

## PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN DE LA DEGRADABILIDAD DE PLÁSTICOS MEDIANTE COMPOSTEO

María Fernanda RABELL CONTRERAS, Alethia VÁZQUEZ MORILLAS\*,  
Rosa María ESPINOSA VALDEMAR, Margarita BELTRÁN VILLAVICENCIO,  
Miriam Hidemi OSADA VELÁZQUEZ y Jorge Ulises GONZÁLEZ FILIO

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, Av. San Pablo No. 180 Colonia Reynosa  
Tamaulipas, Delegación Azcapotzalco, México D.F., C.P. 02200, México

\*Autora responsable; alethia@correo.azc.uam.mx

*(Recibido agosto 2011, aceptado abril 2013)*

Palabras clave: polietileno, oxo-biodegradable, residuos sólidos orgánicos

### RESUMEN

Las modificaciones realizadas a la Ley de Residuos del D.F. en 2009 y 2010 propiciaron el uso de bolsas fabricadas con polímeros oxo-biodegradables. Estos materiales son susceptibles de biodegradarse si se han sometido a una etapa previa de oxidación mediante temperatura, radiación UV, fricción o una combinación de ellas. El método propuesto por la ASTM (5338) para evaluar la biodegradabilidad de estos materiales implica el uso de composta madura en reactores sometidos a aireación permanente y a una temperatura de 58 °C. En este trabajo se evaluó la factibilidad de evaluar la degradabilidad de estos materiales mediante un proceso controlado de composteo que, a diferencia del método de la ASTM, utiliza residuos orgánicos y condiciones ambientales equiparables a las locales. El sistema, construido en reactores de 200 L, demostró la factibilidad de compostear plásticos oxobiodegradables, que después de 45 días mostraron degradación evidenciada por fragmentación, disminución de la elongación a la ruptura y aumento en el índice de carbonilo. Con ello se propone una metodología alternativa para evaluar la degradabilidad de este tipo de materiales, lo que permitirá dar un cumplimiento adecuado a las disposiciones normativas establecidas en la Ciudad de México.

Key words: polyethylene, oxo-biodegradable, organic solid waste

### ABSTRACT

The changes in the regulations regarding solid waste management in Mexico City during 2009 and 2010 promoted the use of oxo-biodegradable plastic bags. These kind of materials can be biodegraded after oxidation by temperature, UV radiation, friction or a combination of them. The standard ASTM method (5338) to assess biodegradability of plastics requires the use of mature compost, in closed reactors with a constant flow of air and a temperature of 58 °C. This work assessed the feasibility of testing degradability of oxo-biodegradable plastic films in a controlled composted process, which uses organic waste and local environmental conditions. The system, built in 200 L reactors, showed the feasibility to compost oxo-biodegradable plastics. After 45 days the films showed degradation, assessed by fragmentation, a decrease in elongation at breaking

and and increase in the carbonyl index. This method is an alternative to evaluate degradability of these kind of materials, which can help to accomplish the requirements of the regulations developed in Mexico City.

## INTRODUCCIÓN

Los plásticos, y en especial las bolsas fabricadas a partir de los mismos, han recibido considerable atención debido a su acumulación como residuos en el ambiente. En 2006 fueron fabricadas en México 219 724 toneladas de bolsas y sacos de polietileno (INEGI 2007); en ese mismo año se generaron 36 135 000 toneladas de residuos sólidos urbanos. En ese sentido, si todas las bolsas de plástico que se producen se desechan como residuo sólido urbano, el porcentaje en masa que representarían dentro de los RSU en México no es mayor al 0.61% (INE 2009). El reciclaje mecánico de este tipo de materiales es poco frecuente, debido a su bajo peso, la diversidad de sus propiedades y el hecho de que generalmente se encuentran mezclados con otros residuos. Ante esto, su reciclaje biológico puede considerarse como una alternativa que reduzca su impacto en el ambiente. Esto estimuló en los últimos 30 años la modificación de los polímeros sintéticos existentes, así como la síntesis de nuevos polímeros que puedan incorporarse a los ciclos biológicos al ser desechados (Scott 2000). Los grupos principales de plásticos degradables son los hidrolizables y los que requieren, para su biodegradación, de un proceso previo de oxidación por acción de la radiación UV o la temperatura, conocidos como oxo-biodegradables.

