

# Almidón al rescate: creando empaques sostenibles y biodegradables

## *Starch to the rescue: creating sustainable and biodegradable packaging*

Heidi Andrea Fonseca Florido, Wendy Sartillo Bernal y  
Antonio Serguei Ledezma Pérez

---

### Resumen

El uso excesivo de polímeros sintéticos en productos desechables, como bolsas y envases, genera acumulación en vertederos y cuerpos de agua, afectando la salud del ambiente y los seres vivos. Los bioplásticos son una alternativa sostenible, destacando el almidón por su bajo costo y biodegradabilidad, aunque con limitaciones como baja resistencia al agua y propiedades mecánicas pobres. El succinato de polibutileno (PBS) complementa estas propiedades, pero su alto costo y biodegradabilidad limitada lo hacen menos accesible. Las mezclas de almidón y PBS buscan combinar sus ventajas, mejorar la degradación del PBS y reducir costos, ofreciendo una solución más sostenible frente a la contaminación plástica.

**Palabras clave:** bioplásticos, contaminación plástica, materiales biodegradables, polímeros sintéticos, sustentabilidad

### CÓMO CITAR ESTE TRABAJO

Fonseca Florido, Heidi Andrea, Sartillo Bernal, Wendy y Ledezma Pérez, Antonio Serguei. (2025, enero-febrero). Almidón al rescate: creando empaques sostenibles y biodegradables. *Revista Digital Universitaria (RDU)*, 26(1). <http://doi.org/10.22201/ceide.16076079e.2025.26.1.8>

---

### Abstract

The excessive use of synthetic polymers in disposable products, such as bags and containers, leads to accumulation in landfills and water bodies, impacting the health of the environment and living organisms. Bioplastics offer a sustainable alternative, with starch standing out for its low cost and biodegradability, though it has limitations like low water resistance and poor mechanical properties. Polybutylene succinate (PBS) complements these properties, but its high cost and limited biodegradability make it less accessible. Starch and PBS blends aim to combine their advantages, enhance PBS degradation, and reduce costs, providing a more sustainable solution to plastic pollution.

**Keywords:** bioplastics, plastic pollution, biodegradable materials, synthetic polymers, sustainability.

### Heidi Andrea Fonseca Florido

*Centro de Investigación de Química Aplicada (CIQA), Saltillo, Coahuila, México.*

Doctora en Tecnología Avanzada en el Instituto Politécnico Nacional (IPN). Investigadora en el Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) asignada al Centro de Investigación de Química Aplicada (CIQA) con amplio conocimiento en la investigación, desarrollo y diseño de productos, proyectos de investigación y tecnología alrededor de los biopolímeros con énfasis en el almidón y sus aplicaciones. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores en México (SNI 1). Ha publicado más de treinta artículos científicos en revistas JCR de alto impacto y capítulos de libro. Formación de recursos humanos a nivel licenciatura, maestría y doctorado. Ha dirigido la gestión de proyectos con fondos nacionales, además de realizar y ejecutar proyectos de desarrollo tecnológico con la industria. Es líder de proyectos técnicos y tecnológicos, y ha obtenido patentes en México referentes a los biopolímeros.

 /0000-0002-6861-2412

 heidi-andrea-fonseca/

 Heidi-Fonseca-Florido

### Wendy Sartillo Bernal

*Centro de Investigación de Química Aplicada (CIQA), Saltillo, Coahuila, México.*

Maestra en Tecnología de Polímeros por el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA). Actualmente es estudiante del doctorado en Tecnología Avanzada en el Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Instituto Politécnico Nacional (CICATA-IPN). Posee sólida formación en caracterización, análisis y procesamiento de polímeros y biopolímeros, así como en estudios de biodegradación de biocompuestos. Su enfoque profesional se centra en la innovación y desarrollo de materiales biodegradables con propiedades funcionales óptimas, buscando contribuir a la transición hacia alternativas sostenibles frente a los polímeros sintéticos.

 wendy-sartillo-bernal-712b08273

### Antonio Serguei Ledezma Pérez

*Centro de Investigación de Química Aplicada (CIQA), Saltillo, Coahuila, México.*

Doctor en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica y Cerámica por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV) del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Es maestro en Ciencia y Tecnología de Polímeros por la Universidad Autónoma de Coahuila (UADEC). Investigador titular adscrito en el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), Departamento de Materiales Avanzados, Saltillo, Coahuila México. Tiene experiencia y se ha desarrollado en el área de microbiología, enfocado a la biosíntesis y aplicación de biopolímeros para el desarrollo de materiales con enfoque en el sector salud y agronómico. Trabaja en el desarrollo de nanopartículas poliméricas y metálicas mediante biosíntesis utilizando recursos naturales de las zonas áridas de México. Ha hecho evaluación biológica de materiales poliméricos aplicando normativa en el análisis de propiedades antimicrobianas y de compostabilidad/biodegradabilidad de materiales.

