

Estudio sobre la Degradación Biótica de una Bolsa Comercial Biodegradable.

Anayansi Estrada-Monje^{1*}, María Maldonado Santoyo¹, Isis Rodríguez-Sánchez², Alain Salvador Conejo-Dávila¹, Erasto Armando Zaragoza-Contreras³ Catalina de la Rosa Juárez¹ y Anayansi Zaragoza-Estrada²

¹Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas, Omega No. 201, Col. Industrial Delta, León, Guanajuato. C.P. 37545, México.

²Unidad Profesional Interdisciplinaria Campus Guanajuato del Instituto Politécnico Nacional, Av. Mineral de Valenciana No. 200, Col. Fraccionamiento Industrial Puerto Interior, Silao de la Victoria, Guanajuato. C.P. 36275, México.

³Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. Miguel de Cervantes No. 120, Complejo Industrial Chihuahua, Chihuahua, Chih. C.P. 31136, México.
aestrada@ciatec.mx

Recibido: 23 de febrero de 2024

Aceptado: 8 de mayo de 2024

RESUMEN

Los plásticos biodegradables son materiales poliméricos que se descomponen por la acción de microorganismos, bajo ciertas condiciones, y, cuyos productos de degradación son compuestos como CO₂, agua, metano y/o biomasa, etc. que pueden reincorporarse al suelo sin contaminar. En la actualidad se han desarrollado numerosos productos etiquetados como “biodegradables”, como las bolsas desechables de un solo uso. Es importante considerar que estos productos deben ser etiquetados y desechados, bajo las condiciones adecuadas, para que puedan degradarse sin contaminar y cumplir su función como materiales alternativos a los polímeros convencionales. El objetivo de esta investigación fue observar el proceso de degradación biótica de una bolsa comercial biodegradable y la posible formación de microplásticos bajo esas condiciones.

Palabras claves: biodegradación, microplásticos, polímero biodegradable, PCL, almidón termoplástico.

ABSTRACT

Biodegradable plastics are polymeric materials able to degrade, under certain conditions, by the action of microorganisms, and whose degradation products are compounds such as CO₂, water, methane, biomass, etc., that can be reincorporated to the soil without being contaminants. Nowadays, numerous products marketed as “biodegradable” have been developed, like single-use disposable plastic bags. It is relevant to consider that these products must be labelled and disposed under the appropriate conditions so they can degrade without producing contaminants and fulfill their function as alternative materials to conventional polymers. The objective of this research is to observe the process of biotic degradation of a commercial biodegradable plastic bag, and the formation of microplastics under said conditions.

Key words: biodegradation, microplastics, biodegradable polymer, PCL, thermoplastic starch.

1. INTRODUCCIÓN

Los plásticos son uno de los cuatro materiales más importantes para la construcción en la era moderna, junto con el acero, la madera y el cemento (Long et al., 2022). En la actualidad son tan abundantes que se consideran la mayor fuente de contaminación ambiental (Andrady, 2011).

Los residuos plásticos se han esparcido en el ambiente desde sus inicios (Long et al., 2022); sin embargo, hasta los 80's se reconocieron como un peligro ecológico (Ryan, 2015). Los plásticos convencionales (no

biodegradables) no se descomponen ni se degradan por sí solos en periodos de tiempo cortos, esa es una de las razones por las que son durables y tienen muchas aplicaciones.

No obstante, los residuos plásticos entran en los ambientes naturales como resultado de un manejo inadecuado, es decir, por la falta de un proceso de selección y reciclado, y, debido a su resistencia a la degradación, pueden permanecer cientos de años y acumularse provocando problemas ambientales severos (Bergmann et al., 2022). Sobre todo, porque en los ambientes naturales, los plásticos pueden sufrir procesos de fragmentación que originan microplásticos y nanoplásticos, los cuales se ha demostrado que son peligrosos para los organismos vivos, porque pueden bioacumularse o desprender sustancias tóxicas peligrosas (Cucina, 2023).

En este contexto, una de las soluciones propuestas para el problema de acumulación de plásticos, es el desarrollo de materiales más amigables con el ambiente, entre los que se encuentran los plásticos biodegradables. Este tipo de materiales tienen la capacidad de descomponerse, cuando se encuentran bajo las condiciones adecuadas, en periodos de tiempo mucho más cortos que los plásticos convencionales que tardan de entre 70 a 1000 años en descomponerse (Chamas et al., 2020). La biodegradación es la habilidad de un material para romperse o descomponerse en sustancias más simples, como biomasa, agua, CO₂ o metano y sales minerales, mediante la acción de microorganismos.

