

EVALUACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA MEJORAR LA DEGRADABILIDAD DEL POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD

ASSESSMENT OF METHODOLOGIES TO IMPROVE THE DEGRADABILITY OF LOW DENSITY POLYETHYLENE

RESUMEN

La alta demanda de poliolefinas en presentaciones de bolsas plásticas y empaques de un solo uso que disminuyen la posibilidad de reciclar los residuos; y que en la actualidad constituyen un problema de contaminación muy importante, impulsa a buscar soluciones con enfoque en la sustentabilidad. Es por ello por lo que el desarrollo de materiales avanzados es un área con constante crecimiento, ya que tiene el objetivo de crear materiales con propiedades similares y que además sean fácilmente asimilados por el entorno. En este trabajo se estudiaron los resultados y avances en temas del mejoramiento de la degradabilidad del polietileno de baja densidad, se presentan las metodologías actuales utilizadas para la cuantificación de esta propiedad y los procesos que lleva a cabo el polímero hasta su completa asimilación por el medio ambiente. Este trabajo de revisión se basó en recopilar y evaluar resultados publicados en trabajos de investigación de los últimos 10 años, presentando estudios de degradación por radiación UV, intemperismo acelerado, degradación por plasma, uso de aditivos (oxodegradantes), entre otros. Este extenso provee un panorama de las investigaciones desarrolladas a la solución de la problemática de contaminación por plásticos.

Palabras clave: LDPE; intemperismo acelerado; degradación.

CARLOS D. SALAZAR
HERNÁNDEZ¹

ROSA I. NARRO
CÉSPEDES¹

MARÍA G. NEIRA
VELÁZQUEZ²

BRENDA R. CRUZ ORTIZ¹

1. Departamento de
Polímeros, Facultad de
Ciencias Químicas, Unidad
Sureste, UAdeC.

2. Departamento de
Química Macromolecular,
Centro de Investigación en
Química Aplicada.

Correspondencia
c_hernandez@uadec.edu.mx

ABSTRACT

The high demand for polyolefins in plastic bags and single-use packaging, which reduce the possibility of recycling waste and constitute a very important pollution problem, drives us to seek solutions focusing on sustainability. It is due to the development of advanced materials, which is an area with constant growth since it aims to create materials with similar properties that are also easily assimilated by the environment. In this work, the results and advances related to improving the degradability of low-density polyethylene were studied, and the current methodologies used for quantifying this property and the processes carried out by the polymer until its complete assimilation by the environment are presented. This review work was based on collecting and evaluating results published in research papers from the last 10 years, presenting studies on degradation by UV radiation, accelerated weathering, plasma degradation, and the use of additives (oxodegradants). This extension provides an overview of the research developed to solve the problem of plastic pollution.

Keywords: LDPE; accelerated weathering; degradation.

INTRODUCCIÓN

El descubrimiento e industrialización de los plásticos ha sido un parteaguas en la vida cotidiana, los productos de uso cotidiano han encontrado en los polímeros un sustituto ideal en los materiales con los que son fabricados, los plásticos tienen propiedades como la flexibilidad, aislante térmico, aislante eléctrico, baja permeabilidad o resistencia a la oxidación que otros materiales como los metales, madera o cerámicos no poseen (Abraham y col., 2017). El polietileno de baja densidad (LDPE) es uno de los polímeros con mayor importancia industrial y económica en la actualidad siendo al menos una tercera parte de la producción global en plásticos (Heimowska, 2023), esto debido a sus diversas aplicaciones como empaques de alimentos, bolsas de supermercado, películas para envolver paquetería, cubiertas para la agricultura o empaques de materiales médicos. Estos materiales tienen la característica en común de ser productos de un solo uso los cuales posterior a cumplir su cometido

son desechados, el LDPE es la poliolefina más importante en la fabricación de productos de esta naturaleza seguido por el polipropileno, siendo estos dos materiales alrededor del 92% de los plásticos sintéticos producidos con estas aplicaciones (Ghatge y col., 2020). Así, constantemente el LDPE ha crecido en importancia ambiental al producirse una gran cantidad de residuos, impulsados por la utilidad de los productos de un solo uso, sus muy bajos costos de producción y la creciente demanda de plásticos en la actualidad.

