data obtenida de la caracterización se observó en la región de 3988.79 cm^{-1} , correspondiente a la vibración de los grupos hidroxilos -OH , M5 presentó la mayor transmitancia, con un valor de 181.87%. A su vez M1 y M3, con mayor contenido de arroz, mostraron menor transmitancia en las bandas 2916.37 cm^{-1} y 2846.93 cm^{-1} , asociadas a enlaces C-H alifáticos, típicos de cadenas orgánicas. En la región de 1651.07 cm^{-1} , atribuida a la vibración angular del grupo H-O-H , no se observaron diferencias significativas entre las muestras. En 1041.56 cm^{-1} , relacionada con las vibraciones de los enlaces Si-O-Si o Si-O-Al presente en la zeolita clinoptilolita, donde M2, M5 y M6 mostraron una ligera reducción de transmitancia, como se puede ver en la figura 7.

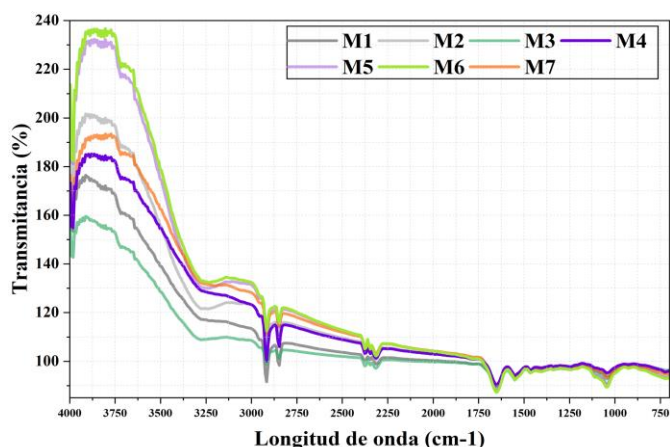


Figura 7. Preparación y análisis de las muestras por espectroscopía infrarroja ATR-FTIR para identificación de grupos funcionales.

3.3 Método de caracterización por espectroscopía ultravioleta-visible (UV-Vis)

Se obtuvo el coeficiente de absorción α para cada muestra, permitiendo identificar el comportamiento frente a la radiación electromagnética, en particular en la región ultravioleta. Se observa una alta absorción en la región UV (190–400 nm), con una disminución progresiva hacia el espectro visible.

La M2 presentó los valores de absorción más altos en toda la región analizada, lo cual podría estar relacionado con una mayor densidad óptica o la presencia de grupos funcionales con fuerte interacción fotónica. Las demás muestras siguen una tendencia descendente similar, con variaciones leves atribuibles a sus diferentes proporciones de harina de arroz y zeolita clinoptilolita, como se muestra en la figura 8.

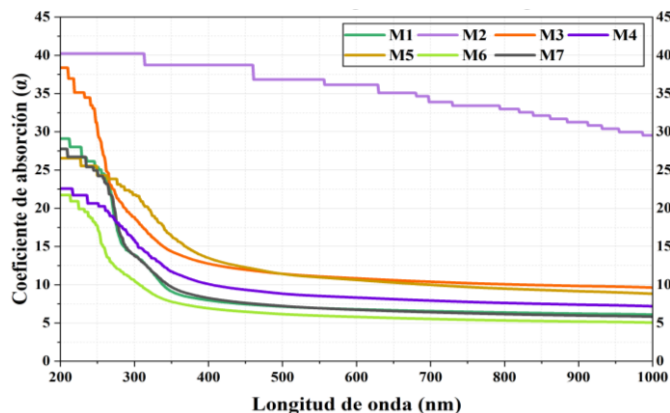


Figura 8. Coeficiente de absorción α en función de la longitud de onda para las muestras M1 a M7 obtenidas por espectroscopía UV-Visible.

3.4 Método de caracterización morfológica por microscopía electrónica de barrido (SEM)

Las micrografías a $10\mu\text{m}$ y 15kV obtenidas por SEM permiten identificar la morfología superficial y la distribución de los componentes del biopolímero. Se observaron gránulos característicos de almidón parcialmente gelatinizado y partículas irregulares de zeolita clinoptilolita, distribuidas de forma heterogénea.

