

## II CONFERENCIA INTERNACIONAL 'Gestión de Residuos en América Latina, GRAL 2011'

### ESTUDIO DE LA BIODEGRADABILIDAD DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD CON ADITIVO PRO-OXIDANTE EN CONDICIONES AMBIENTALES Y DE MANEJO DE RESIDUOS DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

*Q.A. María Fernanda Rabell Contreras, Dra. Alethia Vázquez Morillas, M. en C. Rosa María Espinosa Valdemar, M. en C. Margarita Beltrán Villavicencio, Jorge Ulises González Filio, Ing. Miriam Hidemi Osada Velázquez.*

*Área de Investigación: Tecnologías Sustentables  
Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.  
Av. San Pablo No. 180 Col. Reynosa Tamaulipas C.P. 02200 Delegación Azcapotzalco, Distrito Federal, México.*

*E-mail: [frabell5@hotmail.com](mailto:frabell5@hotmail.com), [alethia@correo.azc.uam.mx](mailto:alethia@correo.azc.uam.mx),  
[rmev@correo.azc.uam.mx](mailto:rmev@correo.azc.uam.mx), [mbv@correo.azc.uam.mx](mailto:mbv@correo.azc.uam.mx),  
[filio984@hotmail.com](mailto:filio984@hotmail.com), [imedih85@hotmail.com](mailto:imedih85@hotmail.com)*

#### RESUMEN

En el 2008, fueron introducidos en el mercado mexicano polímeros modificados con aditivos pro-oxidantes principalmente en empaques como bolsas de plástico; sin embargo, todavía no existe normatividad, ni instituciones que certifiquen la degradabilidad, biodegradabilidad o viabilidad de degradación por compostaje de estos materiales. Por ello, esta investigación propone una metodología de prueba que evalúa la biodegradabilidad y ecotoxicidad de estos plásticos en condiciones ambientales, de composición y manejo de residuos en la Ciudad de México. El Polietileno de baja densidad (PEBD) con y sin aditivo pro-oxidante (OXO) fue expuesto durante 4 días a luz UV-A y a 57.6 °C, simulando exposición al sol en forma acelerada. Después de la radiación la elongación a la ruptura del PEBD-OXO disminuyó 94.21% con respecto al control. Las muestras foto-termo oxidadas se compostearon con residuos sólidos orgánicos en reactores de 200 L. Después de 11 días la elongación a la ruptura del PEBD-OXO disminuyó 95.94 % con respecto al control. Se observó que el compostaje de plásticos previamente foto y termo-oxidados disminuyó sus propiedades mecánicas, por lo que la combinación de estos dos tratamientos es una opción viable para la evaluación de la degradabilidad de estos polímeros.

Palabras clave: compostaje, foto-oxidación, polietileno, pro-oxidante, residuos sólidos orgánicos, termo-oxidación.

#### INTRODUCCIÓN

En la Ciudad de México el manejo de los residuos sólidos constituye todo un desafío. Se ha estimado que la proporción de residuos orgánicos generados es del 44 %, mientras que para los materiales potencialmente reciclables es cercano al 30% (plásticos, papel, cartón, envase multicapa, metal, vidrio). Es decir, con el aprovechamiento adecuado de los materiales reciclables y el tratamiento de los residuos orgánicos existe la posibilidad de reducir la generación de basura a casi una cuarta parte (26%) de la generación actual. Para este fin el gobierno del Distrito



## II CONFERENCIA INTERNACIONAL 'Gestión de Residuos en América Latina, GRAL 2011'

Federal impulsa programas de separación de la basura y sensibilización de la ciudadanía de acuerdo a lo establecido en la Ley General de Residuos Sólidos del D.F. En la actualidad existen varias Delegaciones de la ciudad que cuentan con programas de separación de residuos en orgánicos e inorgánicos, algunos programas de separación son muy exitosos llegando a niveles de separación de más del 90 % de residuos orgánicos en colonias específicas. Sin embargo, el potencial de este tipo de residuos, no es aprovechado completamente, aunque la ciudad cuenta con 6 plantas de compostaje en funcionamiento, éstas no operan a su capacidad máxima debido a la falta de infraestructura, aunado a que es la única opción para el tratamiento de este tipo de residuos. El nivel de recuperación de materiales susceptibles a reciclaje o reutilización es del orden del 10-12 % respecto al peso total de la basura (Orta *et al.*, Saucedo *et al.* y Tovar *et al.* 2009). En la actualidad no se cuenta con información oficial sobre la proporción que representan las bolsas de plástico en la corriente de los residuos sólidos urbanos (RSU) de México, sin embargo con base en algunos estudios y encuestas se pueden hacer estimaciones. En el año 2006, se fabricaron 219,724 toneladas de "bolsas y sacos de polietileno", considerando tanto los impresos como sin imprimir. En ese mismo año se generaron en México 36,135,000 toneladas de residuos sólidos urbanos. En ese sentido, si todo lo que se produce se desecha como residuo sólido urbano, el porcentaje que representarían las bolsas y sacos de plástico dentro de los RSU en México no es mayor al 0.61% y de esta proporción la cantidad de bolsas post-consumo que son recicladas como materia prima para la fabricación de nuevos productos de plástico es muy baja, del orden del 1 al 2% (INE, 2009).