 0000-0003-0549-0208

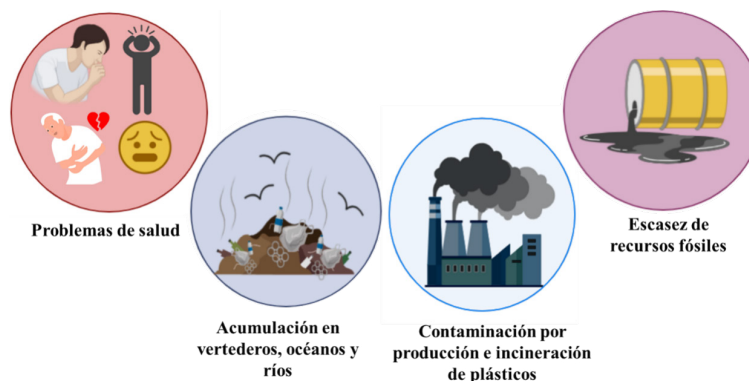
 Antonio.ledezma@ciqa.edu.mx

## Problemas ambientales causados por el uso excesivo de plásticos de un solo uso

Durante décadas, la fabricación de empaques se ha realizado a partir de plásticos derivados de recursos fósiles, como el petróleo, debido a su fácil procesamiento, bajo costo y excelentes propiedades funcionales. Sin embargo, su uso excesivo y disposición inadecuada, ha detonado en graves problemas de salud y de contaminación ambiental a nivel mundial. Un referente para tener una idea de la gravedad del problema es el incremento en la demanda de los plásticos elaborados de petróleo: en el año 2008 se produjeron 245 millones toneladas, mientras que para el 2019 se incrementó a 368 millones de toneladas a nivel global y, tan sólo un año después, en el 2020, la demanda incrementó en un 40% (Nanda et al., 2022).

Uno de los riesgos (figura 1) es la acumulación de empaques de un solo uso y sus desechos en el suelo: con el paso del tiempo los plásticos se descomponen en partículas muy pequeñas, casi difíciles de distinguir a simple vista y se liberan otros compuestos tóxicos, así como metales pesados que pueden permanecer en la superficie causando cambios en las propiedades del suelo, el crecimiento de la vegetación y la actividad de los microorganismos. En cuerpos de agua, como océanos y ríos han provocado la muerte de más de 1 millón de aves marinas y 100,000 animales marinos en todo el mundo, lo que pone en peligro la vida acuática (Othman et al., 2021).

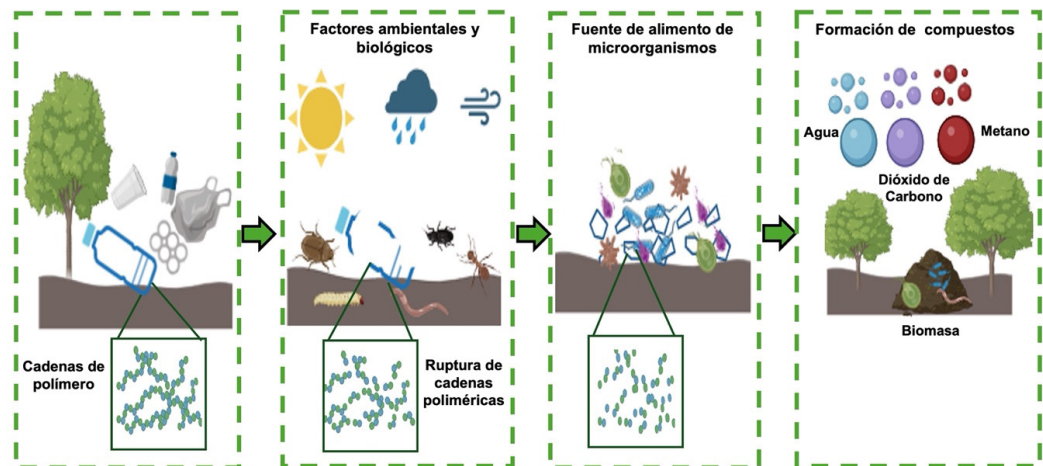
Del mismo modo, las emisiones a la atmósfera, como efecto de la producción e incineración de dichos plásticos, provocan la liberación de gases tóxicos que afectan la calidad del aire contribuyendo negativamente al calentamiento global y perjudican la salud de las personas (Howard et al., 2021). En el ámbito de la salud, la quema de desechos plásticos aumenta potencialmente el riesgo de enfermedades pulmonares y cardíacas, padecimientos respiratorios, náuseas, dolores de cabeza, erupciones en la piel, cáncer, defectos de nacimiento, así como daño severo en el sistema nervioso y reproductivo en humanos. En la agricultura, las sustancias tóxicas se pueden incorporar en los cultivos y en el agua, e ingresar al cuerpo humano a través del consumo de alimentos (Rosenboom et al., 2022).