En las muestras M4 y M6, expuestas al ambiente durante dos semanas, se evidenció la formación de una capa superficial con estructuras filamentosas compatibles con esporas de hongos saprófitos, compatibles con especies de los géneros *Aspergillus* o *Penicillium*. Estos organismos indican el inicio de un proceso natural de biodegradación, como se ve en la figura 9.

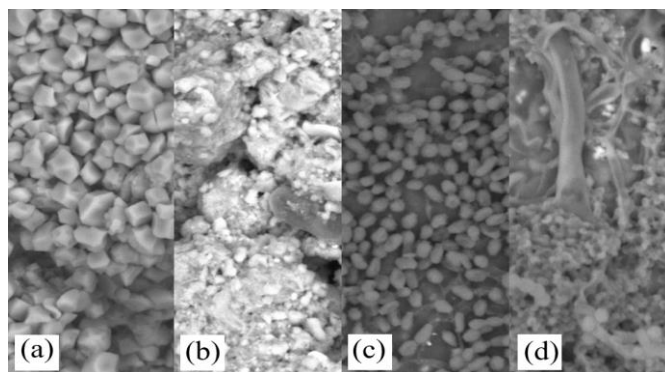


Figura 9. Inicio de un proceso natural de biodegradación: (a) micrografías SEM de la morfología superficial del almidón de arroz gelatinizado, (b) zeolita clinoptilolita, (c) M4 y (d) M6.

3.5 Ensayo de absorción de agua por variación de peso

La mayor absorción fue registrada por M2, compuesta únicamente por zeolita, alcanzando un 466,67%. Le siguió la M6, con 375%, que también contenía alta proporción del mismo mineral. En contraste, M4 formulada con mayor contenido de almidón de arroz, mostró la menor absorción, con un 200%. En varias muestras se observó una reducción de peso tras las veinticuatro o cuarenta y ocho horas, como se ve en la figura 10.

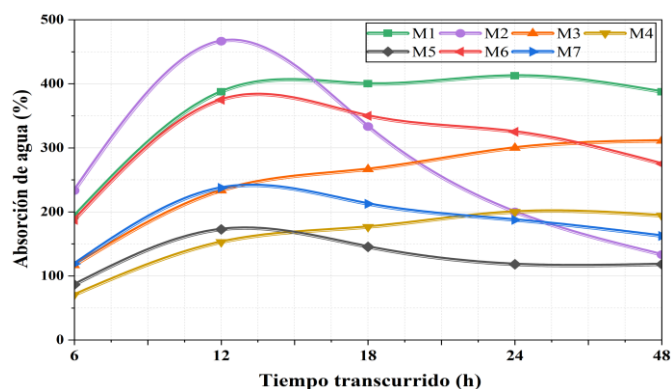


Figura 10. Porcentaje de absorción de agua en función del tiempo de inmersión (horas) de las muestras M1 a M7.

3.6 Ensayo de resistencia a la tracción

La muestra M1 presentó una deformación unitaria de 0.24 y un esfuerzo de 870 kPa. La muestra M7 alcanzó una deformación de 0.18 y un esfuerzo de 905 kPa. La muestra M3 registró una deformación de 0.17 y un esfuerzo de 1147 kPa. Las demás muestras presentaron valores inferiores tanto en deformación como en esfuerzo, como se ve en la figura 11.

