

Empaque a partir de fibra de agave y cáscara cacahuete Packaging from agave fiber and peanut shell

N. J. Arriaga-Manjarrez ^a, M. Medero-Villana ^a, C. Millán-Millán ^a, S. F. Rivas-Castro ^a,
M. R. Gallegos-Ortiz ^a y D. M. Rogel-Estrada ^a

^a División de Ingeniería en Industrias Alimentarias, Tecnológico de Estudios Superiores de Villa Guerrero, 51763, La Finca, Villa Guerrero, Estado de México.

Resumen

Actualmente la protección del medio ambiente es prioridad, el desarrollo de materiales biodegradables representa una solución o alternativa viable para reducir la contaminación por plásticos, se necesitan materiales que se degraden más rápido, mediante la acción de microorganismos, minimizando el impacto ambiental a diferencia de los plásticos convencionales, cuya degradación puede tardar siglos. Este proyecto propone la creación de un material de empaque biodegradable a partir de residuos orgánicos, aprovechando la fibra de agave (*Agave angustifolia* Haw.), cuya industria solo utiliza el 45% de la planta, dejando el 55% como desecho ambiental (Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 2024). Además, se incorpora la cáscara de cacahuete (*Arachis hypogaea* L.), rica en celulosa, hemicelulosa y lignina, aporta resistencia y durabilidad al material. El objetivo con este desarrollo, es ofrecer una solución o alternativa ecológica para empaques de productos sólidos y secos en la industria alimentaria, que garantice la protección e inocuidad de los alimentos, fomentando el aprovechamiento eficiente de residuos agroindustriales y reduciendo el uso de plásticos contaminantes.

Palabras Clave: Agave, Cacahuete, Cáscara, Empaque, Fibra.

Abstract

Currently, environmental protection is a priority, and the development of biodegradable materials represents a viable solution to reducing plastic pollution. It is essential to create materials that decompose more quickly through the action of microorganisms, minimizing environmental impact compared to conventional plastics, which can take centuries to degrade. This project proposes the creation of a biodegradable packaging material from organic waste, specifically utilizing the fiber of *agave* (*Agave angustifolia* Haw.), of which only 45% of the plant is used by the industry, leaving 55% as waste (Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 2024). Additionally, peanut shells (*Arachis hypogaea* L.), rich in cellulose, hemicellulose, and lignin, are incorporated to enhance the material's strength and durability. The objective of this development is to provide an ecological packaging alternative for solid and dry products in the food industry, ensuring food protection and safety while promoting the efficient use of agro-industrial waste and reducing the reliance on polluting plastics.

Keywords: Agave, Fiber, Packaging, Peanut, Shell.

1. Introducción

En la actualidad, la protección del medio ambiente se ha convertido en una prioridad global, lo que ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles en diferentes sectores industriales. Uno de los principales problemas ambientales es la contaminación por plásticos, cuya producción y acumulación han aumentado de manera exponencial en las últimas décadas. Desde los años 50, la fabricación de plásticos

ha crecido de forma constante, alcanzando los 465 millones de toneladas en 2018, de las cuales el 87% ya se ha convertido en desecho (Parker, 2020). Este incremento ha generado graves impactos ecológicos, afectando la fauna, los ecosistemas y la calidad del suelo, el agua y el aire (García-Astillero, 2019). Frente a esta problemática, surge la necesidad de desarrollar materiales biodegradables que reduzcan el impacto ambiental y constituyan una alternativa viable a los empaques plásticos convencionales.

*Autor para la correspondencia: monserrat.mv@villaguerrero.tecnm.mx

Correo electrónico: nellyarriaga151@gmail.com (Nelly Jazmín Arriaga-Manjarrez), monserrat.mv@villaguerrero.tecnm.mx (Montserrat Medero-Villana), cesar.mm2@villaguerrero.tecnm.mx (César Millán-Millán), sofia.rc@villaguerrero.tecnm.mx (Sofía Fernanda Rivas-Castro), maria.go@villaguerrero.tecnm.mx (María del Rosario Gallegos-Ortiz) y dulce.re@villaguerrero.tecnm.mx (Dulce María Rogel-Estrada).

Los materiales biodegradables, aquellos que pueden descomponerse por acción de microorganismos, representan una solución prometedora. Su desarrollo implica la selección de materias primas renovables, como fibras vegetales y residuos agrícolas, que al ser transformadas adquieren propiedades mecánicas adecuadas para su aplicación en empaques. El aprovechamiento de residuos agrícolas es una estrategia clave para minimizar la contaminación y mejorar la eficiencia de los procesos productivos.