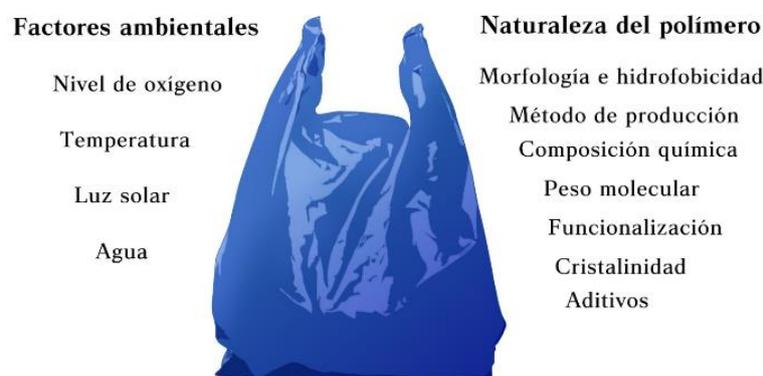


Figura 1. Factores que afectan al proceso de biodegradación de un material polimérico. Elaboración propia

En la Figura 1 se indican los factores que pueden afectar el proceso de biodegradación de un material polimérico, además de la presencia de microorganismos. Mientras que, el término bioplástico, típicamente incluye materiales bio-basados y plásticos biodegradables, algunos plásticos no bio-basados también pueden ser biodegradables, como por ejemplo los que tienen un origen vegetal (fuente renovable), como el almidón, o que provienen de bio-monómeros, como el ácido poliláctico (PLA), o biopolímeros extraídos como el polihidroxialcanoato (PHA) (Meereboer et al., 2020). Uno de los plásticos biodegradables más utilizados para sustituir a los polímeros como el polietileno (PE) es la Policaprolactona (PCL), que se ha utilizado para modificar almidón y proveerle de mejores propiedades mecánicas (Najemi et al., 2010).

Entre los productos más utilizados en la vida cotidiana están las bolsas de plástico desechables, cuyos materiales se han tratado de sustituir por otros que no contaminen, cuando sean desechadas al final de su vida útil. Entre los materiales que se ha desarrollado para este fin, se encuentra un material multifuncional a base de pectina, que está reportado que se degrada en suelo en 7 semanas (Qiang et al., 2024).

Existe otra investigación en la que se estudiaron seis bolsas de plástico comerciales biodegradables, fabricadas en poli (butilén adipato-*co*-tereftalato), (PBAT) y mezclas de PLA/PBAT, los investigadores reportaron que todas las bolsas estudiadas difícilmente son biodegradables anaeróbicamente a temperaturas mesófilas (Álvarez-Méndez et al., 2023).

Como se expresó en el párrafo anterior, se han propuesto nuevas clases de plásticos como alternativas potenciales para mitigar la contaminación por desechos plásticos. Muchos productos comerciales fabricados con estos plásticos alternativos, frecuentemente afirman que son biodegradables en las etiquetas debido a la

falta de regulación (Nazareth et al., 2019). Además, estudios experimentales ya han reportado la falta de degradación de algunos productos comerciales que afirman falsamente biodegradabilidad (Beltrán-Sanahuja et al., 2021; Nazareth et al., 2019).

Aunado a lo anterior, una revisión que evaluó varias normas técnicas utilizadas para certificar la biodegradabilidad de los plásticos demostró que los entornos experimentales utilizados por estas normas no cubren ampliamente las condiciones ambientales reales (Moreno et al., 2023).

En este contexto, es importante mencionar que, aunque muchos materiales comerciales son biodegradables y han sido evaluados bajo las normas correspondientes, muchos no lo son. Así mismo, en el tema de la formación de microplásticos derivados de polímeros biodegradables, aun falta mucho por estudiar, como, por ejemplo, si su permanencia en el ambiente puede ser tan dañina como la de los microplásticos derivados de polímeros convencionales.

En el presente artículo se presentan los resultados encontrados en una prueba de degradación biótica anaerobia en suelo, realizada en una bolsa de plástico comercial, que probablemente, está fabricada con almidón termoplástico y PCL y cuya etiqueta dice que la bolsa es 100 % biodegradable.