En la Ciudad de México como consecuencia de reformas a la Ley de Residuos (GDF 2003 y 2009) se integraron al mercado bolsas de polietileno oxobiodegradable. Esta tendencia se debe principalmente a que para el empleo de esta tecnología no es necesario modificar los procesos de producción de bolsas, y a que éstas presentan las mismas propiedades mecánicas y ópticas respecto a las resinas termoplásticas originales (Botelho *et al.* 2004 y Koutny *et al.* 2006). El uso de los materiales oxobiodegradables se extendió y en la actualidad pueden encontrarse en muchas de las bolsas de plástico que los establecimientos comerciales obsequian a sus clientes.

En la Ciudad de México el proceso de biodegradación de bolsas plásticas modificadas con aditivos prooxidantes, una vez que se convierten en residuos, puede llevarse a cabo mediante el compostaje, ya que existen seis plantas de composta. La que cuenta con mayor capacidad es la de Bordo Poniente, que

trata 73 000 ton/año y se encuentra en proceso de ampliación para tratar 730 000 ton/año (SMA 2011). Las restantes se encuentran en algunas delegaciones del Distrito Federal y son de menor capacidad, pues en promedio manejan 1430.2 ton/año (SMA 2008). El destino o uso de la composta producida puede variar de una planta a otra, sin embargo, se emplea por lo general en áreas verdes y de cultivo, así como en parques y jardines; para donación a la población en general y, en algunos casos, para escuelas (SMA 2006). El fin principal de las plantas de composta es reducir la cantidad de RSU que ingresen al relleno sanitario Bordo Poniente.

La biodegradabilidad de las bolsas de plástico oxobiodegradables se evalúa mediante el método de prueba ASTM 6954-04, que permite cuantificar la degradación en aquellos plásticos que se degradan por la combinación de procesos de oxidación y biodegradación, tomando en cuenta la posible ecotoxicidad de los productos de la degradación. Este estándar, sin embargo, no refleja las condiciones locales que podrían conducir a la degradación de los plásticos oxobiodegradables. México no cuenta actualmente con normatividad ni instituciones que certifiquen la degradabilidad, biodegradabilidad o viabilidad de compostaje de materiales plásticos, lo que hace necesario desarrollar investigación relacionada con la evaluación de la efectividad de degradación de los mismos. Esto permitirá obtener las bases técnicas que ayuden a cubrir las necesidades legales y ecológicas adecuadas a las condiciones ambientales, al tipo de residuos que se generan en el Distrito Federal y a la forma en que se manejan.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sistema de compostaje

La Ley de Residuos del Distrito Federal establece la separación y reaprovechamiento de la fracción orgánica. Por ello, para simular el manejo de residuos sólidos orgánicos en el Distrito Federal se desarrolló un sistema de compostaje en un reactor de polietileno de alta densidad de 200 L, con un sistema de aireación artificial y natural para mantener condiciones aerobias durante el proceso de biodegradación, como se muestra en la **figura 1**. El sistema de aireación natural

consistió en un sistema de dos tuberías de 40 mm en cada reactor, con perforaciones para asegurar el flujo de aire en el centro del sustrato. Las superficies frontal y posterior del tanque fueron perforadas para mejorar el flujo de aire, eliminar el vapor de agua y CO<sub>2</sub> generados por el proceso de biodegradación e incorporar oxígeno al sistema de manera constante. El sistema artificial consistió en tres tuberías de 40 mm con perforaciones, las cuales se conectaban a un compresor.