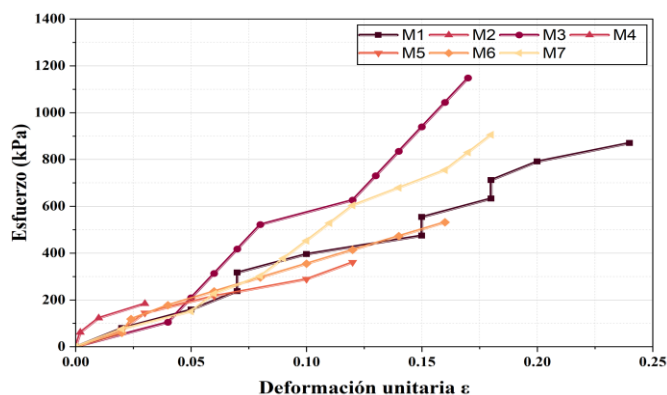


Figura 11. Deformación unitaria y esfuerzo máximo obtenido de las muestras M1 a M7 durante el ensayo de tracción.

3.7 Ensayo de resistividad y comportamiento electrostático

Durante el ensayo de resistividad superficial, seis muestras de biopolímero mostraron valores variables en condiciones secas y húmedas, como se ve en la tabla 2.

Tabla 2. Lecturas de resistividad superficial (kΩ) de muestras de biopolímero en condiciones secas y húmedas

Muestra	1	2	3	4	5	6	7
Seco (kΩ)	1	1	1	800	1	1600	1
Húmedo (kΩ)	1975	1	1100	425	1800	1165	1541

En estado seco, M6 presentó la resistencia más alta con 1600 kΩ, seguida de M4 con 800 kΩ. Las restantes muestras registraron valores de 1 kΩ. Bajo humedad, se observó un aumento generalizado en la resistividad, destacando M1 con 1975 kΩ, M5 con 1800 kΩ y M7 con 1541 kΩ. M4 fue la única que redujo su valor a 425 kΩ tras la aplicación de humedad.

3.8 Ensayo de acumulación de carga electrostática por frotamiento

Todas las muestras de biopolímero fueron frotadas manualmente con paño de lana sintética durante quince segundos. En todos los casos, no se observó atracción visible del papel picado seco hacia las muestras tras el frotamiento, como se puede ver en la tabla 3.

Tabla 3. Evaluación de la acumulación de carga electrostática por fricción en biopolímeros

Muestra	1	2	3	4	5	6	7
Frotada con lana	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Atracción papel picado	No	No	No	No	No	No	No

3.9 Ensayo de biodegradación

Después de tres días de enterramiento en suelo húmedo, todas las muestras presentaban un aspecto húmedo al momento de su extracción, al ser manipuladas, mostraron una textura más suave en comparación con su estado inicial, varias de ellas comenzaron a romperse en fragmentos o desprender partes visibles; también se observaron diferencias en el grado de fragmentación entre muestras, como se muestra en la figura 12.

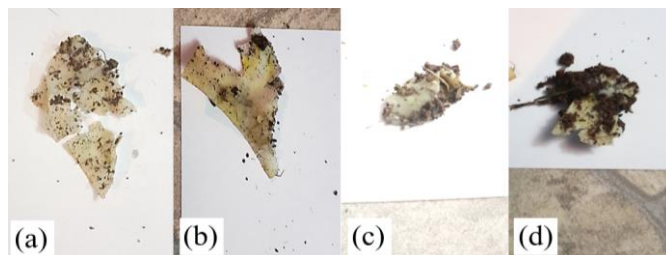


Figura 12. Diferencia de aspecto y fragmentación de los biopolímeros después del tratamiento en suelo húmedo de la (a) M1, (b) M3, (c) M4 y (d) M6.

4. Discusión

La investigación abordó dos enfoques principales, la formulación de un biopolímero funcional a partir de almidón de *Oryza sativa* (arroz) y zeolita clinoptilolita, y su posible aplicación como alternativa funcional y sostenible para el embalaje de componentes electrónicos, en concordancia con la literatura técnica (Zeolite Additives for Flexible Packaging Polymers, 2021).

Desde el primer enfoque, los resultados evidenciaron que ni el almidón (M1) ni la zeolita (M2) por sí solos cumplen requisitos funcionales. En cambio, las formulaciones de M3, M4 y M6 demostraron un equilibrio favorable entre flexibilidad, resistencia mecánica, estabilidad estructural y propiedades eléctricas. Por tanto, estas formulaciones representan las formulaciones más prometedoras como biopolímeros funcionales.