2. METODOLOGIA

Se tomó una muestra representativa (Figura 2b) de una bolsa comercial de plástico etiquetada como biodegradable y compostable (Figura 2a), y se analizó mediante FTIR en un equipo Thermo Scientific modelo Nicolet iS10 en un intervalo de 4000-400 cm^{-1} utilizando 16 escaneos por muestra.

Después, en un frasco de vidrio de 3 L se colocó una cama de perlita de 4 cm, luego una capa de tierra de invernadero, arriba de la tierra se colocó un cuadro de 10 X 10 cm de la bolsa comercial y se cubrió con otra capa de tierra de 4 cm y otra capa de perlita de 4 cm. Se añadieron 50 mL de agua y se cerró el frasco de manera hermética. Se mantuvo en un cuarto a temperatura ambiente, por 4 años.

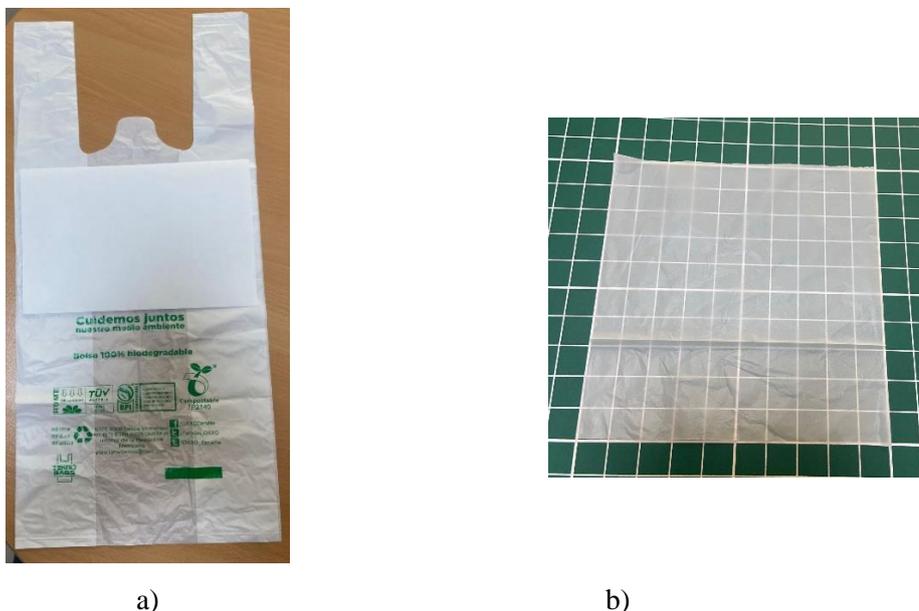


Figura 2. a) Bolsa comercial, b) muestra de bolsa de 10 X 10 cm.

En la Figura 3 se observa del lado izquierdo, el frasco con la muestra al inicio de la prueba, del lado derecho el frasco a los 4 años de prueba. Una vez transcurrido el tiempo de prueba, el frasco se abrió, se tamizó la tierra en contacto con el plástico y se colectaron las partículas menores a 1 mm. Los fragmentos de la bolsa de plástico sometida a la prueba, se colectaron y se analizaron mediante FTIR.



Figura 3. Frasco cerrado de manera hermética con la muestra de la bolsa biodegradable Lado izquierdo, inicio de la prueba; Lado derecho a los 4 años de prueba.

3. RESULTADOS.

El proceso de biodegradación de los plásticos depende de las condiciones ambientales, como temperatura, humedad y presencia de microorganismos, etc., y de las propiedades físicas y químicas del material, como la composición, el peso molecular, la cristalinidad, la estructura química, la hidrofiliidad, etc., (Kale et al., 2007).

La biodegradación anaerobia de los plásticos se refiere principalmente a la conversión del material polimérico en biogás y biomasa, que en ausencia de aire y por la acción de microorganismos anaerobios puedan utilizar de manera eficiente al polímero como una fuente de carbono para su crecimiento (Ali et al., 2021). En este caso, se observó que, después de 4 años de prueba, la muestra de polímero no se desintegró por completo, pues aún pueden verse pedazos pequeños de plástico. En la Figura 4 (a) se observa la tierra con pedazos pequeños del plástico.