### Proceso de compostaje

Se utilizó un sustrato en el cual se incorporaron residuos orgánicos. La proporción de los sustratos fue medida en volumen, la mezcla general fue de 1100 L de los cuales el 50 % fueron residuos sólidos orgánicos (RSO), 25 % residuos obtenidos a partir de la molienda de corteza de árbol y 25 % composta madura. Una vez homogeneizada la mezcla de sustratos se llenaron cuatro reactores de 200 L: el reactor 1 se usó como testigo sin plástico, el reactor 2 fue llenado con composta y con 110 tiras de 30 × 5 cm y 3 tiras de 100 × 30 cm de polietileno de baja densidad (PEBD) convencional oxidado previamente, distribuidas en todo el reactor, en los reactores 3 y 4 se realizó el mismo procedimiento pero se cambió el tipo de plástico por polietileno de baja densidad con aditivo prooxidante (oxo-PEBD) sin oxidar y oxidado previamente, respectivamente. La oxidación previa de las muestras correspondientes se realizó en una cámara UV, en la que los plásticos se sometieron a 16.9 watt/m<sup>2</sup> de radiación ultravioleta tipo A por 96 horas.

La composta de cada reactor fue aireada artificialmente una vez al día por 20 minutos durante la primera semana. Adicionalmente fue aireada manual-

mente por el sistema de paleo cada ocho días, para eliminar el exceso de humedad generado por el tipo de residuos orgánicos seleccionados. Durante las dos primeras semanas se midió diariamente la humedad y la temperatura con vástagos en seis puntos fijos de monitoreo en el reactor y el pH por método potenciométrico tomando una muestra de cada reactor. Para evaluar la degradación se determinó la elongación a la ruptura por el método de prueba ASTM D-882 (ASTM 2010) y el índice de carbonilo con un espectrofotómetro FTIR. Para ello se realizaron muestreos de 10 tiras de plástico a los 11, 30 y 45 días del proceso. Al finalizar el tratamiento se realizó un registro fotográfico de cada tipo de plástico.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Evolución del proceso de compostaje

El proceso de compostaje tuvo una duración de 45 días. A los ocho días hubo una disminución de ¼ del volumen en los cuatro reactores y para los 15 días el volumen había disminuido a la mitad, manteniéndose así hasta el término de la prueba.

Para asegurar que el proceso de compostaje sea aerobio se requiere monitorear pH, temperatura y humedad; en la prueba estos parámetros evolucionaron de acuerdo a lo esperado. El pH inicial estuvo cerca de la neutralidad los primeros días, disminuyó por la actividad fúngica y después comenzó a aumentar como se muestra en la **figura 2**; si bien este parámetro no incide directamente en la degradación de las muestras, si es un indicador de la evolución del proceso de composteo y la actividad microbiana requerida para llevar a cabo la biodegradación. Debido