Para desarrollar un material de empaque biodegradable hay que hacer un gran trabajo de investigación y desarrollo, pues todo empieza por la selección de ciertas materias primas renovables, sean plantas o restos de vegetales, que una vez tratadas y transformadas a nivel molecular le confieren las propiedades que se desean, como resistencia, flexibilidad y capacidad de biodegradación. Además, se tiene que considerar y evaluar la eficiencia del proceso de producción, el costo, la seguridad y la calidad que presentará el material una vez terminado. El presente proyecto pretende desarrollar un material de empaque biodegradable, funcional en su aplicación y que, una vez transcurrido su uso, pueda descomponerse de forma segura, ayudando así a reducir su impacto.

En la industria del agave, por ejemplo, solo se utiliza el tallo o piña, lo que representa el 45% del peso total de la planta, mientras que el 55% restante, correspondiente a las hojas, es desechado a cielo abierto, generando un problema ambiental significativo (Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 2024). A su vez, la cáscara de cacahuate, un subproducto de la producción de la palanqueta, posee una composición rica en celulosa, hemicelulosa y lignina, lo que le confiere propiedades mecánicas que pueden ser aprovechadas en la fabricación de materiales biodegradables (Núñez-Hernández, 2023).

En el sur del Estado de México la fibra de agave *Agave angustifolia* Haw. y la cáscara de cacahuate *Arachis hypogaea* L. son subproductos agrícolas que al ser desechados no reciben un tratamiento adecuado. Se parte del uso de estas materias primas, sabiendo que las fibras contribuyen a mejorar las propiedades mecánicas aportando dureza, resistencia, flexión e impacto y la cáscara de cacahuate por su composición fisicoquímica, aporta resistencia mecánica, y durabilidad.

El desarrollo de este material presenta desafíos importantes, entre ellos la eficiencia del proceso de producción, el costo, la seguridad y la calidad del producto final. La optimización de estos factores es esencial para garantizar la viabilidad de la propuesta en la industria del empaque, particularmente en el sector alimentario, donde se busca ofrecer una alternativa sustentable. Además, el uso de estos residuos agrícolas no solo contribuiría a la reducción de desechos, sino que también beneficiaría a las comunidades productoras al agregar valor a subproductos tradicionalmente desaprovechados (Aguilar Novillo, Enríquez Estrella, & Uvidia Cabadiana, 2022).

2. Desarrollo experimental

2.1. Recolección de la materia prima

2.1.1. Bagazo de agave y cáscara de cacahuate

La fibra de agave se recolectó en San José Chalmita, Tenancingo; dicha fibra es obtenida de la molienda de agave, donde se desecha el residuo tras el proceso de producción del

mezcal y otros productos. El agave utilizado se encontraba en una fase de maduración plena, común en plantas destinadas a la producción de mezcal, lo que asegura un contenido elevado de azúcares y lignocelulosa en el bagazo. Se recolectaron 20 kilos que han sido secados al sol durante 1 semana. La textura que presenta es suave y fresca, con un color café oscuro. También se encuentra un aporte de celulosa, hemicelulosa y lignina. La cáscara de cacahuate se obtuvo de Chalma, Ocuilan, dentro de la zona sur del Estado de México, donde se genera como subproducto en la elaboración de palanquetas y otros productos. Ambas fibras son transportadas en bolsas de tela para después ser procesadas.

2.2. Acondicionamiento de residuos

Los residuos fueron sometidos a un proceso de limpieza y desinfección utilizando agua y plata coloidal, siguiendo las indicaciones del fabricante de este biocida. Posteriormente, se deshidrataron a 60 °C durante 15 horas en un prototipo desarrollado en el TESVG. Este equipo cuenta con un sistema de calentamiento controlado mediante resistencias eléctricas y ventilación forzada, su rango de temperatura va de 25 °C a 265 °C y dispone de un pirómetro para el control preciso de la temperatura. La deshidratación de los residuos permite reducir su actividad de agua y volumen, lo que facilita su manejo, almacenamiento y evita la proliferación de microorganismos. Una vez secos, con la ayuda de un higrómetro se obtuvo una humedad del 12% y los residuos fueron pulverizados con un molino de cuchillas con criba fina (granuladores), tamizados a un tamaño de partícula de entre 0.35 a 0.5 mm y almacenados en bolsas selladas al vacío, en una empacadora al vacío Torrey, modelo EVD-20. La metodología propuesta se basa en la técnica de elaboración de envases biodegradables a partir de dos variedades de fibra de agave (*Agave americana* L. y *Agave fruticosa* A.), donde se introdujo un nuevo paso, (Huerta, D., & Tenorio, E., 2020, p.28, modificado por Autor de la Adaptación, 2024).

2.3. Formulaciones y desarrollo del material de empaque

Se realizaron siete formulaciones en las que se variaron los contenidos de resina, fibra de agave y cáscara de cacahuate, de los resultados obtenidos, se determinó la formulación óptima, de acuerdo a sus características, modificando las proporciones de los residuos y la resina grado alimenticio (tabla 1).