Diversos esfuerzos se han llevado a cabo para remediar el impacto ambiental por plásticos ya sea desde el origen como la utilización de recursos renovables para obtener monómeros con los que se sintetizan (llamados biopolímeros), alargando la vida útil del plástico mediante el reciclaje y reúso, implementando regulaciones o programas para disminuir su consumo, adoptando metodologías para la disposición de los residuos como la incineración, compostaje, o la degradabilidad (Efraín Rodríguez-Alba y col., 2023). El LDPE al ser un polímero del etileno, es altamente hidrofóbico, inerte y estable a las temperaturas ambientales, por lo que su tiempo de degradación en el ambiente supera los 500 años, debido a esto, los esfuerzos se ven obstaculizados por la naturaleza del LDPE (Ghatge y col., 2020). El reciclaje no es aplicable a todos los polímeros y en el caso del LDPE éste pierde propiedades mecánicas deseables, disminuyendo las veces y la cantidad de material que puede ser sometido a estos tratamientos, la incineración conlleva una muy alta producción de gases de efecto invernadero como el CO_2 , el compostaje se limita por los microorganismos y las condiciones en que el LDPE pueda servir eficientemente como fuente de carbono. Aunado a esto, las regulaciones sobre el consumo de este plástico entran en conflicto directo de intereses con la demanda en alimentos o equipo médico que requieren forzosamente de empaques o envolturas que aseguran su caducidad o esterilidad. El desarrollo de biopolietileno a partir de recursos renovables produce un material químicamente idéntico al LDPE convencional, lo que significa que adquiere la misma problemática de baja degradabilidad y alta contaminación. Y finalmente la eliminación en vertederos y sitios de disposición final tienen la desventaja de que al ser un material inerte su asimilación por el entorno conlleva muchos años, además, al ser la fotodegradación el principal factor de degradación del LDPE en un medio natural, condiciona al plástico de estar a exposición solar, alargando la vida de

los residuos subterráneos; este tema se detallará más adelante (Rahman & Bhoi, 2021).

Esta disposición en espacios naturales abarca el 72% de los finales del LDPE seguido de la incineración (9%) y el reciclaje (7%), esta presencia en espacios naturales es tanto en sitios controlados o en áreas naturales terrestres como marítimas (Yao y col., 2022). Aunque se ha catalogado al LDPE como un polímero no tóxico; pues no desprende químicos dañinos durante su proceso de degradación, se ha reportado que las redes de las cadenas del polímero pueden acarrear materiales más difíciles de degradar como los bifenilos policlorados (Ghatge y col., 2020), las cuales pueden terminar siendo ingeridas por animales, problemática que también se aborda debido a la ingesta accidental por parte de la fauna, existen gran cantidad de noticias e investigaciones que buscan estudiar el LDPE como parte de la dieta accidental de moluscos, peces y mamíferos terrestres (Sánchez y col., 2024). Otro tema de amplio estudio relacionado con la ingesta aborda la propiedad de que el LDPE al degradarse y disminuir su tamaño de cadena; y de no darse el proceso de degradación completa, forma los microplásticos, estos son polímeros con tamaños de partículas menores a 5 mm de diámetro, es decir, siguen siendo cadenas largas de polímeros pero se encuentran desbaratadas y son de un tamaño aparente menor y mantienen propiedades químicas similares de resistencia al factores ambientales (Zaini y col., 2024). Esto propicia el movimiento de las partículas por efectos atmosféricos haciendo que contaminen más fácilmente los ecosistemas y sea imposible su recuperación, se han realizado estudios de determinación de microplásticos en muestras de aguas potables de consumo humano, en alimentos cotidianos y contaminación en cosechas, además que su presencia en el agua causa alteraciones al ciclo de fotosíntesis de plantas marinas al interferir con la refracción de la luz (Babaei y col., 2024).