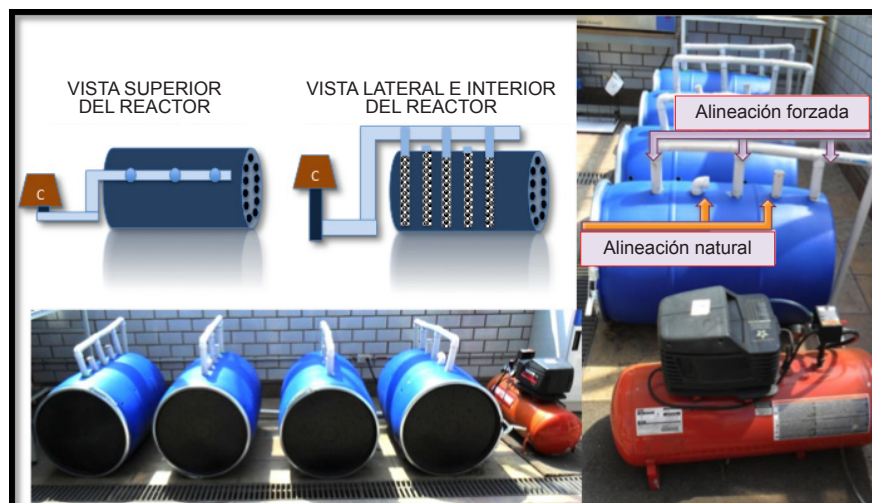
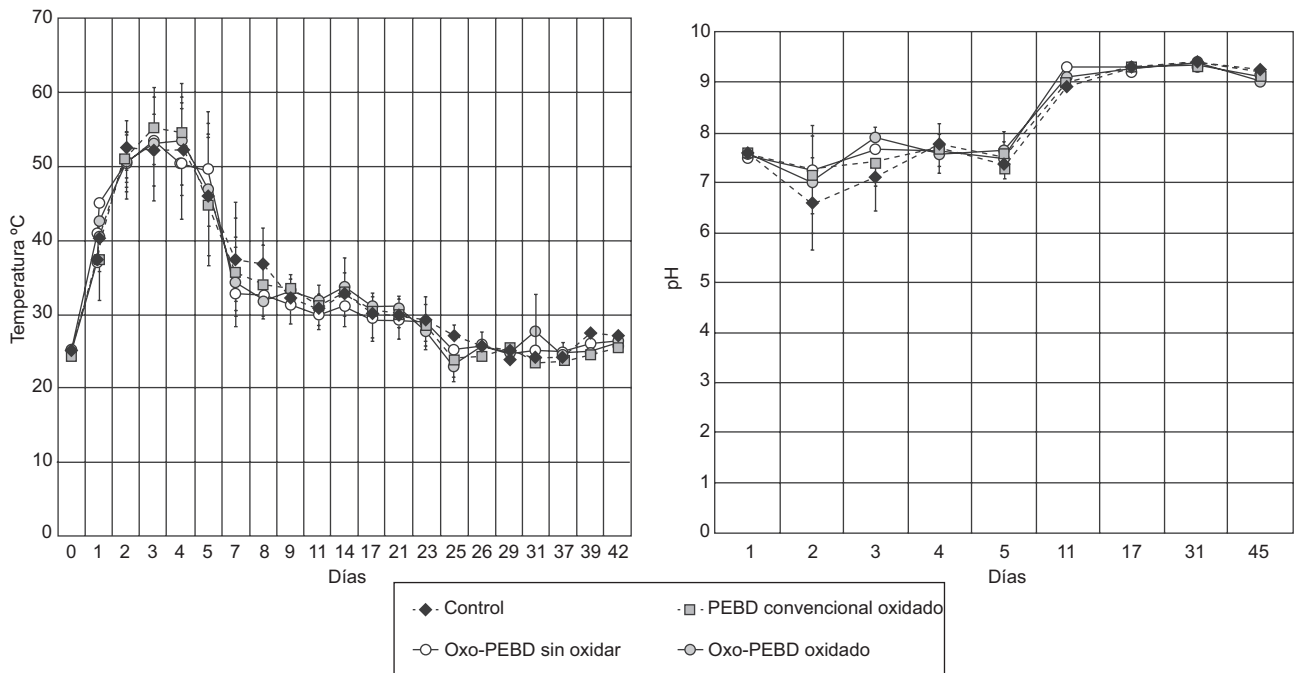


Fig. 1. Reactores para proceso de compostaje y sistema de aireación



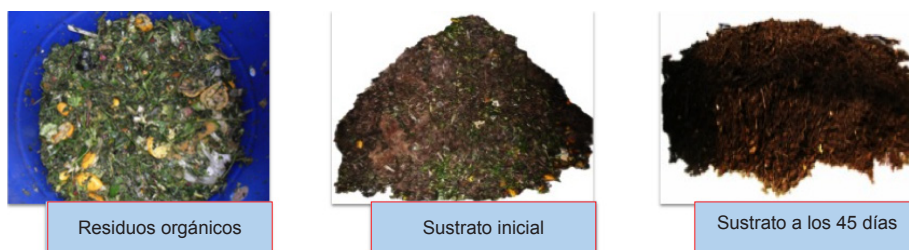
**Fig. 2.** Temperatura y pH promedio del proceso de compostaje de cada reactor

a que el objetivo de la prueba es evaluar de forma sencilla y práctica la degradabilidad de los plásticos, el proceso se detuvo a los 45 días y no se llegó a la maduración final de la composta. Respecto a la temperatura, como se esperaba, los procesos de biodegradación por bacterias termofílicas se llevaron a cabo entre los días 2 y 5, alcanzando las temperaturas máximas al tercer día de proceso, en que se tuvieron temperaturas de 60 °C en el centro de la composta. En promedio se registraron temperaturas entre 50 y 55 °C, como se muestra en la **figura 3**. La disminución de la temperatura fue directamente proporcional a la reducción del volumen, lo que indicó un descenso de los procesos de biodegradación.