Desde el segundo enfoque, se evaluó la aptitud de estas formulaciones para el embalaje de componentes electrónicos. Los espectros UV-Vis mostraron alta absorción en el rango ultravioleta (200–400 nm), lo que sugiere una posible función como barrera óptica frente a radiación UV. Las micrografías SEM mostraron buena dispersión de partículas, aunque con signos de colonización por hongos saprófitos por exposición ambiental, lo que respalda su carácter compostable, pero plantea la necesidad de controlar su tiempo de vida útil durante el uso.

En los ensayos de tracción, M6 mostró un buen equilibrio entre resistencia y flexibilidad. M4 fue más rígida y frágil, mientras que M3, rica en almidón, alcanzó el mayor esfuerzo con buena elongación, aunque fue menos estable en otras pruebas. En ese marco, M3 y M6 muestran propiedades compatibles para futuras comparaciones bajo la norma ASTM D882 o ISO 527-3, que permitirán validar su desempeño frente a materiales plásticos convencionales. Las muestras M3, M4 y M6 mostraron resistencia superficial dentro del rango disipativo ($10^5 - 10^9 \Omega/\text{sq}$) tanto en condiciones secas como húmedas, siendo aptas para prevenir descargas electrostáticas en semiconductores.

Este resultado se relaciona con estudios como el de compuestos PANI/almidón, donde se logró mejorar la conductividad eléctrica mediante la incorporación de polímeros conductores, siempre que se mantenga un equilibrio con la integridad estructural. Por otro lado, en la literatura técnica (Zeolite Additives for Flexible Packaging Polymers, 2021) sugiere que la zeolita puede ser modificada por intercambio iónico con metales como plata (Ag^+), zinc (Zn^{2+}) o cobre (Cu^{2+}), proporcionando propiedades antimicrobianas sin comprometer su capacidad absorbente. Es así, como esta estrategia podría implementarse sobre M3, M4 y M6 para reducir su susceptibilidad a hongos saprófitos, mejorando así la estabilidad del embalaje durante su uso y almacenamiento.

5. Conclusiones

Se formuló un biopolímero a base de almidón de arroz y zeolita clinoptilolita con potencial de embalaje para componentes electrónicos, donde M3, M4 y M6 demostraron mejor desempeño general.

Las formulaciones M3, M4 y M6 se comportaron como materiales disipativos ($10^5\text{--}10^9 \Omega/\text{sq}$), permitiendo prevenir descargas electrostáticas.

Las pruebas de caracterización confirmaron la compatibilidad entre los componentes y revelaron comportamiento favorable frente a la radiación UV.

Se recomienda aplicar recubrimientos biodegradables antihumedad para mantener estable la disipación ESD, así como explorar intercambio iónico con Ag^+ , Zn^{2+} y Cu^{2+} y la incorporación de agentes antimicrobianos naturales como el galato de té verde.

El trabajo evidencia el potencial de estos biopolímeros en aplicaciones de corta duración o con recubrimiento, aportando soluciones ecológicas a la industria electrónica y sentando bases para validaciones futuras.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, al Laboratorio de Investigaciones Pierre y Marie Curie de la Universidad Tecnológica de Panamá, por recibirnos, al Dr. Eleicer Ching y al Dr. Alfredo Campos por su valioso tiempo y a su vez por referirnos al Laboratorio de Investigaciones en Biociencias, Biotecnología y Ciencias Aplicadas (LIBBCA) de la Facultad de Ciencias y Tecnología (FCyT), de la Universidad Tecnológica de Panamá, al Dr. Cecilio Hernández y la atención del Lcdo. Jorge Cevallos.