El conjunto de estas problemáticas significa un tema de gran importancia de estudio para buscar soluciones que ayuden a la disminución como remediación del impacto ambiental por plásticos y microplásticos. Es por ello que en este trabajo se presenta un análisis de las metodologías y tecnologías desarrolladas en la actualidad que buscan mejorar la degradabilidad del LDPE, se discutirán los fundamentos de su funcionalidad, así como se evaluarán trabajos de

investigación relacionados con el tema en los últimos 10 años, señalando sus resultados y brindando una perspectiva del panorama actual del desarrollo de LDPE degradable, así como de señalar las posibles áreas de estudio de interés en el futuro.

MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo se presenta un marco teórico de la degradabilidad del LDPE, posteriormente se muestran los resultados de la revisión de la literatura de metodologías que son temas de investigación para el mejoramiento de la degradabilidad, se comparan resultados en cuestiones de rendimiento de degradabilidad y tiempos de análisis, y finalmente se discutirán ventajas y desventajas de las investigaciones actuales, así como retos de las investigaciones futuras.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

DEGRADABILIDAD COMO SOLUCIÓN A LA CONTAMINACIÓN

La degradabilidad en los polímeros involucra la disminución del tamaño de las cadenas a través de “cortes” en sitios puntuales de la estructura de forma acelerada; de manera que se disminuye su tiempo de vida considerablemente al volver vulnerables a las cadenas ante factores ambientales, esta disminución del peso molecular y del tamaño de las cadenas termina en la fijación del carbono que consiste en obtener productos en su estado más fundamental como agua, metano o dióxido de carbono. La alternativa de degradación ofrece varias potenciales ventajas a los demás métodos de disposición, primeramente ofrece disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, que a diferencia de la incineración se ha reportado que la producción de dióxido de carbono es mucho menor utilizando parte del material como fuente de carbono útil para organismos vivos, a esto se le conoce como biodegradación. Además, desde una perspectiva social, puede ser una solución viable a la creciente demanda de producción y consumo de plásticos, ya que no busca disminuir estas cantidades, sino destruir los residuos de forma acelerada para

disminuir su presencia y por consiguiente su impacto ambiental.

PROCESOS DE LA DEGRADABILIDAD DEL LDPE

La degradabilidad se lleva a cabo mediante procesos que pueden ser categorizados como abióticos y bióticos; en la Figura 1. se presenta un esquema general de las rutas de degradación de los polímeros. La degradación abiótica son todas aquellas reacciones llevadas a cabo por factores físicos como la luz, temperatura, humedad, etc. Mientras que los bióticos involucran la digestión del material por organismos vivos; ya sea macro o microorganismos, llevando a cabo procesos de degradación enzimática o química. Cabe destacar que ambas rutas principales de degradación tienen el mismo objetivo de fijación del carbono o asimilación de los átomos que componen las cadenas, sin embargo se debe señalar la diferencia de los procesos de pirolisis y gasificación donde las reacciones químicas causan la despolimerización para obtener materiales como hidrocarburos de 2-10 carbonos, los cuales se consideran recursos de valor que pueden ser utilizados para producir plástico nuevo entre otras aplicaciones (Wang y col., 2019). Tanto las degradaciones abióticas como bióticas son ampliamente estudiados en la actualidad en sistemas controlados; sin embargo, en el medio ambiente la degradación natural de los polímeros se da mediante el trabajo en conjunto de todos estos factores.