Otro cambio relacionado con la evolución de los procesos de degradación de la materia orgánica fue el color y textura del sustrato; conforme pasó el tiempo el sustrato se oscureció y la textura se homogeneizó, a los 45 días de proceso los residuos

orgánicos estaban completamente degradados y la composta comenzaba su etapa de maduración, como se muestra en la **figura 4**.

La humedad depende del contenido inicial de agua en los sustratos y de los procesos de biodegradación, sin embargo se puede controlar para favorecer el proceso. En los primeros días se registró exceso de humedad; esto es indeseable ya que puede favorecer la formación de núcleos anaerobios, los cuales afectan el proceso de biodegradación aerobia. Por tal motivo en la primera semana de proceso las compostas se airearon de manera artificial diariamente y posteriormente se palearon y dejaron a la intemperie una vez a la semana para eliminar el exceso de humedad. Conforme disminuyó la actividad microbiana la humedad se estabilizó y comenzó a disminuir, sin embargo se mantuvo entre el 90 y 100 % de la capacidad de campo para asegurar actividad biológica durante los 45 días de prueba.



**Fig. 3.** Evidencia fotográfica de la evolución del proceso de compostaje

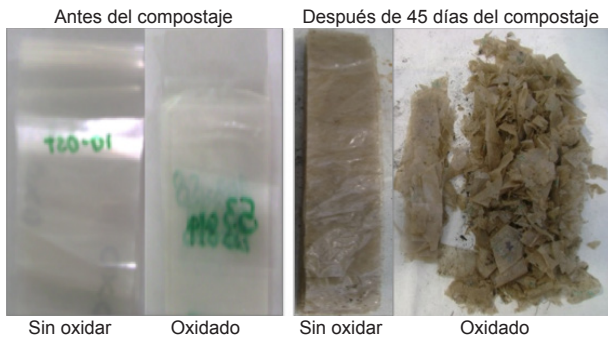


Fig. 4. Evidencia visual del biodeterioro y biofragmentación del Oxo-PEBD por el proceso de compostaje

**Evaluación de la biodegradación de polietileno de baja densidad con aditivo pro-oxidante**

Los plásticos que no han sido degradados tienen pesos moleculares cercanos a 200 000 y presentan elongaciones de 300 % o más antes de la ruptura. Para que un plástico sea susceptible a la biodegradación, de acuerdo con el estándar ASTM 6954 (ASTM 2004), debe presentar un peso molecular promedio cercano a 5000 o 5 % de elongación antes de la ruptura. Las muestras de oxo-PEBD que se introdujeron al proceso de compostaje tenían en promedio 27.09 % de elongación a la ruptura, debido al proceso previo de irradiación UV al que fueron sometidas. La figura 4 muestra la evidencia visual del estado de los plásticos antes del proceso de compostaje y una vez que se concluyó el mismo. En el día 11 del composteo las películas plásticas de oxo-PEBD oxidado previamente presentaron una tonalidad amarillenta, opacidad y

fragmentación, aunque aún existían tiras completas dentro del reactor. Para el día 45 todas las muestras de oxo-PEBD previamente oxidado estaban fragmentadas, mientras que las de oxo-PEBD sin oxidación previa y las de PEBD convencional no presentaron cambios físicos evidentes.