**Figura 1.** Problemas asociados por el empleo y la disposición inadecuada de los materiales derivados del petróleo. Crédito: elaboración propia.

Frente a esta situación, se han promovido alternativas que permiten enfrentar la problemática ambiental. Una de las propuestas que han surgido, es el uso de materiales biodegradables o biopolímeros, y quizás te preguntas ¿qué es un material biodegradable?, pues bien, este proviene del concepto *biodegradación*, que es la capacidad que tiene un material o sustancia de degradarse por la acción de microorganismos. El proceso de biodegradación inicia cuando el material comienza a fragmentarse en pedazos cada vez más pequeños, debido a factores ambientales como el sol, el agua o el oxígeno, y por agentes biológicos, entre los que se encuentran las acciones de insectos, lombrices, hongos y bacterias.

Una vez que el material está lo suficientemente degradado, los microorganismos pueden asimilarlo y utilizarlo como fuente de alimentación; al final del proceso se genera una transformación total de los materiales por moléculas simples como agua, dióxido de carbono, metano y biomasa, los cuales pueden reintegrarse al medio ambiente para la formación de recursos renovables (figura 2). La biodegradación de estos materiales representa una opción para reducir la acumulación y los consecuentes problemas de contaminación ambiental.



**Figura 2.** Representación esquemática del proceso de biodegradación. Crédito: elaboración propia.

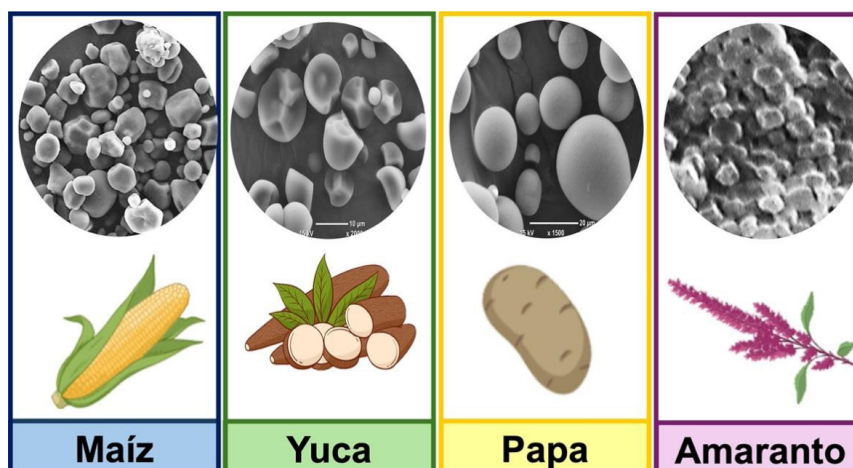
Estos materiales biodegradables o biopolímeros, pueden ser fuentes renovables (origen natural) como las proteínas (zein, seda), los polisacáridos (almidón, quitosano, celulosa) y los lípidos (ácidos grasos); o sintetizados a partir de materia prima obtenida de la naturaleza, como el ácido poliláctico (PLA) o el succinato de polibutileno (PBS); o de fuentes no renovables como el alcohol de polivinilo (PVA), la policaprolactona (PCL), polibutilen adipato-co-tereftalato (PBAT) y el PBS (Shaikh et al., 2021; Cheng et al., 2021) (tabla 1).