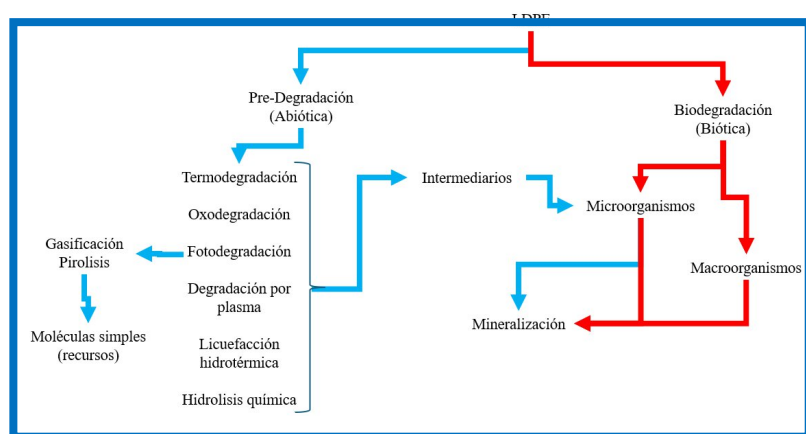


Figura 1. Procesos de degradación de polímeros

La importancia de este tema se ve reflejado en la cantidad de trabajos de investigación relacionados con el tema de degradación del LDPE, la Figura 2. presenta una gráfica de publicaciones científicas en la base

de datos ScienceDirect en el periodo 2009 a 2024, donde se observa una tendencia de crecimiento constante, lo cual implica un aumento de importancia e impacto en el tema.

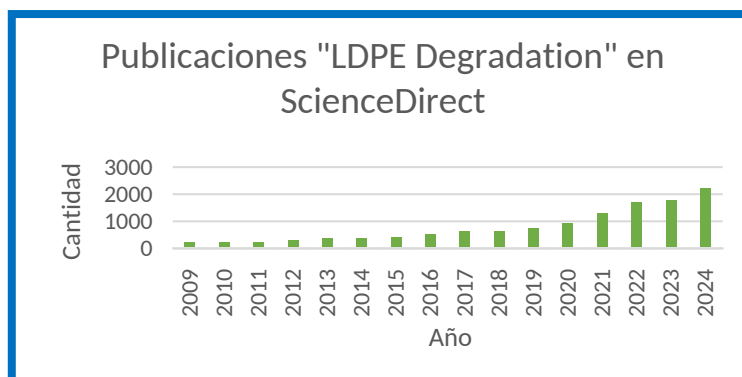


Figura 2. Artículos científicos sobre la degradación de LDPE por año

La degradación biótica puede darse con o sin la intervención de un proceso abiótico, es decir, la biodegradación está limitada por la cantidad de organismos que son capaces de digerir el polímero desde su estado base de largas cadenas de monómeros mediante una serie de reacciones debidas a las enzimas extracelulares que disminuyen el peso molecular, este proceso es necesario debido a que estas estructuras tienden a ser poco reactivas y difíciles de ingerir, por lo que a esta etapa de disminución de cadena para que pueda ser digerido por el microorganismo se le puede considerar de pretratamiento para obtener un polímero de menor peso molecular llamado intermediario (Kumar Sen & Raut, 2015). Esta etapa es más comúnmente realizada por procesos abióticos mediante acción de la temperatura en la termodegradación, acción de agentes ricos en oxígeno y altamente reactivos en la adición de prooxidantes (Wang y col., 2019), reacciones catalizadas por radiación principalmente UV; llamado fotodegradación (Llorente-García y col., 2020). Estos intermediarios de menor peso molecular pueden ser digeridos por una mayor gama de organismos, esto debido a que en este punto pierden gran parte de sus propiedades de tamaño, estabilidad química e hidrofobicidad, lo que como se mencionó previamente pueden constituir una fuente adecuada de carbono (Kumar Sen & Raut, 2015).