En la figura 5 se muestra en escala logarítmica el porcentaje promedio de elongación de las muestras de oxo-PEBD en los diferentes tratamientos. La disminución del porcentaje de elongación en las muestras oxidadas con respecto al tiempo fue de 77.79, 86.03 y 88.95 % para 11, 30 y 45 días respectivamente, el porcentaje de elongación promedio en los diferentes tiempos de muestreo fue de  $6.02 \pm 1.26$ ,  $3.79 \pm 5.31$ , y  $3.00 \pm 3.96$  para 11, 30 y 45 días (fig. 5). La dispersión entre las réplicas de oxo-PEBD oxidado fue elevada, esto se atribuyó a que las muestras no se degradaron homogéneamente debido a su distribución dentro del reactor; las muestras que presentaron menor porcentaje de elongación probablemente estuvieron en los puntos de mayor temperatura, lo cual favoreció su degradación, en comparación con las muestras que estuvieron cerca de la superficie de la composta. Una dificultad que se presentó al utilizar este método de prueba (ASTM 2010) es que el procedimiento no permite analizar muestras que presenten fisuras en el área de prueba, debido a la dificultad para encontrar tiras de plástico íntegras en el caso de las muestras de oxo-PEBD previamente oxidado. Por otro lado el oxo-PEBD que no fue sometido a oxidación previa y el PEBD convencional oxidado

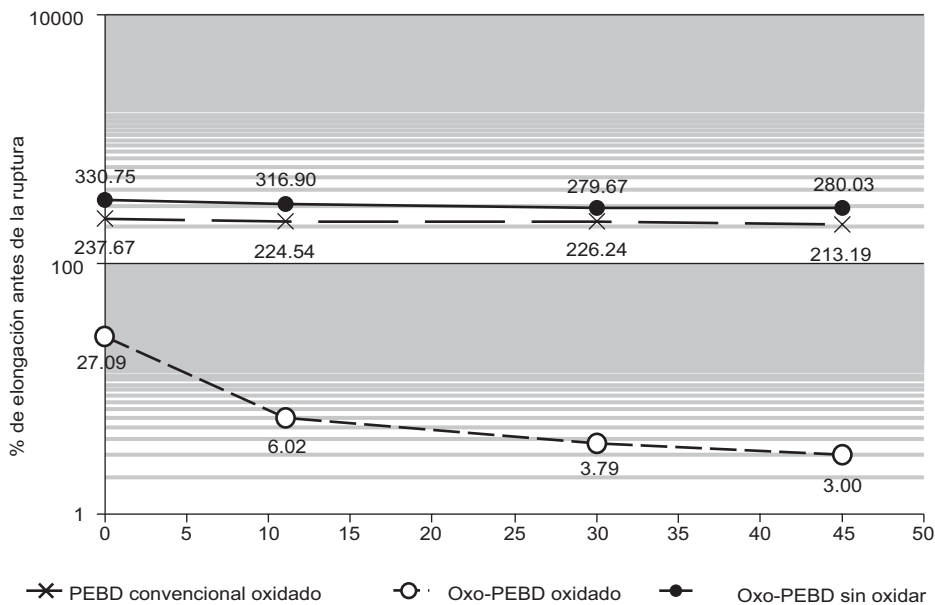


Fig. 5. Porcentaje de elongación promedio de oxo-PEBD sometido a un proceso de compostaje

al final del proceso de compostaje disminuyeron su elongación sólo el 15.33 % y 10.30 %. Por lo tanto puede afirmarse que este método permite distinguir el efecto del proceso de compostaje entre películas plásticas convencionales y degradables que han sido oxidadas previamente

El índice de carbonilo (IC) es una medida de la proporción de enlaces C–O y C=O existentes en las muestras. Dado que este tipo de enlaces se forma debido a la oxidación de los materiales, se utilizan como indicadores de los procesos de degradación. El IC aumentó con respecto al tiempo durante el proceso de compostaje en los tres tipos de plástico (**fig. 6**). Para la muestra de oxo-PEBD oxidada se obtuvieron mediciones de hasta 0.36 y en promedio se obtuvo,  $0.147 \pm 0.0392$  y  $0.171 \pm 0.0939$  para 11 y 45 días, respectivamente. Al igual que en la evaluación de la elongación la dispersión en los datos es alta debido a que el tratamiento en la fase termofílica no fue homogéneo debido a la posición de las muestras dentro de los reactores. En este caso el oxo-PEBD sin oxidar y el PEBD convencional presentaron un ligero aumento en el IC, que sin embargo no resulta significativo en ninguno de ambos casos. El IC promedio del PEBD convencional ( $0.0638 \pm 0.0195$ ) fue mayor que el del oxo-PEBD sin oxidar ( $0.0435 \pm 0.0449$ ).

