

Capítulo 7

Biodegradación de bolsas plásticas, compatibilidad y toxicidad

María Neftalí Rojas Valencia¹

Karla Barrón Hernández¹

Erik Saúl Huidobro Medina¹

Alfredo Martínez Cruz²

Juan Antonio Araiza Aguilar³

<https://doi.org/10.61728/AE20252151>



¹ Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México: nrov@pumas.iingen.unam.mx

² Instituto Tecnológico de Gustavo A. Madero del Tecnológico Nacional de México

³ Escuela de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas

1. Introducción

La contaminación causada por las bolsas de plástico (BP) y otros plásticos se ha transformado en uno de los desafíos ambientales más apremiantes de esta época. La fabricación y quema de plástico tiene un gran impacto en el cambio climático. Además, las BP en realidad no desintegran, biodegradan o compostean; solo se fragmentan. Con el tiempo, la luz solar y la elevación de la temperatura descomponen lentamente el plástico en pedazos muy pequeños hasta quedar en microplásticos.

Las BP que más contaminan son las provenientes de hidrocarburos, ya que representan el 50 % de la producción anual, seguidas en la actualidad por las bolsas de un solo uso. Los BP desechables (de un solo uso) son productos que contienen resinas biodegradables como son el almidón de maíz, trigo, papa, nopal u otra harina, y se destruyen inmediatamente después de su uso (normalmente en plantas de composta). El plástico se utiliza más comúnmente en el transporte y en la industria de alimentos, medicina, residuos y otros. Además, a menudo no son aceptados en los centros de reciclaje al no tener la composición para poder ser reciclables (Lindwall, 2024).

La demanda de estas bolsas está fuera de control y este comportamiento provoca que las bolsas aumenten y fluyan hacia calles, cuerpos de agua (océanos, mares, lagos y ríos), paisajes naturales y rellenos sanitarios, afectando el ambiente circundante, especialmente los organismos marinos (García Liñán, 2022; García-Llobodanin et al., 2020).

En función de lo anterior, se quiere disminuir el uso de bolsas plásticas derivadas del petróleo, ya que tardan más de cincuenta años en degradarse. Cabe señalar que en el mundo se derrochan 12 millones de BP/segundo, siendo ingeridos los microplásticos por los animales, las plantas y el humano. Las medidas, alternativas y oportunidades actuales para disminuir el uso de bolsas plásticas incluyen el consumo consciente y responsable, el uso racional de bolsas de un solo uso fabricadas con

materiales biodegradables y la reutilización, de acuerdo con la normativa ambiental (Santiago y Quispe, 2014, García-Llobodanin et al., 2020).

Este problema ambiental ha sido afrontado de diferentes formas. Mientras que algunos países prohíben completamente el uso de bolsas de plástico, otros solo toman ciertas medidas para reducir el uso de bolsas de plástico. El objetivo de este estudio fue evaluar el proceso de biodegradación de bolsas fabricadas con ácido poliláctico (PLA, por sus siglas en inglés) a través de larvas de gusano de la harina (*Tenebrio molitor*) y evaluar la toxicidad utilizando semillas de lechuga (*Lactuca sativa*) y de pasto (*Chloris barbata*).

2. Metodología

2.1. Descripción y preparación de las bolsas prueba

Se usaron cuatro diferentes muestras de bolsas: Ácido Poliláctico (PLA), Fécula de Maíz (FM), Tereftalato de Adipato de Polibutileno (PBAT) y Polietileno (PE). Las bolsas se cortaron en cuadrados de aproximadamente 1.5 cm por lado y como control en las pruebas con *T. molitor* se utilizó salvado de trigo comprado en una forrajera.

2.2. Biodegradación de bolsas con *Tenebrio molitor*

Para el desarrollo de esta prueba, se consideraron algunas investigaciones relacionadas con la biodegradación de polímeros utilizando *T. molitor* (Molina et al., 2016; Portocarrero, 2021). La población constó de 250 larvas de *T. molitor* de tamaño similar, de las cuales se utilizaron 60 larvas para cada bolsa, que a su vez se dividieron en tres grupos de 20 larvas, es decir, la unidad experimental fue de 20 larvas con cinco g de bolsa preparada (HAPPI, CARE y BIO) y 20 g de salvado de trigo para el control, y se realizaron tres repeticiones por tratamiento. En la Figura 1 se muestran algunas larvas de *T. molitor* que fueron empleadas.

Figura 1
Larva de *Tenebrio molitor*



Fuente: Elaboración propia.

Las larvas *T. molitor* fueron colocadas en contenedores con el alimento correspondiente (bolsa prueba o control) y se les dejó durante siete semanas a temperatura ambiente. Pasadas las siete semanas, se pesó la cantidad de alimento que no fue consumida, para así calcular el porcentaje de consumo empleando la Ecuación 1.

(Ec. 1)

$$\% \text{ de consumo} = \frac{\text{Peso del alimento inicial} - \text{Peso del alimento final}}{\text{Peso del alimento inicial}} * 100$$

Para determinar el aumento o disminución en el peso corporal de la larva de *Tenebrio molitor*, se registraron datos del peso de las larvas cada siete días para todas las clasificaciones determinadas durante el período de prueba de siete semanas y se calcularon utilizando la Ecuación 2. Cabe mencionar que el registro de ganancia o pérdida de peso se basó en el peso corporal total de 20 larvas.