| Nombre                              | Nombre común | De dónde se obtiene   | Propiedades  |
|-------------------------------------|--------------|---|--|
| Proteínas                           | -            | Piel, microorganismos, huevo, leguminosas, etc.             | De origen natural, bajo costo, resistentes                               |
| Polisacáridos                       | -            | Plantas, exudados de plantas, caparazón de crustáceos, etc. | Abundantes, bajo costo, renovables, versátiles                           |
| Ácido poliláctico                   | PLA          | Fermentación de almidón de maíz o caña de azúcar            | Transparencia, dureza, resistencia, rigidez, biocompatibles              |
| Succinato de polibutileno           | PBS          | Fermentación de azúcares y/o fuentes fósiles                | Alta rigidez, flexibilidad, estabilidad térmica                          |
| Polibutileno adipato-co-tereftalato | PBAT         | Fuente fósil/no renovable                                   | Alta elongación y flexibilidad, resistencia al agua, estabilidad térmica |
| Polihidroxicanoatos                 | PHA          | Microorganismos   | Flexible, resistente, biocompatible                                      |

**Tabla 1.** Materiales biodegradables o biopolímeros: nombre común, fuente de obtención y propiedades.

## Almidón: polisacárido transformado a plástico

El almidón es un biopolímero que se encuentra en la naturaleza en forma de estructuras conocidas como gránulos, los cuales pueden ser extraídos de diversas fuentes botánicas como: maíz, papa, arroz, trigo, y otras no convencionales como malanga, plátano, yuca, sorgo, mango, jícama, frijol o chícharo, entre otras (Adewale et al., 2022). El tamaño y forma de los gránulos de almidón depende de la fuente botánica de donde se obtenga (figura 3). Se pueden encontrar de forma ovalada y elíptica (entre otras formas), y tamaños desde 1 µm (amaranto) hasta 100 µm (papa) (Agama et al., 2017). Este polisacárido es la reserva energética de las plantas y es considerado la fuente primaria de energía para el ser humano.



**Figura 3.** Formas de los gránulos de almidón dependiendo su fuente de obtención. Crédito: elaboración propia.

El almidón termoplástico (TPS) se obtiene mediante el uso de calor y la incorporación de plastificantes como el glicerol y agua, confiriéndole características y propiedades similares a los plásticos. Entre los métodos tradicionales utilizados para producir TPS, se encuentran la formación de película por solución (*casting*) y técnicas de procesamiento de plásticos. El TPS es altamente biodegradable, de bajo costo, afín al agua y biocompatible. No obstante, en años recientes, se han desarrollado tecnologías más avanzadas para desarrollar materiales biodegradables innovadores a base de almidón que permitan su uso y aplicación en la vida cotidiana.

A través de técnicas como el *electrohilado* se obtienen fibras que son utilizadas, principalmente, como filtros para aire y agua, en la administración controlada de medicamentos para heridas y en la regeneración de tejidos (nervios, tendones); mediante la impresión 3D se pueden obtener piezas con aplicación para las áreas médica, automotriz, aeronáutica, etcétera. Por medio de la extrusión reactiva se pueden unificar varios procesos típicos de la industria de los polímeros en una única etapa para la obtención de filamentos y películas; por otra parte, en la nanotecnología para la obtención de nanopartículas y materiales con aplicación en el área de alimentos, cosmetología y envasados (Cheng et al., 2021).

## **Materiales basados en almidón termoplástico para la elaboración de empaques**

En la actualidad se requiere implementar el uso de materiales biodegradables como alternativa para reducir la problemática ambiental mencionada. Sin embargo, materiales como el PLA, PVA, PCL, PBAT y PBS, presentan costos elevados hasta tres veces más que, por ejemplo, el polietileno de baja densidad (LDPE) (Beluci et al., 2023), lo que hace difícil su uso y aplicación en el mercado, además, su producción se concentra en Asia, Europa y Estados Unidos, lo que incrementa los costos de importación y logística, así como limita su disponibilidad en el territorio nacional.