Figura 4. a) Tierra del experimento que contiene pedazos de plástico, b) pedazo de plástico sacado de la tierra.

En la tierra sacada del frasco, la mayor parte del plástico no es visible a simple vista (Figura 4a); solo algunos fragmentos pueden apreciarse claramente. Por ello, algunos pedazos de plástico fueron separados de la tierra para que pudieran apreciarse mejor (Figura 4b).

La tierra en contacto con el plástico se tamizó y se separaron los fragmentos menores a 1 mm y los fragmentos mayores a 1 mm como se muestra en la Figura 5.

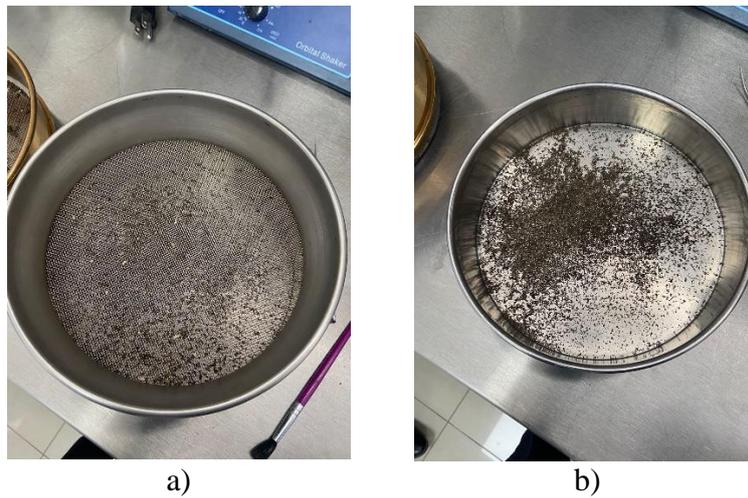


Figura 5. a) Partículas de tamaño mayor a 1 mm, b) partículas menores a 1 mm

La Figura 6 muestra una comparación entre la película de bolsa nueva (b) y la biodegradada (a). Se observa claramente un cambio de color de la película expuesta a condiciones anaerobias por 4 años, así como un deterioro considerable de la misma. Cabe mencionar que la película degradada es sumamente frágil y no puede ser manipulada porque se rompe.

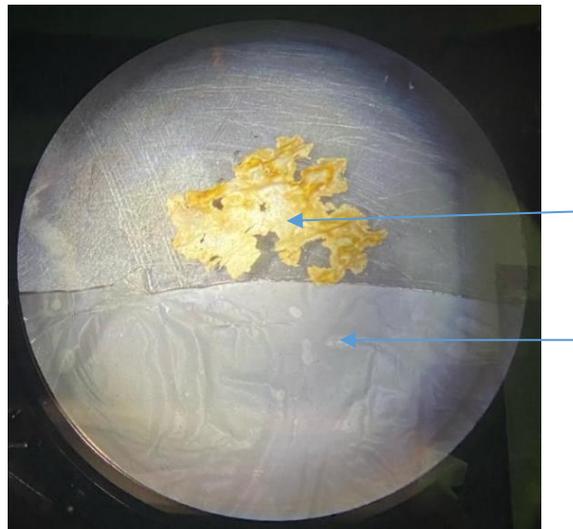


Figura 6. a) Película biodegradada, b) muestra de película nueva.

Las muestras colectadas de tierra y polímero, se colocaron en un microscopio. Se observó que la tierra contiene pequeños fragmentos de plástico, mayores y menores a 1 mm., que podrían ser considerados como microplásticos, aunque se tendrían que realizar más análisis para confirmar esto. En la Figura 7 se pueden observar las fotos tomadas del microscopio con un aumento de 20 X, de la tierra que no fue puesta en contacto con el plástico y la tierra proveniente de la prueba.

La degradación de los plásticos puede ser un proceso fisicoquímico (abiótico) o a través de la biodegradación (biótico). Generalmente el rompimiento del material polimérico de manera mecánica, se considera la primera etapa del proceso de degradación.