(Ec. 2)

$$\% \text{ de ganancia o pérdida de peso} = \frac{\text{Peso de larva inicial} - \text{Peso de larva final}}{\text{Peso de larva inicial}} * 100$$

Por otro lado, la tasa de supervivencia larvaria se registró cada dos días para todas las clasificaciones determinadas durante el mismo período mencionado anteriormente.

2.3. Germinación y toxicidad de las semillas de lechuga (*Lactuca s.*) y pasto (*Chloris barbata*)

Para determinar la germinación y toxicidad de ambas semillas, se utilizaron los métodos propuestos por Sobrero y Ronco (2008) y la norma NMX-E-273-NYCE-2019 (DOF, 2020). Fueron empleadas 450 semillas de cada especie, seleccionando semillas que tuvieran aproximadamente el mismo tamaño y apariencia (ver Figura 2).

Figura 2

Semillas de a) *Lactuca sativa* y b) *Chloris barbata*



Fuente: Elaboración propia.

Se usaron 30 cajas de Petri de 5 cm de radio, 15 cajas para las semillas de *L. sativa* y 15 cajas para las semillas de *C. barbata*. Cada caja de Petri contó con una ligera capa de bolsa prueba como sustrato y 30 semillas distribuidas uniformemente; así mismo, fueron colocados controles positivos y negativos, los cuales contaron con una ligera capa de algodón como sustrato y 30 semillas según la especie. Los tratamientos y controles se realizaron por triplicado.

Posteriormente, a las cajas de Petri con plásticos prueba se agregaron 4 ml de una solución que previamente fue preparada de la siguiente forma: 10 g de bolsa prueba fueron molidos junto con 125 ml de H_2O ultrapura (resistividad de 18.2 M Ω .cm, carbono orgánico total <10 ppb),

esta mezcla se colocó en un recipiente de plástico con tapa, la cual se dejó reposar durante cinco días. Pasado el tiempo, la mezcla se filtró y el líquido resultante estuvo listo para ser agregado de acuerdo con su tratamiento. Para las semillas del grupo control positivo se utilizaron 4 ml de agua purificada, y para el control negativo se agregaron 4 ml de ZnSO₄ (sulfato de zinc) a 500 mg/L.

Para evitar la pérdida de humedad, las cajas de Petri se taparon y se guardaron en una bolsa plástica. En el caso de los experimentos con *L. sativa*, considerando la recomendación de que su germinación se ve favorecida por poca intensidad lumínica, las cajas de Petri se cubrieron de la luz y se mantuvieron durante 120 horas (cinco días) a temperatura ambiente. Las cajas de semillas de *C. barbata* se colocaron con luz indirecta y se mantuvieron durante 240 horas (10 días), también a temperatura ambiente.

Una vez que pasó el tiempo de incubación de las semillas, se contaron y se registraron las semillas que germinaron en cada una de las cajas. Con la ayuda de una regla se midió con cuidado el tamaño del hipocótilo y radícula en las semillas de *L. sativa*. En el caso de las semillas de *C. barbata*, se midió la longitud del tallo y raíces.

En las semillas de *L. sativa*, la longitud de elongación de la radícula se midió desde el ápice radicular (región más ancha entre la radícula y el hipocótilo) hasta el ápice radicular; mientras que la longitud de elongación del hipocótilo se midió desde la inserción de los dos cotiledones hasta el nudo. En las semillas de *C. barbata*, la medida de elongación de la raíz se consideró desde la corona hasta el apéndice de la raíz, mientras que la medida del tallo se consideró desde la corona hasta el término de este.

El control negativo generó un porcentaje de germinación que fue determinado con la Ecuación 4 propuesta por Saetama et al. (2018).

(Ec. 4)

$$\% \text{ Germinación} = \frac{\text{No. semillas germinadas en cada grupo de bolsa}}{\text{No. semillas germinadas en el control}} \times 100$$

Para el cálculo del porcentaje de inhibición o estimulación de las semillas se empleó la Ecuación 5.

(Ec. 5)

$$\% \text{ inhibición o estimulación} = \frac{\text{promedio elongación muestra} - \text{promedio elongación control}}{\text{promedio elongación control}} \times 100$$

2.4. Composición química de las bolsas

Para identificar los polímeros contenidos en las bolsas probadas, mediante espectroscopia *FTIR*-ATR se empleó un espectrómetro de infrarrojo NICOLET 6700 THERMO SCIENTIFIC. Para establecer el contenido de metales pesados (Cu, As, Cd, Cr, Ni, Pb y Zn), se utilizó un espectrofotómetro *ICP-OES* Agilent Technologies 5100, usando un horno de microondas EtHOS EASY Milestone para la digestión previa de las muestras.

2.5. Análisis estadístico

Fue realizado un análisis de varianzas (ANOVA) para establecer discrepancias significativas entre las bolsas seleccionadas con respecto al porcentaje de consumo, porcentaje de pérdida o ganancia de biomasa y porcentaje de sobrevivencia de las larvas de *T. molitor*. Se usó un nivel de significancia (α) del 5 %. De igual forma, fue realizado el análisis estadístico para obtener los porcentajes de germinación y de inhibición o elongación con las semillas de *L. sativa* y *C. barbata*.