Un ejemplo de la aplicación de estos procesos en conjunto es el trabajo de investigación de Mier y colaboradores en 2023, quienes evaluaron la degradación de bolsas de LDPE, LDPE con un oxodegradante

(D2W) y una película a base de residuos de maíz, con y sin un pretratamiento de fotodegradación con UV a 260 nm y posteriormente degradados por larvas de gusanos de la harina (*Tenebrio molitor*). Se encontró que el efecto de la fotodegradación aumentó el grado de degradabilidad desde un 19 hasta un 23% de efectividad, también se encontró que el uso del oxodegradante D2W no fue un alimento accesible para las larvas, obteniendo tasas de mortalidad superiores al 98% (Mier y col., 2023).

METODOLOGÍAS PARA MEJORAR LA DEGRADABILIDAD DEL LDPE

Diversas metodologías están en constante estudio enfocadas en el desarrollo de polímeros con propiedades biodegradables mediante mezclas de polímeros o el uso de aditivos, la Tabla 1. Presenta algunos de los resultados obtenidos en degradación de LDPE mediante varias metodologías, en ellas se presentan resultados directos de porcentajes de pérdida de masa o comparación entre 2 muestras y su mejoramiento de degradabilidad. Una ventaja considerable del desarrollo de materiales poliméricos avanzados es que puede utilizar las tecnologías existentes en la industria para procesos de mezclado y extrusión, al igual que el objetivo es la obtención de materiales sustitutos con propiedades físicas competibles, pueden utilizar los mismos procesos de tratamiento como soplado de película, inyección o moldeo.

La formación de composites o compuestos biobasados de LDPE consiste en la mezcla del polímero con otros polímeros biodegradables, principalmente aquellos que pueden obtenerse de residuos agro-industriales ricos en celulosa, hemicelulosa y lignina. Estos materiales tienen la complejidad en mezclar polímeros que son altamente hidrofóbicos como hidrofílicos, por lo que constantemente es necesario el uso de compatibilizantes que ayuden a mejorar las interacciones interfaciales que propician a la correcta dispersión de la fase dispersa (Gomez-Caturla y col., 2022). Este tipo de materiales se ha reportado que no existe un atractivo nivel de degradación debido a que no se hacen modificaciones a la estructura del polietileno, por lo que sigue siendo inerte. Sin embargo, estudios presentan que existe un efecto de degradación debido a la mayor presencia de carbono adecuado para consumo de macro y microorganismos.

Los oxodegradantes son sustancias químicas que tienden a reaccionar

en presencia de oxígeno o luz UV de manera que promueven la oxidación de las cadenas poliméricas, aumentando la velocidad de aparición de sitios de reactivos ricos en insaturaciones, o grupos funcionales con oxígeno. Estos han demostrado una adecuada aceleración de los procesos abióticos, reportándose incluso pérdidas de peso del 81.6% en pruebas de intemperismo acelerado utilizando D2W como oxodegradante, aunque constantemente se menciona el requerimiento de condiciones como exposición, solar, humedad, temperatura, concentración de oxígeno y pH adecuados para que pueda llevarse de manera eficiente esta degradación (Heimowska, 2023). Además, en la literatura se presentan problemáticas con respecto a la biocompatibilidad de estos materiales, en un estudio realizado por Mier y colaboradores en 2023, se menciona una tasa de mortalidad del 98% de larvas capaces de consumir LDPE (Mier y col., 2023).

Sin embargo existen otros tipos de oxodegradantes como sales de metales de transición; principalmente Cu, Co, Ce, Mn, Ni y Fe, tal es el caso del uso de N-TiO₂; un material con atractivo de baja toxicidad, alta fotoactividad, y bajo costo, como revestimiento para acelerar la degradación fotocatalítica, donde se encontraron pérdidas de masa de masa de entre 0.97 y 1.38% a una exposición de 20 h con luz visible y en otro estudio se obtuvieron degradaciones de hasta el 50% pero utilizando luz UV durante 15 días (Ali y col., 2016; Llorente-García y col., 2020).