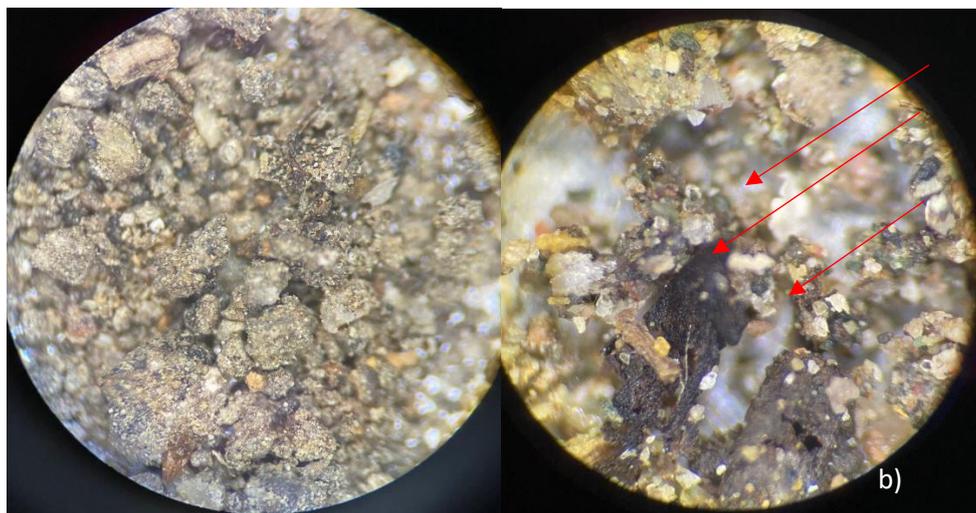


Figura 7. a) Muestra de tierra sin contacto con el plástico. b) Muestra de tierra en contacto con el plástico después de 4 años de prueba, en la que se observan pequeños fragmentos de plástico.

En las fotografías de la Figura 7 pueden observarse pequeños fragmentos blancos que son pedazos pequeños de la película de la bolsa (derecha), señalados con flechas rojas, mientras que en la fotografía de la izquierda no se observan.

Como se comentó en los párrafos anteriores, la fragmentación del polímero es la primera etapa de la degradación, por lo que puede suponerse que eventualmente los pequeños fragmentos de polímero biodegradable, generados en los 4 años de la prueba, podrían ser asimilados por los microorganismos e integrarse al suelo.

Espectroscopía infrarroja

En la Figura 8 se aprecia el espectro de infrarrojo de la bolsa nueva y de los fragmentos de la bolsa después de 4 años de la prueba anaerobia. Como se trata de una bolsa comercial, no se sabe exactamente la composición de la misma. Sin embargo, derivado del análisis de espectroscopía infrarroja que se realizó, se puede deducir que se podría tratar de un almidón termoplástico mezclado con PCL.

El espectro de infrarrojo de la bolsa nueva presenta bandas de absorción infrarroja características del grupo carbonilo en 1720 cm^{-1} , de los estiramientos simétricos y asimétricos de los grupos $-\text{CH}_2/-\text{CH}_3$, el estiramiento asimétrico y asimétrico del grupo $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ en 1645 cm^{-1} y 1240 cm^{-1} , en 1190 cm^{-1} el estiramiento del grupo $\text{O}-\text{C}-\text{O}$. Estas señales pueden corresponder a la PCL presente en la bolsa (Estrada-Monje et al., 2021).

Mientras que la banda de absorción alrededor de 3400 cm^{-1} , corresponden al estiramiento del grupo $\text{O}-\text{H}$, la banda de absorción en 1645 cm^{-1} corresponde al $\text{O}-\text{H}$ de la unidad anhidro glucosídica del almidón, mientras que las bandas de absorción en 1294 y 1157 cm^{-1} , corresponden a la fase cristalina y amorfa, respectivamente, del almidón.

En el espectro de infrarrojo de la bolsa biodegradada, pueden observarse las bandas de absorción características de la PCL y del almidón, mencionadas en párrafos anteriores que presenta el espectro de infrarrojo de la bolsa nueva, aunque con mucho menos intensidad. Sin embargo, la banda de absorción infrarroja como la de 3300 cm^{-1} asignada a los grupos $-\text{OH}$, prácticamente ha desaparecido, al igual que la banda de los grupos CH_2/CH_3 que ha disminuido considerablemente.