3. Resultados y discusión

3.1. Biodegradación de las muestras de bolsas mediante las larvas de *Tenebrio molitor*

3.1.1. Porcentaje de consumo

Después de las siete semanas de alimentar a las larvas *T. molitor*, se obtuvieron los porcentajes de consumo de las muestras de bolsa y el control, mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1

*Porcentaje de consumo de los diferentes muestras de bolsa y control realizado por las larvas *T. molitor**

Muestra	% de consumo
HAPPI	2.000
CARE	1.333
BIO	0.667
Control	10.167

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 1 se observa que hubo un mayor porcentaje de consumo en la muestra control; esto se debe a que el salvado de trigo es la dieta principal en cautiverio de las larvas de *Tenebrio molitor*, por lo que hay un mayor uso de este (Garrucho, 2017; Houbraken et al., 2016; Makkar et al., 2014). En cuanto a las bolsas prueba, la HAPPI fue la que tuvo un mayor porcentaje de consumo con respecto a las otras bolsas; este resultado puede relacionarse con que dicha bolsa tenga un mayor porcentaje de ácido poliláctico en su composición comparada con las otras muestras. Con respecto al BIO, se observa que este tuvo un porcentaje de consumo menor comparado con las bolsas compostables, lo que sugiere que efectivamente las larvas de *T. molitor* optan por alimentarse de bolsas fabricadas a base de ácido poliláctico y otros polímeros compostables. De acuerdo con el análisis estadístico, los porcentajes de consumo con *T. molitor* de las diferentes bolsas mostraron diferencias significativas ($p = 5.4 \times 10^{-9}$).

3.1.2. Porcentaje de pérdida o ganancia de peso

La Tabla 2 enlista los datos obtenidos de porcentajes de pérdida o ganancia en peso con la larva de *T. molitor* al consumir las diferentes muestras de bolsa y el control en periodos de siete semanas.

Tabla 2

*Porcentaje de pérdida o ganancia de peso de una larva de *T. molitor**

Muestra	% de ganancia o pérdida de peso
HAPPI	-2.56
CARE	-2.29
BIO	-2.09
Control	2.78

El signo (-) indica pérdida de peso.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 2 se registran los valores de disminución de peso de las larvas en HAPPI, CARE y BIO, siendo la mayor pérdida de peso en HAPPI, mientras que el BIO tuvo una menor pérdida comparada entre las bolsas probadas. Esto indica que el *PLA* no influye en el aumento de peso de las larvas. Por otro lado, se observa un porcentaje de ganancia de peso en las larvas con la muestra control, ya que este alimento es óptimo para su crecimiento y desarrollo. El porcentaje de pérdida o ganancia de peso promedio de una larva no fue estadísticamente igual entre las muestras de bolsa y control ($p=5.6 \times 10^{-5}$). Además, no hubo diferencia significativa del porcentaje del peso de la larva de cada muestra de bolsa y control, conforme fueron transcurriendo las semanas ($p = 0.44$).

3.1.3. Porcentaje de sobrevivencia

La Tabla 3 expresa los valores de sobrevivencia en las larvas *T. molitor* que se llevó a cabo durante 49 días.

Tabla 3.

*Porcentaje de sobrevivencia de *T. molitor* al consumir las diferentes bolsas y el control*

Muestra	% de sobrevivencia
HAPPI	99
CARE	100
BIO	98
CONTROL	97

Fuente: Elaboración propia.

Para la determinación de sobrevivencia se tomaron en cuenta aquellas larvas que pasaron a ser pupas. En la Tabla 3 se aprecia que las muestras CARE y HAPPI tuvieron la mayor sobrevivencia con un 100 y 99 %, respectivamente. La presencia de pupas en estas bolsas se presentó a los 17 y 25 días, mientras que en BIO y control se presentó al principio de la prueba.

Al comparar los resultados obtenidos con las tres bolsas, se sugiere que la composición de estas influye en la sobrevivencia de las larvas, pues las bolsas que contiene *PLA* (HAPPI y CARE) presentaron un mayor porcentaje de sobrevivencia comparado con la bolsa que no contiene *PLA*.

3.2. Germinación, elongación y toxicidad en *Lactuca sativa* y *Chloris barbata*

3.2.1. Germinación de las semillas

La Tabla 4 muestra los datos obtenidos en la germinación de semillas de lechuga (*L. sativa*).

Tabla 4.

Porcentaje promedio de germinación de semillas de lechuga (L. sativa)

Muestra	Semillas germinadas (%)	Germinación (%)
HAPPI	24.67	100
CARE	23.67	100
BIO	25.67	100
CONTROL	22.67	75

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4 se puede observar que las muestras BIO, HAPPI y CARE tuvieron el 100 % de germinación. Cabe mencionar que se utilizó como control negativo el ZnSO₄ a una concentración de 500 mg/L. Sánchez y Sánchez (2009) obtuvieron germinaciones menores al 75% con concentraciones de 0.1, 1, 10 y 100 ppm de ZnSO₄. Poi de Neiff y Ramos (2002) indicaron que, en comparación con el grupo de control negativo, las muestras con más del 90 % de germinación podrían considerarse no tóxicas; las semillas con una germinación entre el 75 % y el 90 % podrían considerarse tóxicas. Con una tasa de germinación inferior al 75 % puede considerarse altamente tóxicas; por lo anterior, los resultados obtenidos sugieren que no existió un efecto tóxico o nocivo con las tres bolsas muestra, ya que estos fueron superiores al 90 %. Con respecto a la baja germinación del control negativo, probablemente se debió a que el agua utilizada no aportó los nutrientes necesarios para la germinación de la semilla. Los altos porcentajes de germinación de las muestras de bolsa comparados con el control negativo probablemente se deban a la manifestación de compuestos esenciales presentes en las bolsas. Los micronutrientes (Cu, B, Mo, Fe, Mn, Zn y Cl) son micronutrientes fun-

damentales para las plantas en concentraciones muy bajas (Rodríguez y Flores, 2004). No existieron diferencias estadísticamente significativas en la germinación de las semillas de *L. sativa* expuestas a las bolsas muestra y control ($p=0.97$).