Tanto en la evaluación del IC como del porcentaje de elongación las muestras de oxo-PEBD previamente oxidado presentaron un comportamiento notablemente diferenciado al del mismo material sin oxidación previa y el PEBD convencional. Aunque los parámetros que se analizaron no son específicos para evaluar biodegradación, sí permiten constatar las modificaciones mecánicas y químicas sufridas por el material mediante el proceso de composteo y han sido utilizados previamente (Lucas *et al.* 2008)

como indicadores de biodeterioro y biofragmentación en películas plásticas.

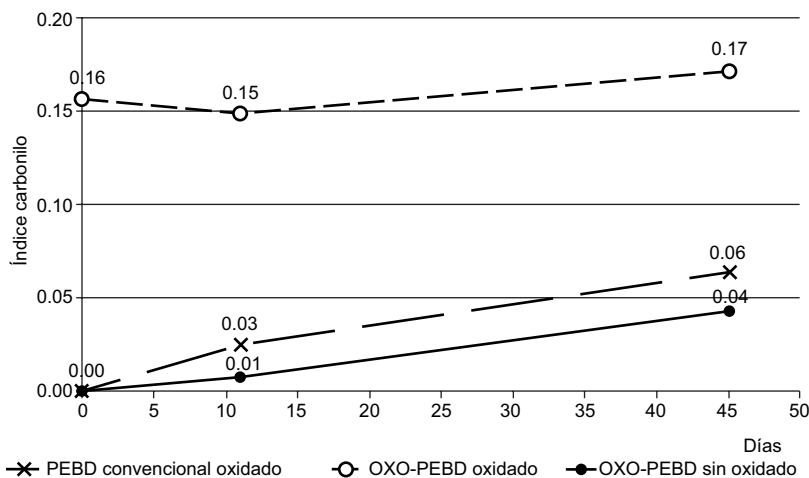
## CONCLUSIONES

Este estudio permitió evaluar la factibilidad de degradar oxo-PEBD previamente oxidado por medio de un proceso controlado de compostaje a pequeña escala, a través de la observación del deterioro y fragmentación de películas plásticas, la disminución de la elongación a la ruptura y el aumento en el índice de carbonilo de las mismas. Aunque existe variabilidad entre los distintos especímenes sometidos a los diferentes tratamientos, este factor puede atenuarse mediante el análisis de un número suficientemente grande de muestras, con el fin de garantizar la confiabilidad de la prueba.

Los métodos estandarizados propuestos como el ASTM 5338 (ASTM 1998) y los de las normas ISO 14855 (ISO 2005) evalúan la biodegradabilidad de los plásticos a partir de la cantidad de CO<sub>2</sub> producido mediante la degradación de las muestras en composta madura, mantenida artificialmente a temperaturas elevadas. Este procedimiento presenta dos inconvenientes:

a) Es poco representativo de las condiciones reales de manejo de residuos. En el sistema de manejo de la Ciudad de México la posible degradación de los plásticos oxobiodegradables se daría mediante su composteo en pilas, mezclados con los residuos orgánicos, a las temperaturas que alcanzara el sustrato de forma natural.

b) Su costo es elevado y la duración de la prueba es de hasta seis meses, lo que lo hace poco viable para su aplicación cotidiana en la evaluación de las bolsas de plástico.



**Fig. 6.** Índice de carbonilo en películas plásticas sometidas a compostaje

El proceso propuesto permite diferenciar claramente los materiales oxobiodegradables de los que no lo son, a través de propiedades que pueden evaluarse de manera simple, como el porcentaje de elongación a la ruptura y el índice de carbonilo. En este sentido constituye una alternativa viable para determinar la degradabilidad potencial de películas plásticas, debida a la combinación de factores bióticos y abióticos que tienen lugar en un proceso de composteo, tales como la biodegradación microbiana y la degradación producida por la temperatura y el desgaste mecánico. Al igual que los métodos estandarizados de la ASTM y la ISO relacionados con la biodegradación de los plásticos, no garantiza la degradación de los materiales en un tiempo específico, pero funciona adecuadamente en la comparación de materiales.