Una tecnología en constante crecimiento por su baja generación de residuos, bajos costos de recursos y diversidad de aplicación es la modificación superficial por plasma, en la literatura se han encontrado 2 aplicaciones de modificación superficial en relación con la degradación del LDPE, estudian el grado de oxidación y reducción de peso molecular de películas de LDPE mediante la erosión por plasma, el cual ha presentado resultados muy atractivos al mejorar la degradabilidad un 30% de acuerdo a un estudio realizado de pretratamiento y posterior degradación con bacterias (Ji y col., 2023). Otra aplicación esta en la modificación de la carga orgánica en los compuestos biobasados, insertando en la superficie cadenas de polímero que aumentan su hidrofobicidad superficialmente de manera que tenga mejores interacciones con la interfaz de LDPE sin la necesidad de un agente compatibilizante.

Tabla 1. Resultados de degradación por pérdida de masa en los últimos 10 años.

Ref.	Año	Metodología	Tratamiento	Material medido	Resultados en pérdida de masa
(Mostajo-Zavaleta & Ambur-Soncco, 2022)	2022	Biodegradación	Método Kavelman R. & Kendrick B. 1978, determinación de degradación por peso	Bolsas de LDPE	Aspergillus Orizae (24.13%), Aspergillus fumigatus (23.15%)
(Heimowska, 2023)	2023	Oxodegradante	Intemperismo acelerado en suelo y agua.	LDPE/D2W	81.6% en 39 meses
(Llorente-García y col., 2020)	2020	N-TiO ₂	Recubrimiento con N-TiO ₂ y exposición a luz visible	LDPE microplásticos de 5mm y 3mm de diámetro	0.97% en 20 h 1.38 % en 20 h
(Ali y col., 2016)	2016	N-TiO ₂	Recubrimiento con N-TiO ₂ y exposición a luz UV	LDPE	50% en 15 días
(Kormin y col., 2018)	2018	Biocomposito con almidón	Intemperismo acelerado por 6 meses	LDPE/Almidón de sagú	Aumento de 15.7% a 20.04%
(Ji y col., 2023)	2023	Degradación con plasma	Pretratamiento con plasma y biodegradación con batería	LDPE	Aumento de 50% a 80%
(Sura & Nain, 2024)	2024	Composito	Degradación fotocatalítica	LDPE/óxido de grafeno/nitruro de carbono	21% de degradación a los 10 días

CONCLUSIONES

El desarrollo de metodologías de degradación abiótica es un paso fundamental para la degradación del LDPE, aquellas existentes han mostrado una degradación positiva en menor o mayor grado, de manera que sientan las bases para la experimentación con mezclas nuevas, a diferentes concentraciones o con diferentes tratamientos. Sin embargo, no se puede seleccionar algún método como más o menos eficiente, pues en estos parámetros se deben tomar en cuenta todas las subetapas que conlleva la degradación, cuidando la formación de productos secundarios adversos. Así mismo, se presenta un panorama muy amplio para la aplicación de la tecnología de plasma en la mezcla de polímeros, teniendo principal presencia en

compuestos biobasados.