La Tabla 5 muestra los valores obtenidos en la germinación de semillas de *C. barbata*. También se observa que la muestra BIO y HAPPI obtuvo el mayor porcentaje de germinación con 100 % y CARE con 96 %, y finalmente el control negativo con 91 %. Así mismo, se observa que ningún resultado obtenido con las bolsas muestra presenta una reducción inferior al 70 % en relación con el control (-).

Tabla 5

Porcentaje promedio de germinación de las semillas de C. barbata

Muestra	% de semillas germinadas	% de germinación
HAPPI	28.00	100
CARE	26.33	96
BIO	28.67	100
CONTROL -	27.33	91

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que con los resultados obtenidos con *L. sativa*, estos resultados tampoco parecen estar relacionados con las diferentes concentraciones de PLA, debido a que en primer lugar se encuentra el BIO (0 % PLA), como segundo lugar el HAPPI (5-15 % PLA) y como tercer lugar el CARE (15 % PLA). Todas las muestras de bolsa se encuentran en la categoría de no tóxicos, ya que tienen un porcentaje de germinación mayor al 90 %. No existieron diferencias estadísticamente significativas en los valores de germinación de las semillas de *C. barbata* expuestas a las diferentes bolsas de pruebas y control ($p = 0.33$).

3.2.2. *Elongación de las plántulas emergidas de las semillas*

La Tabla 6 expone los datos obtenidos de inhibición/estimulación de la elongación en las semillas de *L. sativa*. Se observa una inhibición tanto en la elongación del hipocótilo en CARE como en la elongación de la

radícula en BIO. Por otro lado, se observa una mayor estimulación de la elongación de hipocótilo en el HAPPI y BIO, y una mayor estimulación de la elongación de la radícula en el HAPPI. Únicamente se observa una estimulación de hipocótilo y de radícula en el HAPPI. Por lo anterior, los resultados sugieren que el PLA influye tanto en la estimulación del hipocótilo como en la elongación de la radícula de las semillas de *Lactuca sativa*.

Tabla 6

Porcentaje promedio de inhibición/estimulación de la elongación en las plántulas de L. sativa para cada muestra de bolsa y controles

Muestra	X ⁻ de inhibición/estimulación de elongación		% de inhibición/estimulación de elongación	
	Hipocótilo	Radícula	Hipocótilo	Radícula
HAPPI	2.06	2.50	19.54	25.59
CARE	1.45	2.05	-15.80	2.62
BIO	2.02	1.53	17.09	-23.30
Ctrl -	1.72	1.99	NA	NA

El signo (-) indica inhibición.

Fuente: Elaboración propia.

Existieron diferencias estadísticamente significativas entre los procedimientos en los porcentajes de inhibición/estimulación de la elongación del hipocótilo ($p = 0.01$). Asimismo, también se presentaron diferencias estadísticamente en los porcentajes de inhibición/estimulación de la elongación de la radícula ($p = 0.00$). La Tabla 7 indica los valores de inhibición/estimulación de la elongación del tallo y de las raíces de las semillas de *C. barbata* que estuvieron expuestas a las diferentes muestras de bolsas.

Tabla 7

Porcentaje promedio de inhibición/estimulación de la elongación en las plántulas de C. barbata con cada muestra de bolsa y controles

Muestra	X ⁻ de inhibición/estimulación de elongación				% de inhibición/estimulación de elongación			
	Tallo	Raíz 1	Raíz 2	Raíz 3	Tallo	Raíz 1	Raíz 2	Raíz 3
HAPPI	4.64	4.39	0.62	0.20	-14.34	-9.51	-40.45	-53.08
CARE	5.04	4.29	0.83	0.25	-7.05	-11.45	-19.85	-43.33
BIO	5.55	5.17	1.01	0.21	2.52	6.67	-3.31	-51.79
Ctrl -	5.42	4.85	1.04	0.43	NA	NA	NA	NA

El signo (-) indica inhibición.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 7 se observa que hay una mayor inhibición de la elongación tanto del tallo como de las raíces en el HAPPI y CARE, mientras que el BIO obtuvo una estimulación de la elongación en el tallo y raíz 1, y una inhibición de la elongación en las raíces 2 y 3. Por lo tanto, estos resultados indican que las muestras del HAPPI, CARE y BIO son tóxicas para las semillas de pasto. Pareciera ser que el PLA no influye en la estimulación del crecimiento de raíces y tallo.