Una alternativa para contrarrestar dichas desventajas es el desarrollo de mezclas con otros materiales de menor costo, como es el caso del almidón termoplástico que tiene diversas ventajas, entre las que destaca su producción a nivel nacional. Las mezclas a base de almidón podrían incrementar la velocidad de biodegradación, reducir la dependencia de proveedores extranjeros y mejorar la disponibilidad de materias primas nacionales a través de la generación de tecnología nacional para la elaboración de empaques. Asimismo, se podría promover el uso de fuentes de almidón no convencionales, como son los provenientes de desechos agrícolas o agroindustriales.

## Biodegradación de los biopolímeros

Existen diferentes medios o condiciones en las que se puede llevar a cabo la biodegradación de los biopolímeros, tal y como se observa en la figura 4. Sin embargo, no todos los materiales son biodegradables en todos los medios, tal es el caso del PBS, que únicamente se degrada en composta industrial, mientras que el *almidón termoplástico* se desintegra en medios marinos, suelos, vertederos, composta casera, digestión anaerobia y compostaje industrial.

Los materiales compostables como el PBS deberían exhibir un alto grado de biodegradabilidad y desintegración en una escala de tiempo limitada en condiciones de compostaje; es por ello que se considera que la adición de un componente altamente degradable en diversos medios, como el almidón, aumentará la velocidad de biodegradación del PBS.

|         | <br>Ambiente marino | <br>Suelo y vertederos | <br>Composta casera | <br>Digestión anaeróbica | <br>Composta industrial |
|---------|--|---|---|---|--|
| Almidón |                   |                      |                   |                        |                       |
| PBS     |                   |                      |                   |                        |                       |

Figura 4. Biodegradación del PBS y el almidón en diferentes medios. Crédito: elaboración propia.

## Normativa en México para la biodegradabilidad y compostabilidad

En México, los procedimientos para evaluar la biodegradación y/o compostabilidad se habían definido mediante la aplicación de normas internacionales (ATM, ISO), sin embargo, más recientemente, la normativa en México busca regular la producción, uso, disposición y tratamiento de los plásticos para empaques, con el objetivo de reducir el impacto ambiental en el planeta, mediante el desarrollo de normas nacionales. Por lo tanto, se han definido normas para evaluar la biodegradabilidad y compostabilidad de estos materiales, teniendo en cuenta que un material puede ser biodegradable, pero no necesariamente es compostable.

Un material (plástico o polímero) biodegradable es aquel que se degrada o fragmenta como resultado de la acción del sol, la lluvia, el aire, bacterias, hongos y algas, lo que puede ocurrir en un periodo de tiempo extenso (más de 1 año), debido a que no existen condiciones definidas de temperatura y humedad para llevarse a cabo la biodegradación de manera controlada. En

este proceso se generan dióxido de carbono, agua y biomasa. Por otro lado, un plástico compostable es aquel que se somete a una degradación biológica en condiciones específicas (58°C y 55% de humedad) en un sistema de compostaje y del se obtienen productos como dióxido de carbono, agua y composta, que puede ser usada como fertilizante sin producir residuos tóxicos. Es importante destacar que para este tipo de materiales plásticos degradables, el tiempo de compostaje suele ser más rápido, de 3 a 6 meses (Lambert y Wagner, 2017).

En la actualidad, la normativa en México que establece los requisitos que deben cumplir los materiales y productos plásticos de un solo uso, para ser considerados como materiales biodegradables y/o compostables, se define bajo los criterios de la norma mexicana NMX-E-273-NYCE-2019. Esta norma describe una secuencia de procedimientos para la evaluación de la capacidad de desintegración de los materiales (ISO 20200), Biodegradación inherente (ISO 14855 / ASTM D5338), así como la evaluación del impacto ambiental o ecotoxicidad (OECD 208).

Entre estas, la norma ISO-20200, constituye una norma internacional aplicable en México, la cual especifica el método de prueba para determinar el grado de desintegración de los materiales plásticos, simulando condiciones de compostaje a nivel de laboratorio durante un periodo de 3 meses. La norma ISO-20200 permite la determinación del grado de desintegración de los materiales plásticos compostables a nivel laboratorio, debido a que se tiene un mayor control de las condiciones de compostaje tales como la temperatura, contenido de humedad y proporciones de los componentes de la composta, lo que es favorable para la reproducibilidad y evaluación de diferentes materiales poliméricos. Esta norma se limita a la evaluación de un primer criterio descrito en la norma NMX antes mencionada, puesto que para cumplir con los demás se requiere de equipos más sofisticados lo que encarece su aplicación y evaluación.