REFERENCIAS

- Abraham, J., Ghosh, E., Mukherjee, P., & Gajendiran, A. (2017). Microbial degradation of low density polyethylene. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36(1): 147–154. <https://doi.org/10.1002/ep.12467>
- Ali, S. S., Qazi, I. A., Arshad, M., Khan, Z., Voice, T. C., & Mehmood, Ch. T. (2016). Photocatalytic degradation of low density polyethylene (LDPE) films using titania nanotubes. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 5: 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2016.01.001>
- Babaei, A. A., Reshadatian, N., & Feizi, R. (2024). A state of the art-mini review on the sources, contamination, analysis, and consequences of microplastics in water. *Results in Engineering*, 23: 102827. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102827>
- Efraín Rodríguez-Alba, Alejandra E. Bernal Dubón, & Henley E. Gaitán López. (2023). La Ciencia de los Polímeros Biodegradables. *XXVI Verano de La Ciencia de La Universidad de Guanajuato*, 10.
- Ghatge, S., Yang, Y., Ahn, J.-H., & Hur, H.-G. (2020). Biodegradation of polyethylene: a brief review. *Applied Biological Chemistry*, 63(1): 27. <https://doi.org/10.1186/s13765-020-00511-3>
- Gomez-Caturla, J., Sanchez-Nacher, L., & Fenollar, O. (2022). Desarrollo de materiales compuestos que imitan la madera basados en matriz de biopolietileno, harina de cáscara de argán y diferentes compatibilizantes. *Revista de La Sociedad Española de Materiales*, 6.
- Heimowska, A. (2023). Environmental Degradation of Oxo-Biodegradable Polyethylene Bags. *Water*, 15(23): 4059. <https://doi.org/10.3390/w15234059>
- Ji, S. H., Seok, D. C., & Yoo, S. (2023). Improved biodegradability of low-density polyethylene using plasma pretreatment and plastic-degrading bacteria. *Environmental Technology & Innovation*, 32: 103449. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103449>
- Kormin, S., Kormin, F., & Dalour Hossen Beg, M. (2018). Study of natural weathering exposure on properties of lDpe incorporated with sago starch. *Materials Today: Proceedings*, 5(10): 21636–21643. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.07.013>
- Kumar Sen, S., & Raut, S. (2015). Microbial degradation of low density polyethylene

(LDPE): A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(1): 462–473. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.01.003>

Llorente-García, B. E., Hernández-López, J. M., Zaldívar-Cadena, A. A., Siligardi, C., & Cedillo-González, E. I. (2020). First Insights into Photocatalytic Degradation of HDPE and LDPE Microplastics by a Mesoporous N–TiO₂ Coating: Effect of Size and Shape of Microplastics. *Coatings*, 10(7): 658. <https://doi.org/10.3390/coatings10070658>

Mier, M. V., Reyes-Lomeli, K. P., Cervantes-Cabrera, G., Mata-Guadarrama, M. Á., López-Callejas, R., & Rojas-Valencia, M. N. (2023). Biodegradation of polyethylene, biodegradable-polyethylene bags and corn residues using *Tenebrio molitor* larvae. *South Florida Journal of Environmental and Animal Science*, 3(3): 135–147. <https://doi.org/10.53499/sfjeasv3n3-001>

Mostajo-Zavaleta, M. N., & Ambur-Soncco, R. L. (2022). Efectividad de *Aspergillus* en la degradación de polietileno. *South Florida Journal of Environmental and Animal Science*, 2(3): 234–253. <https://doi.org/10.53499/sfjeasv2n3-002>

Rahman, M. H., & Bhoi, P. R. (2021). An overview of non-biodegradable bioplastics. *Journal of Cleaner Production*, 294: 126218. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126218>

Sánchez, A., Vélez, D., & Devesa, V. (2024). Processes influencing the toxicity of microplastics ingested through the diet. *Food Chemistry*, 456: 139947. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139947>

Sura, A., & Nain, S. (2024). Visible light driven degradation of BPA and LDPE microplastic films using GO/SCN nanocomposite. *RSC Advances*, 14(48): 35336–35347. <https://doi.org/10.1039/D4RA06055E>

Wang, Z., Wei, R., Ning, X., Xie, T., & Wang, J. (2019). Thermal degradation properties of LDPE insulation for new and aged fine wires. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 137(2): 461–471. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7957-5>

Yao, Z., Seong, H. J., & Jang, Y.-S. (2022). Environmental toxicity and decomposition of polyethylene. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 242: 113933. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113933>

Zaini, N., Kasmuri, N., Mojiri, A., Kindaichi, T., & Nayono, S. E. (2024). Plastic pollution and degradation pathways: A review on the treatment technologies. *Heliyon*, 10(7): e28849. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28849>