En este caso, también se realizó un análisis estadístico, el cual indica que no hay diferencia entre los datos de inhibición/estimulación del crecimiento en el tallo en las diferentes muestras de bolsa ($p = 0.26$). De igual forma, se realizó un análisis estadístico para las raíces, por lo que se concluye que no existe diferencia entre los valores de inhibición/estimulación en el crecimiento de las raíces al estar expuestas a las diferentes muestras de bolsa ($p = 0.28$).

El efecto sobre el desarrollo del hipocótilo=tallo y radícula=raíz en *L. sativa* y del *C. barbata* fue distinto para cada tipo de semilla. En las semillas de *L. sativa* se presentó una mayor estimulación de la elongación del hipocótilo, mientras que en la semilla de *C. barbata* se reveló una mayor inhibición en el crecimiento de las raíces.

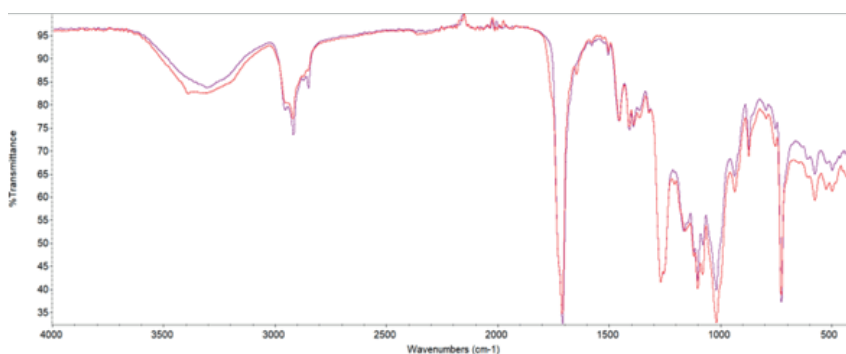
3.3. Composición química de las bolsas muestras

3.3.1 Espectroscopia de infrarrojo/ATR

La Figura 3 evidencia los resultados de *FTIR* (espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier) obtenidos en las bolsas HAPPI y CARE.

Figura 3

Espectro infrarrojo de HAPPI (línea roja) y CARE (línea morada)

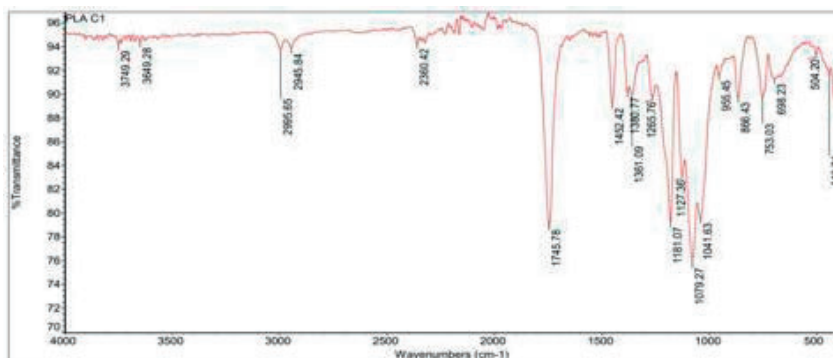


Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4 se registra el espectro infrarrojo de una bolsa fabricada 100 % con *PLA* con la cual se compararon las bolsas probadas. Se observó que las frecuencias del *PLA* que se asemejan a las frecuencias de HAPPI y CARE son 2995.65, 2945.84, 1745.78, y 753.03 cm⁻¹.

Figura 4

Espectro infrarrojo de una muestra hecha de ácido poliláctico al 100 %

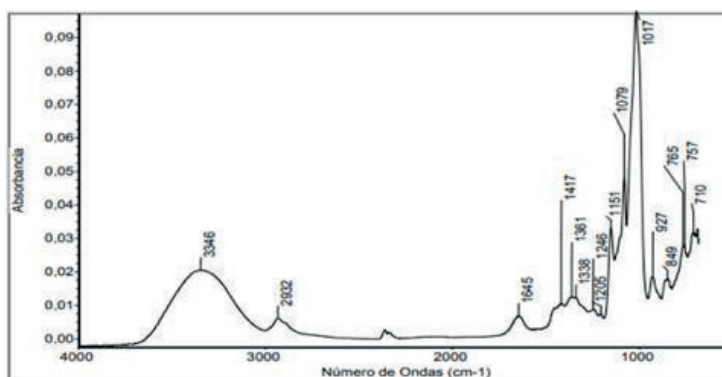


Fuente: Aguayo y Amaya (2020).

La Figura 5 expone el espectro *FTIR* de almidón puro con el que se compararon los espectros de HAPPI y CARE. Se observa que hay una similitud en las frecuencias de 3346 y 1017 cm⁻¹, representando el enlace O-H del alcohol y el C-O del éter presentes en la molécula.

Figura 5

Espectro infrarrojo de almidón

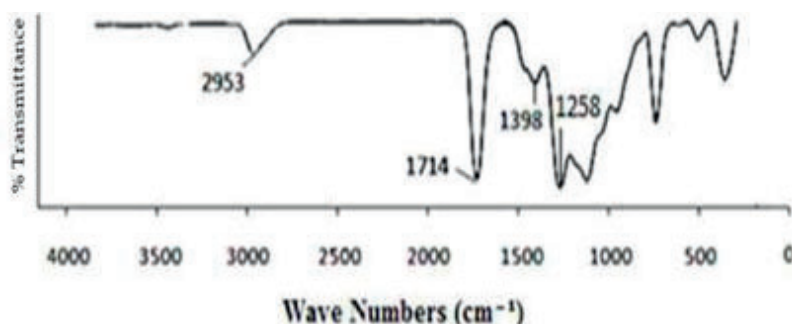


Fuente: Aguayo y Amaya (2020).