De igual forma, la norma NMX, además de garantizar la biodegradación en un tiempo no mayor a 6 meses (ISO 14855 / ASTM D5338), especifica que un material biodegradable y el producto de su degradación no debe tener impacto adverso en plantas. Por ello en específico, bajo la norma mexicana se debe cumplir con los siguientes criterios:

1. El material debe desintegrarse (degradación física y microbiológica) en un 90% en fragmentos menores a un tamaño específico (aprox. 2 mm), dentro de un plazo determinado (3 meses).
2. Debe cumplir con un nivel de conversión del carbono orgánico en dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), dentro de un plazo determinado de 6 meses (degradación química y microbiológica).
3. Su ecotoxicidad (efecto en las plantas), se establece mediante la evaluación del contenido de metales y otros componentes tóxicos, así como mediante la comparación del crecimiento de plantas en un compost control (residuos orgánicos que no contiene el material de la prueba), con una muestra de compost del mismo residuo orgánico



que contiene 10% de material de ensayo, añadido al comienzo del compostado. No deben presentarse diferencias en el crecimiento y desarrollo de las plantas en los dos medios.

## Mezclas base-almidón y succinato de polibutileno (PBS), una alternativa para la producción de empaques ecológicos

La mezcla de TPS y PBS es atractiva en la industria de empaques debido a que ambos son materiales biodegradables y su combinación podría acelerar la biodegradabilidad del PBS y bajar su costo, mientras que mejora la procesabilidad y las propiedades mecánicas del almidón (Suchao et al., 2014).

El PBS es un polímero considerado uno de los candidatos más atractivos para la fabricación de empaques debido a sus excelentes propiedades como biodegradabilidad, resistencia mecánica, alta flexibilidad, buena estabilidad térmica y resistencia química similar a la del polietileno (PE) (Suchao et al., 2014; Zhang et al., 2019).

Sin embargo, sí se compara con otros materiales similares como el polipropileno (PP), el PBS posee un alto costo económico que restringe sus aplicaciones. En la figura 5 se presentan las ventajas del PBS, el almidón y las características favorables de la mezcla de estos biopolímeros.

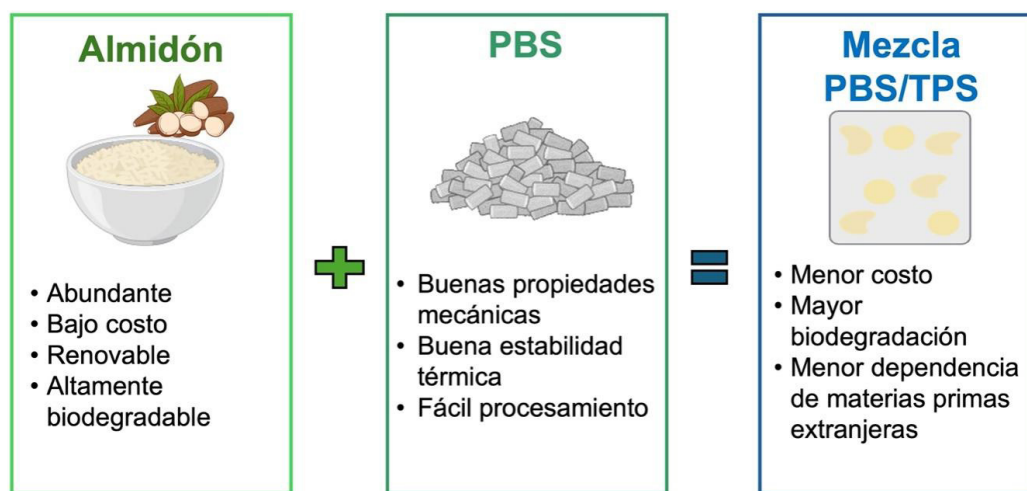


Figura 5. Ventajas técnicas del almidón, el PBS y la mezcla base almidón/PBS. Crédito: elaboración propia.