La degradación y biodegradación de los plásticos es una de las opciones de fin de vida de los plásticos, pero debe considerarse en el contexto de la gestión de los residuos a nivel local. En conjunto con la minimización, el reuso, el reciclaje y la valorización puede contribuir a mitigar el impacto ambiental de estos materiales, esenciales en el mundo actual.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio se realizó gracias al proyecto PICS09-327 financiado por Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal en el Programa Ciudad Sostenible.

## REFERENCIAS

- ASTM (1998) ASTM 5338 -98 Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials Under Controlled Composting Conditions. ASTM International, West Conshohocken, PA 1998, DOI: 10.1520/D5338-98E01, www.astm.org.
- ASTM (2004) ASTM 6954-04 Standard Guide for Exposing and Testing Plastics that Degrade in the Environment by a Combination of Oxidation and Biodegradation. ASTM International, West Conshohocken, PA 2004, DOI: 10.1520/D6954-04, www.astm.org.
- ASTM (2010) ASTM D-882 Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. ASTM International, West Conshohocken, PA 2010 DOI: 10.1520/D0882-10, www.astm.org.
- Botelho G., Queiro's A., Machado A., Frangiosa P. y Ferreira J. (2004). Enhancement of the thermooxidative degradability of polystyrene by chemical modification Poly. Deg. Stab. 86, 493-7.
- GDF (2003). Decreto por el que se crea la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal. Gobierno del Distrito Federal. Gaceta. México, Distrito Federal, pp 2.
- GDF (2009). Decreto por el lue se adicionan diversas disposiciones de la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal. Gobierno del Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal. México, Distrito Federal, pp 4.
- INE (2009). Estudio comparativo de bolsas. Instituto Nacional de Ecología. [en línea]. [http://www.ine.gob.mx/descargas/dgcenica/estudio\\_comp\\_bolsas.pdf](http://www.ine.gob.mx/descargas/dgcenica/estudio_comp_bolsas.pdf) 20/01/2011.
- INEGI (2007). Encuesta Industrial Mensual. Sector Manufacturero. Sustancias químicas, derivados del petróleo, productos de caucho y plástico, 2007b. Estadísticas de Residuos Sólidos urbanos. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. [en línea]. <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/rutinas/ept.asp?t=mamb60&s=est&c=8> 855. 20/04/2009.
- ISO (2005) ISO 14855-1:2005 Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials under controlled composting conditions - Method by analysis of evolved carbon dioxide. Internacional Organization for Standardization. Suiza.
- Koutny M., Lemaire J. y Delort A-M. (2006). Biodegradation of polyethylene films with prooxidant additives. Chem. 64, 1243-52.
- Lucas N., Bienaime C., Belloy C., Queneudec M., Silvestre F. Nava-Saucedo J-E. (2008). Polymer biodegradation: Mechanisms and estimation techniques. Chem. 73, 429-442.
- Scott G. (2000). Green polymers. Pol. Deg. Stab. 68, 1-7.
- SMA (2006). Inventario de Residuos Sólidos 2006. Secretaría del Medio Ambiente. [en línea]. [http://www.occm.uam.mx/archivos/17/file/Residuos\\_solidos\\_inventario.pdf](http://www.occm.uam.mx/archivos/17/file/Residuos_solidos_inventario.pdf) 20/06/2010.
- SMA (2008). Inventario de Residuos Sólidos 2008. Secretaría del Medio Ambiente. [en línea]. <http://www.sma.df.gob.mx/rsolidos/inventario-08/inventario2008.pdf> 20/06/2010.
- SMA (2011) Resumen de avances del Plan Verde de la Ciudad de México, con fecha de corte a abril de 2011. Secretaría del Medio Ambiente. [en línea]. [http://www.sma.df.gob.mx/planverde/index.php?option=com\\_content&view=article&id=58&Itemid=69](http://www.sma.df.gob.mx/planverde/index.php?option=com_content&view=article&id=58&Itemid=69) 20/09/2011.