La Figura 6 señala el espectro infrarrojo del PBAT, usado para comparar los espectros de HAPPI y CARE. Se observó que hay una similitud con las bandas 2953 y 1714 cm⁻¹ las cuales representa los enlaces C-H del

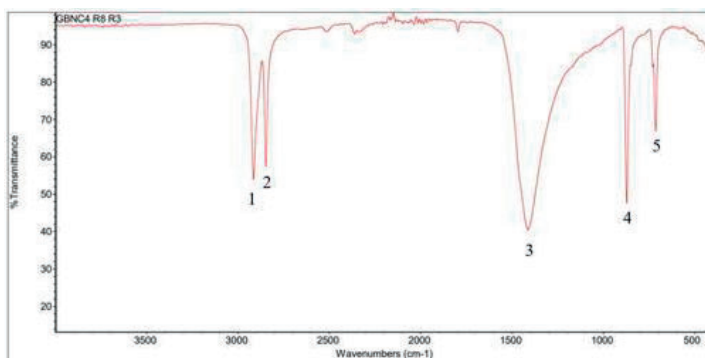
alcano y el enlace C=O del éster. La Figura 7 registra el espectro *FTIR* de la bolsa BIO. En el caso de las muestras BIO se observó que tienen menos bandas de absorción debido a que contienen únicamente polietileno y carbonato de calcio como aditivo.

Figura 6
Espectro infrarrojo del PBAT



Fuente: Siyamak et al. (2012).

Figura 7
Espectro infrarrojo de BIO, representando con números las bandas de interés



Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Plasma de acoplamiento inductivo con espectroscopía de emisión atómica

La Tabla 8 muestra los metales y sus cantidades presentes en las bolsas.

Tabla 8

Concentraciones máximas de metales pesados (mg/kg) obtenidos de cada bolsa muestra mediante espectroscopía ICP-OES

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
λ (nm)	188.98	226.502	267.716	327.395	231.604	220.353	213.857
LCP (mg/kg)							
LCP min	5.0	1.0	1.0	1.0	5.0	10.0	1.0
HAPPI	<LCP	<LCP	<LCP	5.0	<LCP	<LCP	6.7
CARE	<LCP	<LCP	3	75.7	<LCP	<LCP	18.0
BIO	<LCP	<LCP	5	69.0	<LCP	<LCP	91.7

LCP: Limite práctico de cuantificación.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 8 registra los contenidos de metales pesados de las bolsas muestra; dos de tres bolsas (CARE y BIO) contienen cromo, cobre y zinc en su composición, mientras que la bolsa HAPPI solo contiene cobre y zinc en su composición. La bolsa muestra con mayor concentración de Cr fue BIO con 5 mg/kg y la de menor concentración fue CARE con 3 mg/kg. Para Cu, se obtuvo una concentración mayor en CARE con 75.7 mg/kg y la menor concentración en el HAPPI con 5.0 mg/kg, obteniendo una diferencia de 15.14 veces. Y, por último, BIO presentó una mayor concentración de Zn con 91.7 mg/kg, mientras que el HAPPI mostró una concentración menor con 6.7 mg/kg, obteniendo una diferencia de 13.7 veces.

Los resultados obtenidos en metales muestran que todos los valores están por debajo de los límites máximos permitidos en la en NACD-MX-010-AMBT-2019 (GCDMX, 2022) (mostrados en la Tabla 9), con excepción del cobre en CARE ya que se obtuvo una concentración de 75.7 mg/kg mientras que la norma menciona una concentración máxima de 70.0 mg/kg.

Tabla 9

Concentraciones máximas de elementos traza en (mg/kg) en base seca, que deben cumplir los tipos de composta

Nivel – tipo	Cr	Cu	Zn
Nivel 1 – tipo A	70	70	200

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, los resultados también mostraron que las concentraciones de metales en BIO estuvieron dentro de los límites permitidos por la normatividad; sin embargo, se esperaba que estas fueran superiores, ya que la principal fuente primaria de metales en los plásticos en general son los aditivos funcionales. Los aditivos a base de metales pueden ser compuestos inorgánicos insolubles, compuestos orgánicos parcialmente solubles o líquidos o sales organometálicas.

Los aditivos de base metálica tienen diferentes aplicaciones en los plásticos y pueden servir como, por ejemplo, biocidas, agentes antimicrobianos, lubricantes y retardantes de llama. Sin embargo, sus principales usos son como rellenos inertes, pigmentos para el color y estabilizadores (Turner y Filella, 2021).

La mayor cantidad de Cu en CARE puede estar relacionada con la coloración verde de la bolsa, ya que los pigmentos orgánicos sintéticos incluyen ftalocianinas y complejos de coordinación de cobre que imitan las estructuras de las porfirinas (Turner y Filella, 2021). Los llamados oligoelementos sirven como micronutrientes para los cultivos porque son necesarios en pequeñas cantidades y son necesarios para que los organismos completen su ciclo de vida. Cuando alcanzan un determinado umbral, se vuelven tóxicos, como el boro, el cobalto, el cromo, el cobre, el molibdeno, el manganeso, el níquel, el hierro, el selenio y el zinc, así como el metaloide arsénico (Prieto et al., 2009).