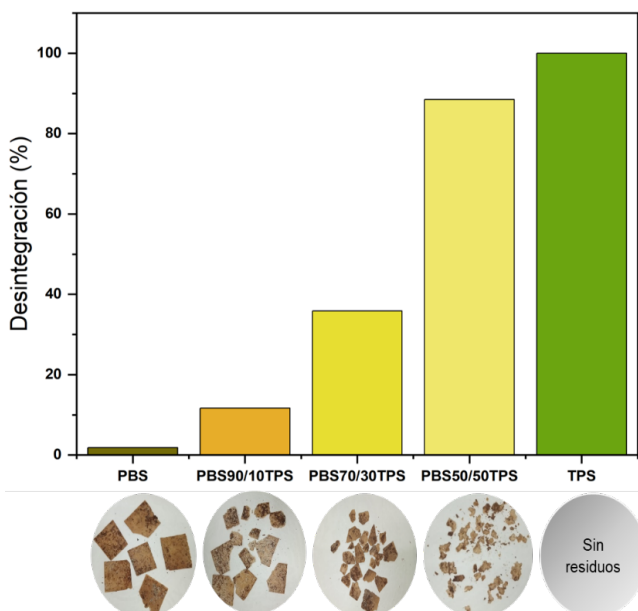
Bajo este contexto, se han desarrollado mezclas a base de almidón y PBS, con el objetivo de aprovechar el uso del almidón, como fuente biodegradable y de alta disponibilidad en México, e incrementar la biodegradabilidad del PBS, disminuir su costo, para finalmente mejorar la aplicación de estos biopolímeros en la industria del empaque. Derivado de lo anterior, se elaboraron mezclas de PBS y almidón, incorporando un 10%, 30% y 50% de almidón, glicerol y agua (las mezclas fueron nombradas como PBS90/TPS10, PBS70/TPS30 y PBS50/TPS50, respectivamente, de acuerdo a la composición).

Las pruebas de biodegradabilidad basadas en la Norma ISO 20200, mostraron que la incorporación de TPS al PBS incrementó el porcentaje de desintegración hasta un 90% en la mezcla PBS50/TPS50, y la adición de un 10% y 30% de TPS a la mezcla, aumentó el porcentaje de desintegración del PBS desde un 2% hasta el 12% y 36%, respectivamente (después de 3 meses, como se presenta en la figura 6). Además, se observó una disminución del tamaño de los fragmentos recuperados de las muestras después del proceso de biodegradación, a mayor incremento de almidón en la composición de las mezclas.

De acuerdo con la normativa, únicamente la muestra PBS50/TPS50 y el TPS son materiales biodegradables debido a que el porcentaje de desintegración cumplió con el mínimo del 90%. Se considera que las muestras PBS90/TPS10 y PBS podrían alcanzar el porcentaje de desintegración que se requiere, en un lapso de tiempo mayor a los 3 meses de duración de la prueba, aun así, el tiempo de desintegración de las mezclas es menor al tiempo de desintegración de los plásticos de origen fósil o sintético (PE, LDPE, PP). Estos resultados se deben a la mayor velocidad de biodegradación del TPS respecto al PBS, resultante de su afinidad al agua y una mayor actividad de los microorganismos que favorece la desintegración del material en menor tiempo.

De acuerdo con los resultados, la mezcla con 50% de almidón podría presentar beneficios al medio ambiente y a la industria, debido a que los empaques de un solo uso que se produzcan con esta mezcla se desintegrarían casi en su totalidad, lo que contribuiría principalmente a disminuir la acumulación de materiales plásticos. Adicionalmente, al provenir de fuentes naturales no se generarían sustancias tóxicas que afecten los diferentes ecosistemas. Por otro lado, para la industria la adición de mayores cantidades de almidón representaría una disminución en los costos de producción de materiales de empaques y una reducción en la dependencia de materias primas extranjeras como el PBS.

**Figura 6.** Tasa de biodegradación del PBS, TPS y mezclas PBS/almidón. Crédito: elaboración propia.



## Conclusiones

Un aumento en la conciencia de nuestra sociedad durante los últimos años, sobre el impacto nocivo por el manejo inadecuado y el incremento en el uso de plásticos de fuentes fósiles, ha promovido la necesidad de ayudar a desacelerar este impacto sobre el medio ambiente.