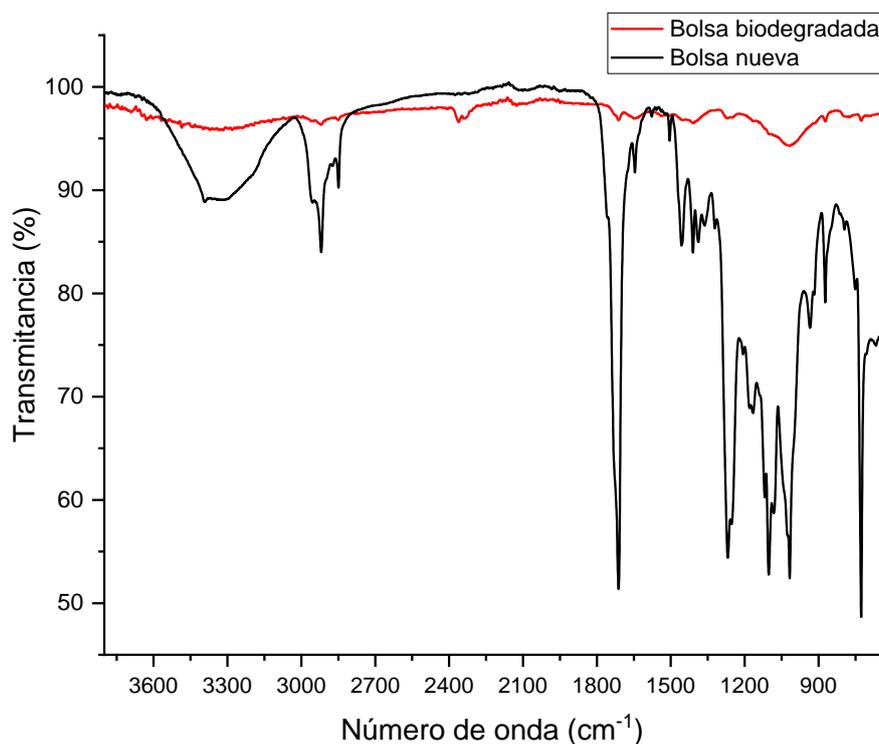


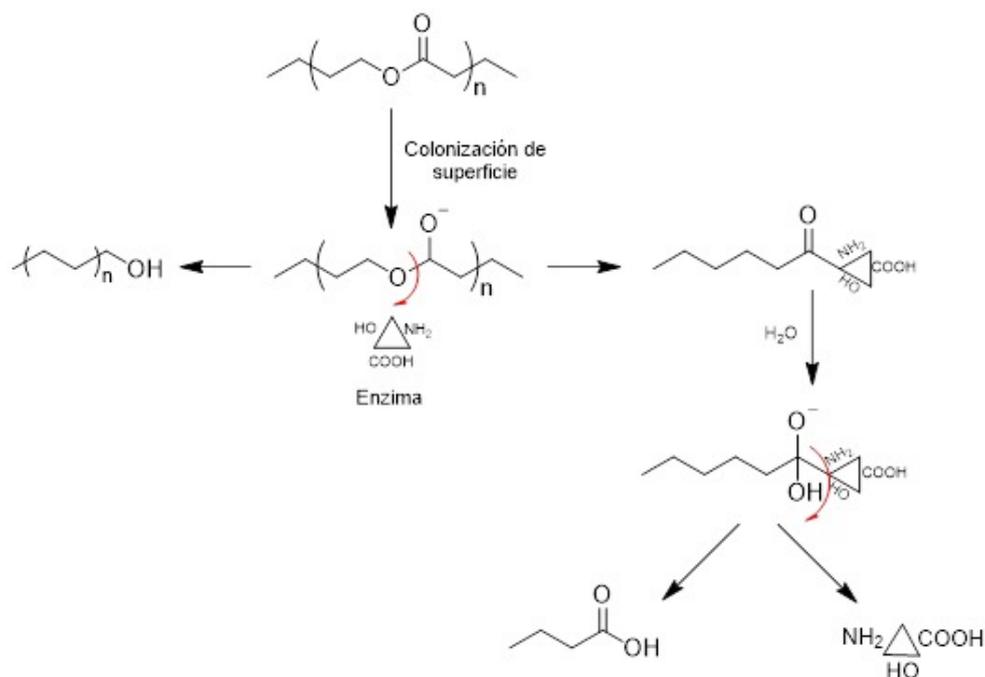
Figura 8. Espectros de infrarrojo de la bolsa biodegradada (4 años de prueba) y de la bolsa nueva.