REFERENCIAS

- [1] M. Espino Penilla and Y. Koot, “Nuestro mundo cubierto de plástico: De la movilidad global del plástico a las consecuencias y respuestas locales,” Informe Científico Técnico UNPA, vol 12, no. 4, pp. 146–160, 2020, doi: 10.22305/ict-unpa.v12.n4.759.
- [2] A. L. Andradý and M. A. Neal, “Applications and societal benefits of plastics,” *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 364, no. 1526, pp. 1977–1984, Jul. 2009, doi: 10.1098/rstb.2008.0304.
- [3] D. A. Zapata, R. O. Pujol, and F. E. Coda, “Polímeros biodegradables: Una alternativa de futuro a la sostenibilidad del medio ambiente,” *Técnica Industrial*, no. 297, pp. 50–56, Mar. 2012. [Online]. Available: <https://www.tecnicaindustrial.es/wp-content/uploads/Numeros/82/889/a889.pdf>

- [4] A. C. Cendán, R. B. Padín, and B. Bittmann, “Desarrollo de polímeros biodegradables compuestos para aplicaciones en la industria electrónica,” Trabajo Fin de Grado, Universidade da Coruña, A Coruña, España, 2013. [Online]. Available: <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/14404> [3 de mayo de 2025]
- [5] E. Papa, V. Medri, S. Amari, J. Manaud, P. Benito, A. Vaccari, and E. Landi, “Zeolite-geopolymer composite materials: Production and characterization,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 171, pp. 76–84, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.09.270.
- [6] I. P. Salgado Tello, T. E. Sánchez Herrera, J. M. Oleas López, and M. L. Vaca Cárdenas, “Economía circular para el desarrollo agroindustrial y social en Ecuador,” *Revista Científica Dominio de las Ciencias*, vol. 10, no. 1, 2024. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9290655.pdf>
- [7] M. K. Marichelvam, M. Jawaid, and M. Asim, “Corn and Rice Starch-Based Bioplastics as Alternative Packaging Materials,” *Fibers*, vol. 7, no. 4, Art. no. 32, 2019, doi: 10.3390/fib7040032.
- [8] K. Babaremu, P. Oladijo, and E. T. Akinlabi, “Biopolymers: A suitable replacement for plastics in product packaging,” *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, vol. 6, no. 3, pp. 166–177, 2023, doi: 10.1016/j.aiepr.2023.01.001.
- [9] M. Fornaro, B. Liguori, V. Ambrogio, and D. Caputo, “Zeolite Additives for Flexible Packaging Polymers: Current Status Review and Future Perspectives,” *Polymers*, vol. 16, no. 23, Art. no. 3399, 2024, doi: 10.3390/polym16233399.
- [10] L. J. Gavilanes Ruiz, *Elaboración de bioplásticos a partir del almidón de arroz (Oryza sativa) y arroz integral para uso como envolturas biodegradables de alimentos*, Trabajo de titulación, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2021. [Online]. Available: <https://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/14971>
- [11] J. Rodríguez, V. Montenegro, and N. Marín, “Fabricación de polímeros a base de almidón de tubérculos panameños seleccionados,” *Revista de Iniciación Científica (RIC)*, vol. 8, no. 1, pp. 28–34, Mar. 2022.
- [12] M. E. A. Mohsin and S. Mousa, “Balancing Conductivity and Morphology in Aniline-Tuned Biopolymer–Starch Composites,” *Polymers*, vol. 17, no. 4, Art. no. 497, 2025, doi: 10.3390/polym17040497.
- [13] H. V. Sánchez, R. C. G. Gómez, F. A. M. Arrijoja, J. C. L. Gordillo, and J. M. R. Bezares, “Diseño virtual de un prototipo para ensayos a tensión de materiales polímeros en base a la norma ASTM D638-14,” *Revista Tecnología Digital*, vol. 13, no. 2, pp. 37–54, 2023.
- [14] C. F. Niedik, C. Freye, F. Jenau, D. Häring, G. Schröder, and J. Bittmann, “Investigation on the Electrical Characterization of Silicone Rubber Using DC Conductivity Measurement,” in *Proc. 2016 IEEE Int. Conf. Dielectrics (ICD)*, Montpellier, France, Jul. 2016, vol. 2, pp. 1114–1118, doi: 10.1109/ICD.2016.7547814.