Las mezclas base almidón, ofrecen una alternativa de gran interés a nivel nacional y mundial para la elaboración de empaques, ayudando a reducir la problemática ambiental, a través del uso de materiales naturales y biodegradables que perduren menos en el tiempo y puedan reincorporarse a la tierra.

La adición del almidón al PBS aumentó la tasa de desintegración respecto al PBS puro. La mezcla PBS50/TPS50 cumple con los criterios para considerarse como un material biodegradable debido a que la tasa fue mayor al 90%. Se observó que las mezclas PBS90/TPS10 y PBS70/TPS30, al tener menor contenido de almidón, el tiempo podría llegar a ser mayor a 3 meses.

Las mezclas PBS/TPS, representan una alternativa potencial para sustituir a los polímeros sintéticos en la fabricación de empaques de un solo uso, debido a que muestran propiedades funcionales similares a estos y exhiben la característica de ser biodegradables, lo que ayudaría en gran medida a contrarrestar la problemática ambiental causada por la acumulación de los plásticos.

Finalmente, las mezclas base almidón representan una opción interesante para reducir la dependencia de materias primas extranjeras y costos, gracias a que el almidón es una materia renovable que se puede obtener de diversas fuentes botánicas e inclusive de desechos agrícolas y/o agroindustriales.

## Referencias

- ❖ Adewale, P., Shokrollahi, M., y Lam, E. (2022). Starch modification for non-food, industrial applications: Market intelligence and critical review. *Carbohydrate Polymers*, 291(April), 119590. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119590>
- ❖ Agama, E., y Bello, L. A. (2017). Starch as an emulsions stability: the case of octenyl succinic anhydride (OSA) starch. In *Current Opinion in Food Science* (Vol. 13, pp. 78–83). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2017.02.014>
- ❖ Beluci, N. de C. L., Santos, J. dos, de Carvalho, F. A., y Yamashita, F. (2023). Reactive biodegradable extruded blends of thermoplastic starch and polyesters. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2022.100274>
- ❖ Cheng, H., Chen, L., McClements, D. J., Yang, T., Zhang, Z., Ren, F., Miao, M., Tian, Y., y Jin, Z. (2021). Starch-based biodegradable packaging materials: A review of their preparation, characterization and diverse applications in the food industry. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 114, pp. 70–82). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.017>
- ❖ Howard, J., Huang, A., Li, Z., Tufekci, Z., Zdimal, V., van der Westhuizen, H. M., von Delft, A., Price, A., Fridman, L., Tang, L. H., Tang, V., Watson, G. L., Bax, C. E., Shaikh, R., Questier, F., Hernandez, D., Chu, L. F., Ramirez, C. M., y Rimoin, A. W. (2021). An evidence review of face masks against COVID-19. In *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (Vol. 118, Issue 4). National Academy of Sciences. <https://doi.org/10.1073/pnas.2014564118>
- ❖ Lambert, S., y Wagner, M. (2017). Environmental performance of bio-based and biodegradable plastics: The road ahead. *Chemical Society Reviews*, 46(22), 6855–6871. <https://doi.org/10.1039/c7cs00149e>

- ❖ Nanda, S., Patra, B. R., Patel, R., Bakos, J., y Dalai, A. K. (2022). Innovations in applications and prospects of bioplastics and biopolymers: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(1), 379–395. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01334-4>
- ❖ Othman, A. R., Hasan, H. A., Muhamad, M. H., Ismail, N. 'Izzati, y Abdullah, S. R. S. (2021). Microbial degradation of microplastics by enzymatic processes: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(4), 3057–3073. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01197-9>
- ❖ Rosenboom, J. G., Langer, R., y Traverso, G. (2022). Bioplastics for a circular economy. *Nature Reviews Materials*, 7(2), 117–137. <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00407-8>
- ❖ Suchao-In, K., Koombhongse, P., y Chirachanchai, S. (2014). Starch grafted poly(butylene succinate) via conjugating reaction and its role on enhancing the compatibility. *Carbohydrate Polymers*, 102(1), 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.11.001>
- ❖ Zhang, S., He, Y., Yin, Y., y Jiang, G. (2019). Fabrication of innovative thermoplastic starch bio-elastomer to achieve high toughness poly(butylene succinate) composites. *Carbohydrate Polymers*, 206(October), 827–836. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.036>

Recepción: 2023/09/23.  
Aprobación: 2024/11/11.  
Publicación: 2025/01/13.