4. Conclusiones

De acuerdo con la búsqueda de información sobre la composición de las bolsas utilizadas en esta investigación, el porcentaje de ácido poliláctico

en las bolsas muestra lleva el siguiente orden decreciente CARE (15 %) > HAPPI (5-15 %) > BIO (0 %). Además, del ácido poliláctico, las bolsas contienen fécula de maíz, tereftalato de adipato de polibutileno (HAPPI y CARE), carbonato de calcio y polietileno (BIO).

Las larvas de *Tenebrio molitor* tienen mayor capacidad de biodegradar las bolsas fabricadas con PLA en comparación con las bolsas hechas de polietileno. Se presentó un mayor porcentaje de consumo en las bolsas con mayor porcentaje de ácido poliláctico (HAPPI y CARE), por lo que el PLA sí influye en el consumo de bolsa. Además, no hubo un aumento de peso en las larvas al consumir las bolsas hechas a base de PLA, por lo que el PLA no influye en el aumento de peso. Las larvas fueron capaces de sobrevivir durante 7 semanas al consumir las diferentes bolsas, observándose que a mayor concentración de PLA mayor es la sobrevivencia.

Con respecto a la inhibición o estimulación de la elongación de las semillas, el PLA probablemente influye en la estimulación de la longitud del hipocótilo y de la radícula en las semillas de lechuga (*L. sativa*), ya que la muestra CARE (5 a 15 % PLA) presentó una mayor longitud del hipocótilo y de la radícula (25.59 y 19.54 %) comparado con el HAPPI (5 a 15 % PLA) (2.62 y -15.8 %). Sin embargo, en las semillas de *C. barbata*, el PLA no influye en el crecimiento de raíces y tallo debido a que el BIO (0 % PLA) fue el único en obtener una elongación positiva, con excepción de la tercera raíz.

La composición química de las bolsas evaluada mediante espectroscopia de infrarrojo/ATR, confirmó que las bolsas probadas están fabricadas de los polímeros que mencionan los fabricantes (PLA, fécula de maíz, tereftalato de adipato de polibutileno, polietileno y carbonato de calcio). Esto se confirma al comparar las frecuencias experimentales con las de la literatura.

Los metales que fueron detectados en las bolsas probadas fueron Cr, Cu y Zn. Las concentraciones de estos metales estuvieron por debajo de los límites establecidos por la Norma NACDMX-010-AMBT-2019 (Cr y Cu <70mg/kg; Zn <200mg/kg), con excepción del Cu el cual se encuentra en el CARE (75.7mg/kg).

Referencias bibliográficas

- Aguayo, y Amaya. (2020). *Base de datos de espectros FT-IR-ATR*. Versión actualizada. 2020. https://www.cncr.gob.cl/sites/www.cncr.gob.cl/files/2021-09/BASE_DATOS_ESPECTROS_2020.pdf
- Campos-Granados, M. (2021). *Biodegradación de plásticos convencionales: Estrategias y perspectivas* [Tesis de Licenciatura, Universidad de Almería]. <https://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/13496/CAMPOS%20GRANADOS,%20MIGUEL.pdf?sequence=1>
- Comas, V. (2012). *Bolsas de plástico: los usuarios no lo tienen claro*. In *Interempresas*. <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/101380-Bolsas-de-plastico-los-usuarios-no-lo-tienen-claro.html>
- DOF. (16 de abril 16, 2020). Norma Mexicana NMX-E-273-NYCE-2019. Industria del plástico-plásticos compostables-especificaciones y métodos de prueba. *Diario Oficial de La Federación* [Official Journal of the Federation]. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5591696&fecha=16/04/2020#gsc.tab=0
- García Liñán, S. (2022). Contaminación por bolsas de plástico. *El Financiero*. Recuperado el 05 julio de 2022. El Financiero. <https://www.elfinanciero.com.mx/opinion/salvador-garcia-linan/contaminacion-por-bolsas-de-plastico/>
- García-Llobodanin, L., Ponce De León, N., Moreira, S., y Billiris, A. (2020). Efecto de la variedad y de la humedad de cosecha en la temperatura de transición vítrea de variedades uruguayas de arroz. *IN-NOTEC*, 20, 106–116. <https://doi.org/10.26461/20.01>
- Garrucho, R. N. T. (2017). *Tenebrio molitor for food or feed: Rearing conditions and the effect of pesticides on its performance* [Tesis de Maestría, Instituto Politécnico de Coimbra]. <https://comum.rcaap.pt/handle/10400.26/18083?locale=en>
- GCDMX. (2022). *Norma Ambiental para la Ciudad de México NACD-MX-010-AMBT-2019, Especificaciones Técnicas que deben cumplir las bolsas y los productos*. <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGEIRA/NORMA%20AMBIENTAL%20NACDMX-010-AMBT-2019.pdf>