Tabla 1. Formulaciones aplicadas en la fase experimental

Tratamiento	Resina %	Fibra de agave %	Cáscara de cacahuate %
1	10	45	45
2	20	40	40
3	30	35	35
4	40	30	30
5	50	25	25
6	60	20	20
7	70	15	15

Según los tratamientos descritos previamente, se combinan las proporciones de resina, fibra de agave y cáscara conforme a la formulación correspondiente. La mezcla se prensa con

papel encerado hasta obtener una placa de 2 mm de espesor. Posteriormente, se deja secar durante 20 horas antes de moldearla en forma de caja (Figura 1), siguiendo un patrón predefinido. Finalmente, el material se deja secar completamente por 24 horas para garantizar su estabilidad estructural (Huerta Andrade & Tenorio Chisaguano, 2020, p. 28).



Figura 1. Moldeado de material de empaque

2.4. Evaluación del material para empaque

Las características físicas, mecánicas, de transferencia de masa, cálculos de biodegradabilidad fueron evaluadas de acuerdo al método ASTM-D-6400-23 y al método ASTM-D-6954-18 para así obtener la efectividad del producto final. La norma ASTM D6400 (2012) y ASTM D5338-98 (2003) de los Estados Unidos define que un polímero biodegradable como un material que se pueden descomponer los microorganismos en dióxido de carbono, componentes inorgánicos, agua y biomasa (Bastidas, 2022).

La norma ASTM D4102-82 (2015), modificada por (Sirakushaa y Pietro 2008 como se cita en Bastidas 2022), establece un análisis de biodegradación que evalúa la degradación de los materiales al ser expuestos a la intemperie; Pérdida de peso basada en porcentaje biodegradable en seis semanas. La norma ASTM D5338-98 (2003), establece la determinación aeróbica de los materiales convencionales, una norma para medir la degradación (Pacheco, 2014 como se cita en Bastidas 2022).

2.5. Diseño estadístico

Se consideraron cuatro variables para el diseño estadístico, la primera la biodegradabilidad, que es una variable respuesta que mide el porcentaje de biodegradabilidad del empaque; la segunda variable es el tiempo de exposición en días, es una variable predictora que mide el tiempo de exposición del empaque a condiciones de biodegradabilidad; la tercera es la temperatura a la que se realiza la prueba de biodegradabilidad y la cuarta la humedad relativa durante la prueba de biodegradabilidad.

Se utiliza un modelo de regresión lineal múltiple para evaluar la relación entre las variables anteriormente descritas. Un ANOVA para evaluar la significancia estadística del modelo y las variables predictoras y el cálculo de coeficientes de regresión, para evaluar su significancia estadística.

3. Resultados y discusión

En las tres primeras formulaciones, la baja cantidad de resina impide una humectación adecuada, lo que dificulta la obtención de una mezcla homogénea. En la cuarta formulación, la mezcla presenta una mejor integración; sin embargo, al secarse, la placa resultante es frágil y se desmorona con facilidad. En las formulaciones con un 50% a 70% de resina, la mezcla adquiere mayor cohesión, aunque el material final presenta un aspecto más plástico y una distribución desigual de las fibras (Figura 2). En algunas áreas, se observa un exceso de resina sin presencia de residuos, lo que compromete la uniformidad del material. Además, el tamaño relativamente grande de las partículas de fibra influye en la cohesión de la mezcla, afectando su estabilidad estructural y dificultando una distribución homogénea de los componentes.



Figura 2. Imagen de los siete tratamientos

Con base en estos resultados, se propuso una formulación optimizada con un 55% de resina, 22.5% de cáscara de cacahuete y 22.5% de fibra de agave (Figura 3), logrando un equilibrio entre cohesión, resistencia mecánica y flexibilidad del material. Esta formulación mejorada permitió obtener un material uniforme, con buenas propiedades estructurales y estabilidad en su forma.

El tamizado de las fibras se presenta como una estrategia efectiva para mejorar la homogeneidad de la mezcla, lo que permite obtener una estructura más compacta y uniforme. Asimismo, el proceso de prensado contribuye a la reducción de irregularidades en el espesor del material, lo que puede favorecer su aplicación en empaques con especificaciones más estrictas.

Las pruebas de biodegradabilidad, realizadas conforme a los estándares ASTM-D-6400-23 y ASTM-D-6954-18, demostraron que el material presenta una degradación acelerada en condiciones ambientales, en comparación con plásticos convencionales. Cabe destacar que faltan pruebas experimentales que den evidencia para confirmar su viabilidad como alternativa sustentable para empaques en la industria alimentaria. Después de haber expuesto el empaque a condiciones ambientales normales en el transcurso de 3 a 4 semanas los cambios observables han sido pérdida de resina biodegradable, pérdida de brillo o color, pérdida de textura, aumento de porosidad en la superficie y mayor fragilidad en la estructura; lo que coincide con lo reportado por (Bastidas, 2022).