4. DISCUSIÓN

La desaparición de las bandas de absorción, es un claro indicio de la degradación biótica del material. En este sentido, se tiene conocimiento de que los consorcios microbianos pueden biodegradar a la PCL (Ali et al., 2021) y que el mecanismo de la biodegradación es el siguiente: se inicia con la colonización de la superficie del polímero y la segregación de enzimas que rompen, en pequeños fragmentos, el polímero; los grupos hidrófilos de las enzimas (COOH, OH y NH₂) atacan los grupos éster de las cadenas poliméricas, mediante reacciones de hidrólisis seguidas de reacciones de oxidación, de esta manera, el peso molecular del polímero va disminuyendo por la escisión de cadenas, a fragmentos menores de 500 g/mol, los cuales pueden ser digeridos por los microorganismos (Serna C. et al., 2011). Este mecanismo puede observarse en el esquema 1. Entre los factores más importantes que intervienen para que tenga lugar el proceso de biodegradación, está la presencia de microorganismos, la humedad, los nutrientes minerales, la temperatura y el pH, también la presencia o ausencia de oxígeno.

En el frasco que contiene el material de prueba (Ver Figura 3 del lado derecho), se puede observar la presencia de una capa verdosa, en las paredes del frasco, en la tierra, en la perlita y sobre la superficie de la bolsa comercial, esto indica la presencia de microorganismos.

En el caso del almidón, en otros trabajos de investigación se ha reportado la degradación biótica del mismo, comprobado mediante la disminución en la temperatura de descomposición en análisis de TGA (Canché-Escamilla et al., 2011). También se ha reportado que el almidón se degrada al 100% utilizando enzimas (Cuevas-Carballo et al., 2017). Por lo que podría esperarse que el almidón presente en la bolsa comercial, también sufra una degradación biótica.



Esquema 1. Mecanismo de degradación biótica de la PCL. Elaboración propia modificada de (Ali et al., 2021).

Derivado del análisis de los grupos funcionales por FTIR, se puede decir que el material ha sufrido una degradación biótica, que ha derivado en la falla catastrófica del material, ya que parte de la película que se logró recuperar, es sumamente frágil y quebradiza. Lo que hace suponer que en un periodo más prolongado de la prueba podría realizarse la asimilación completa del material por parte de los microorganismos.

Cabe mencionar que en este trabajo no se identificaron los microorganismos presentes en la tierra de invernadero utilizada para la prueba. Como se trató de una bolsa comercial, no se tiene la composición exacta de la misma.

5. CONCLUSIONES.

En la prueba de degradación biótica a la que se sometió la bolsa biodegradable comercial, se puede concluir lo siguiente:

1. Que la bolsa sufrió una degradación biótica evidenciada por su fragmentación y la falla catastrófica del material.
2. Que hubo crecimiento de microorganismos en la superficie de la bolsa y en la superficie de la perlita utilizada en la prueba.
3. Que los microorganismos presentes en la tierra de invernadero, son suficientes para llevar a cabo la degradación del material.
4. Que se encontraron fragmentos pequeños de la bolsa en la tierra que estuvo en contacto con la película, lo que hace suponer la presencia de microplásticos, que aún tienen que ser analizados y monitoreados para tratar de determinar el tiempo de permanencia en el ambiente. Por los resultados de la prueba se puede suponer que se podrían desintegrar bajo las mismas condiciones, un periodo de tiempo más prolongado.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ali, S. S., Elsamahy, T., Koutra, E., Kornaros, M., El-Sheekh, M., Abdelkarim, E. A., Zhu, D., & Sun, J. (2021). Degradation of conventional plastic wastes in the environment: A review on current status of knowledge and future perspectives of disposal. *Science of The Total Environment*, 771, 144719. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144719>
- Álvarez-Méndez, S. J., Ramos-Suárez, J. L., Ritter, A., Mata González, J., & Camacho Pérez, Á. (2023). Anaerobic digestion of commercial PLA and PBAT biodegradable plastic bags: Potential biogas production and ¹H NMR and ATR-FTIR assessed biodegradation. *Heliyon*, 9(6), e16691. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16691>
- Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1596–1605. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>
- Beltrán-Sanahuja, A., Benito-Kaesbach, A., Sánchez-García, N., & Sanz-Lázaro, C. (2021). Degradation of conventional and biobased plastics in soil under contrasting environmental conditions. *Science of The Total Environment*, 787, 147678. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147678>
- Bergmann, M., Collard, F., Fabres, J., Gabrielsen, G. W., Provencher, J. F., Rochman, C. M., van Sebille, E., & Tekman, M. B. (2022). Plastic pollution in the Arctic. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(5), 323–337. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00279-8>
- Canché-Escamilla, G., Canché-Canché, M., Duarte-Aranda, S., Cáceres-Farfán, M., & Borges-Argáez, R. (2011). Mechanical properties and biodegradation of thermoplastic starches obtained from grafted starches with acrylics. *Carbohydrate Polymers*, 86(4), 1501–1508. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.06.052>
- Chamas, A., Moon, H., Zheng, J., Qiu, Y., Tabassum, T., Jang, J. H., Abu-Omar, M., Scott, S. L., & Suh, S. (2020). Degradation Rates of Plastics in the Environment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(9), 3494–3511. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06635>
- Cucina, M. (2023). The lesser of two evils: Enhancing biodegradable bioplastics use to fight plastic pollution requires policy makers interventions in Europe. *Environmental Impact Assessment Review*, 103, 107230. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107230>
- Cuevas-Carballo, Z. B., Duarte-Aranda, S., & Canché-Escamilla, G. (2017). Properties and Biodegradability of Thermoplastic Starch Obtained from Granular Starches Grafted with Polycaprolactone. *International Journal of Polymer Science*, 2017, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2017/3975692>
- Estrada-Monje, A., Alonso-Romero, S., Zitzumbo-Guzmán, R., Estrada-Moreno, I. A., & Zaragoza-Contreras, E. A. (2021). Thermoplastic starch-based blends with improved thermal and thermomechanical properties. *Polymers*, 13(23). <https://doi.org/10.3390/polym13234263>
- Kale, G., Kijchavengkul, T., Auras, R., Rubino, M., Selke, S. E., & Singh, S. P. (2007). Compostability of Bioplastic Packaging Materials: An Overview. *Macromolecular Bioscience*, 7(3), 255–277. <https://doi.org/10.1002/mabi.200600168>
- Long, Z., Pan, Z., Jin, X., Zou, Q., He, J., Li, W., Waters, C. N., Turner, S. D., do Sul, J. A. I., Yu, X., Chen, J., Lin, H., & Ren, J. (2022). Anthropocene microplastic stratigraphy of Xiamen Bay, China: A history of plastic production and waste management. *Water Research*, 226, 119215. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119215>
- Meereboer, K. W., Misra, M., & Mohanty, A. K. (2020). Review of recent advances in the biodegradability of polyhydroxyalkanoate (PHA) bioplastics and their composites. *Green Chemistry*, 22(17), 5519–5558. <https://doi.org/10.1039/D0GC01647K>
- Moreno, B. B., Rodrigues, B. V., Afonso, L. R., Jimenez, P. C., & Castro, Í. B. (2023). High incidence of false biodegradability claims related to single-use plastic utensils sold in Brazil. *Sustainable Production and Consumption*, 41, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.07.024>
- Najemi, L., Jeanmaire, T., Zerroukhi, A., & Raihane, M. (2010). Organic catalyst for ring opening polymerization of ϵ -caprolactone in bulk. Route to starch- graft -polycaprolactone. *Starch - Stärke*, 62(3–4), 147–154. <https://doi.org/10.1002/star.200900198>

- Nazareth, M., Marques, M. R. C., Leite, M. C. A., & Castro, Í. B. (2019). Commercial plastics claiming biodegradable status: Is this also accurate for marine environments? *Journal of Hazardous Materials*, 366, 714–722. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.12.052>
- Qiang, T., Ren, W., & Chen, L. (2024). Biodegradable, high mechanical strength, and eco-friendly pectin-based plastic film. *Food Hydrocolloids*, 149, 109539. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109539>
- Ryan, P. G. (2015). A Brief History of Marine Litter Research. In *Marine Anthropogenic Litter* (pp. 1–25). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_1
- Serna C., L., Rodríguez de S., A., & Albán A., F. (2011). Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones. *Ingeniería y Competitividad*, 5(1), 16. <https://doi.org/10.25100/iyc.v5i1.2301>