- Houbraken, M., Sprangers, T., De Clercq, P., Cooreman-Algoed, M., Couchement, T., De Clercq, G., Verbeke, S., y Spanoghe, P. (2016). Pesticide contamination of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) for human consumption. *Food Chemistry*, 201, 264-269. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.01.097>
- Lindwall, C. (30 de abril, 2024). Single-Use Plastics. <https://www.nrdc.org/stories/single-use-plastics-101>
- Makkar, H. P. S., Tran, G., Heuzé, V., y Ankers, P. (2014). State-of-the-art on use of insects as animal feed. *Animal Feed Science and Technology*, 197, 1-33. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.07.008>
- Molina, F., Flores, K. P., y Hermosillo, M. (2016). Degradación de polímeros con *Tenebrio molitor*. In Red Nacional de Actividades Juveniles de Ciencia y Tecnología (Ed.), *Expociencias Nacional 2016* (pp. 1–26). https://dspace.umad.edu.mx/umad_server/api/core/bits-treams/29486222-c059-47cf-9f18-77c9125787bb/content
- Pineda, J. A. (2024). *Contaminación por bolsas de plástico: su impacto ambiental y prevención*. <https://encolombia.com/medio-ambiente/interes-a/bolsas-de-plastico/>
- Poi de Neiff, A. y Ramos, A. (2002). Utilización de *Lactuca sativa* y *Panagrellus redivivus* para el estudio ecotoxicológico de los ríos salado y negro (Chaco, Argentina). *FACENA*, 18, 2-9. <https://revistas.unne.edu.ar/index.php/fce/article/view/3601/3247>
- Portocarrero, F. R. (2021). *Biodegradación de poliestireno con tenebrio molitor para la sostenibilidad de empresas* [Tesis de Licenciatura, Universidad Peruana Cayetano]. <https://repositorio.upch.edu.pe/handle/20.500.12866/9025>
- Prieto, J., González, C. A., Román, A. D., y Prieto, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10, 29–44. <https://www.redalyc.org/pdf/939/93911243003.pdf>
- Rodríguez, M., y Flores, V. (2004). *Nociones Básicas del Ferti-riego, elementos esenciales y beneficiosos*. <https://core.ac.uk/download/pdf/143458034.pdf>
- Saetama, V., Vera, L., Vanegas, M. E., Cruzat, C., y Brazales, D. (2018). Evaluación toxicológica de soluciones acuosas de ibuprofeno me-

- diente bioensayos con *Artemia salina*, *Allium schoenoprasum* L. y *Lactuca sativa*. *Revista de Toxicología de AETOX*, 35, 112–118. <http://rev.aetox.es/wp/index.php/evaluacion-toxicologica-de-soluciones-acuosas-de-ibuprofeno-mediante-bioensayos-con-artemia-salina-allium-schoenoprasum-l-y-lactuca-sativa/>
- Sánchez, K. A., y Sánchez, L. M. (2009). *Determinación de la concentración de inhibición media (CE 50-120) del bario, hierro y manganeso mediante bioensayos de toxicidad acuática sobre semillas de lechuga (Lactuca sativa)* [Tesis de Licenciatura, Universidad de la Salle]. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?params=/context/ing_ambiental_sanitaria/article/1060/&path_info=T41.09_S55de.pdf
- Santiago, S. Y., y Quispe, K. R. (2014). *Diseño de un plan de negocio para la introducción de bolsas plásticas biodegradables que contribuya a la conservación del medio ambiente en el mercado de San Juan de Lurigancho* [Tesis Licenciatura, Universidad Peruana Unión]. <https://repositorio.upeu.edu.pe/items/7447f2d4-96d0-4776-9489-1b1790194e35>
- Siyamak, S., Ibrahim, N. A., Abdolmohammadi, S., Yunus, W. M. Z. W. y Rahman, M. Z. A. (2012). Effect of Fiber Esterification on Fundamental Properties of Oil Palm Empty Fruit Bunch Fiber/Poly(butylene adipate-co-terephthalate) *Biocomposites. International Journal of Molecular Sciences*, 13(2), 1327–1346. <https://doi.org/10.3390/ijms13021327>
- Sobrero, M. C. y Ronco, A. (2008). Ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga *Lactuca sativa* L. En SEMARNAT (Ed.), *Ensayos toxicológicos para la evaluación de sustancias químicas en agua y suelo* (1ra edición, pp. 55–68). Instituto Nacional de Ecología. http://centro.paot.org.mx/documentos/semarnat/ensayo_toxicologico.pdf
- Turner, A., y Filella, M. (2021). Hazardous metal additives in plastics and their environmental impacts. *Environment International*, 156, 106622. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106622>

Gestión integral de residuos sólidos municipales. Nuevas tendencias en el contexto latinoamericano.

Se terminó de editar en abril de 2025
en los talleres de Astra Ediciones

Av. Acueducto No. 829
Colonia Santa Margarita, C. P. 45140
Zapopan, Jalisco, México.

33 38 34 82 36

E-mail: edicion@astraeditorial.com.mx

www.astraeditorialshop.com

En esta obra se ha conformado material de investigación, donde bajo el auspicio de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (UDCA), se han conjuntado esfuerzos de profesores, investigadores, consultores, empresarios y autoridades universitarias para concretar este proyecto. No obstante, no hubiera sido posible este material sin la revisión minuciosa de los integrantes del Comité científico internacional y las gestiones administrativas de los integrantes del Comité Editorial.

ISBN: 979-13-87631-89-5



9 791387 163189 5



UDCA
Universidad de Ciencias
Aplicadas y Ambientales

Consulta y descarga