No obstante, aún es necesario evaluar su desempeño frente a factores como embalaje, daños mecánicos, transporte, entre otros, así como su compatibilidad con distintos tipos de alimentos. Además, futuras optimizaciones podrían centrarse en el desarrollo de aditivos naturales que mejoren sus propiedades mecánicas sin comprometer su biodegradabilidad.



Figura 3: Empaque prototipo.

4. Conclusiones

El desarrollo del material de empaque biodegradable a partir de fibra de agave y cáscara de cacahuate demostró ser una alternativa viable y sustentable para reducir el uso de plásticos convencionales en la industria alimentaria. Se identificó que la proporción de resina es un factor determinante en la cohesión y resistencia mecánica del material, ya que formulaciones con menos del 40% de resina resultaron frágiles. La formulación optimizada (55% resina, 22.5% cáscara de cacahuate y 22.5% fibra de agave) logró un equilibrio adecuado entre resistencia, flexibilidad y biodegradabilidad, permitiendo obtener un material homogéneo y funcional.

Este desarrollo no solo contribuye a la reducción de desechos plásticos, sino que también promueve el aprovechamiento de residuos agroindustriales, beneficiando a comunidades productoras. Futuras investigaciones podrían centrarse en mejorar la resistencia mecánica del material mediante la incorporación de aditivos naturales y evaluar su desempeño en condiciones de almacenamiento prolongado. Como alternativa de propuesta se pretende utilizar en alimentos como empaque secundario para; cereales y alimentos con porcentaje bajo en grasa y humedad.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Tecnológico de Estudios Superiores de Villa Guerrero por hacer posible realizar este proyecto en sus instalaciones.

Referencias

- ASTM International. (2023). ASTM D6400-23: Standard specification for labeling of plastics designed to be aerobically composted in municipal or industrial facilities. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D6400-23>.
- ASTM International. (2012). ASTM D6400-12: Standard specification for labeling of plastics designed to be aerobically composted in municipal or industrial facilities. ASTM International. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/80559/535886bbe6845a92b175dc02db3ee9/ASTM-D6400-12.pdf>.
- ASTM International. (2003). ASTM D5338-98: Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials Under Controlled Composting Conditions. ASTM International. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/33345/ab81311169804a30b761d30c73b583f9/ASTM-D5338-98-2003-.pdf>.
- ASTM International. (2015). ASTM D4102-82: Standard Test Method for Thermal Oxidative Resistance of Carbon Fibers. ASTM International. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/93020/8c8106c3eb7d4f39b362d986cb55b47b/ASTM-D4102-82-2015-.pdf>.
- ASTM International. (2018). ASTM D6954-18: Standard guide for exposing and testing plastics that degrade in the environment by a combination of oxidation and biodegradation. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D6954-18>
- Aguiar Novillo, S., Enríquez Estrella, M., & Uvidia Cabadiana, H. (2022). Residuos agroindustriales: su impacto, manejo y aprovechamiento. Revista Facultad de Ciencias Básicas, 14(1), 59–72. <https://10.26621/ra.v1i27.803>
- Bastidas-Mora, S.A. (2022). Desarrollo de un plástico biodegradable a base de cáscara de toronja amarilla (*Citrusx paradisi MacFad*) y almidón de maíz (*Zeamays L.*). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. <https://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/18569/1/T-UCSG-PRE-TEC-CIA-97.pdf>
- Colin-Torres, J., González-Peña, M.M., Hidalgo-Reyes, M., Pérez-López, A. (2024). Desempeño físico-mecánico de un biocompuesto de matriz epóxica reforzado con fibra de Agave angustifolia Haw. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 30(1). <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2023.02.012>
- García, A. A. (2019). Contaminación por plásticos: causas, consecuencias y soluciones. Ecología Verde. https://www.ecologiaverde.com/contaminacion-por-plasticos-causas-consecuencias-y-soluciones-2114.html#anchor_3
- Huerta Andrade, E. D., & Tenorio Chisaguano, E. R. (2020). Diseño de un prototipo de envase biodegradable a partir de la fibra de agave (Tesis de pregrado). Universidad Técnica de Cotopaxi.
- Núñez-Hemández, D. Y. (2023). Concretos vegetales con agregados orgánicos provenientes de los residuos de la cáscara de cacahuate: Estudio de las propiedades mecánicas, físicas y térmicas. Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción. <http://eprints.uanl.mx/26336/1/1080312703.pdf>
- Parker, L. (2020). La contaminación por plástico es un gran problema, pero aún se pueden implementar soluciones. National Geographic https://www.nationalgeographic.com/ciencia/2020/10/contaminacion-por-plastico-problema-y-posibles-soluciones_