Con el fin de disminuir el uso indiscriminado de bolsas plásticas, así como fomentar el uso de materiales con menor impacto ambiental, en marzo de 2009 la Asamblea Legislativa del Distrito Federal modificó la Ley de Residuos Sólidos, prohibiendo que los establecimientos mercantiles proporcionen a sus clientes bolsas de plástico, a menos que éstas sean biodegradables. Dicha reforma se publicó en el Gaceta Oficial del Distrito Federal (D.F.) el 18 de agosto del 2009 y entró en vigor a un año de su publicación. La legislación se modificó nuevamente en septiembre de 2010, y aunque se eliminó la prohibición del uso de bolsas no biodegradables, recomienda su uso como complemento a las medidas que favorecen el reuso y reciclaje. Estas disposiciones obligaron a los fabricantes de bolsas plásticas a modificar las tecnologías tradicionales, para producir bolsas degradables, mediante la incorporación de aditivos que actúen como catalizadores, acelerando el proceso de degradación de las mismas, o por la sustitución de los polímeros empleados en su manufactura. En México, el uso de de polímeros modificados con aditivos pro-oxidantes inició en 2008, cuando grupo BIMBO comenzó a utilizar empaques de polietileno degradable en las bolsas para pan de caja (Grupo Bimbo, 2008). Debido a las modificaciones en la Ley de Residuos el uso de los materiales oxo-biodegradables se extendió y en la actualidad pueden encontrarse en muchas de las bolsas de plástico que los establecimientos comerciales obsequian a sus clientes.

## II CONFERENCIA INTERNACIONAL 'Gestión de Residuos en América Latina, GRAL 2011'

Este tipo de polímeros se evalúa mediante el método de prueba ASTM 6954-04, que permite evaluar la degradación en aquellos plásticos que se degradan por procesos secuenciales 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 oxo-biodegradables. Dado lo anterior, la presente investigación busca adaptar dicha metodología de prueba para evaluar la biodegradabilidad y ecotoxicidad de los plásticos oxo-biodegradables en las condiciones ambientales, de composición y manejo de residuos en la Ciudad de México.

### MÉTODOS

Las muestras de plástico fueron proporcionadas por Artes Gráficas Unidas S.A. de C.V. (AGUSA) la cual utiliza el aditivo pro-oxidante de la compañía Plásticos Degradables, filial mexicana de Symphony Environmental para la fabricación de la película de PEBD-OXO. El calibre de las películas plásticas de PEBD y de PEBD-OXO utilizadas fue de 200, y se utilizaron muestras de 30 cm x 5 cm.

Para la degradación oxidativa abiótica se utilizó una cámara de intemperismo acelerado construida para fines de este estudio. En la cámara las unidades experimentales fueron expuestas a la radiación UV-A en 3 lotes de 40 muestras de cada tipo de plástico de forma intercalada y se irradiaron durante 4 días con una radiación promedio de  $16.9 \text{ watt/m}^2$ , que equivale a la radiación máxima promedio en el Distrito Federal. La temperatura en la cámara se mantuvo en  $57.6 \text{ }^\circ\text{C}$  (figura 1).

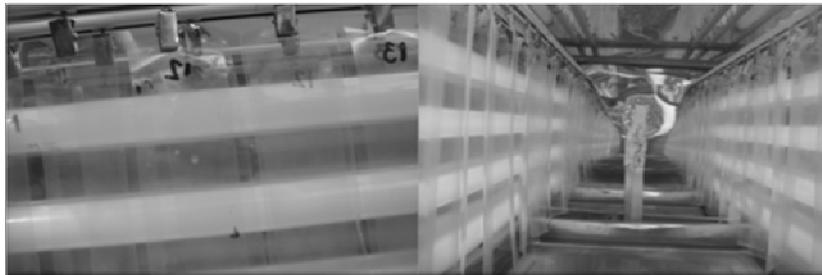


Figura 1. Exposición de muestras a radiación UV-A

La biodegradación se realizó por proceso de compostaje y para simular el manejo de residuos sólidos orgánicos en el Distrito Federal fueron acondicionados cuatro reactores con una capacidad de 200 L, los cuales contaron con un sistema de aeración artificial y natural para mantener condiciones aerobias durante el proceso, como se muestra en la figura 2. El sistema de aireación natural consistió en un sistema de 2 tuberías de 40 mm por 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 y poder eliminar el vapor de agua y  $\text{CO}_2$  generados por el proceso de biodegradación e incorporar oxígeno al sistema de manera constante. El

## II CONFERENCIA INTERNACIONAL 'Gestión de Residuos en América Latina, GRAL 2011'

sistema artificial consistió en tres tuberías de 40 mm con perforaciones, las cuales se conectaban a un compresor. Las compostas se airearon artificialmente una vez al día por 20 minutos durante la primera semana. Adicionalmente la composta de cada reactor fue aireada manualmente por el sistema de paleo cada 8 días para eliminar el exceso de humedad generado por el tipo de residuos orgánicos seleccionados.

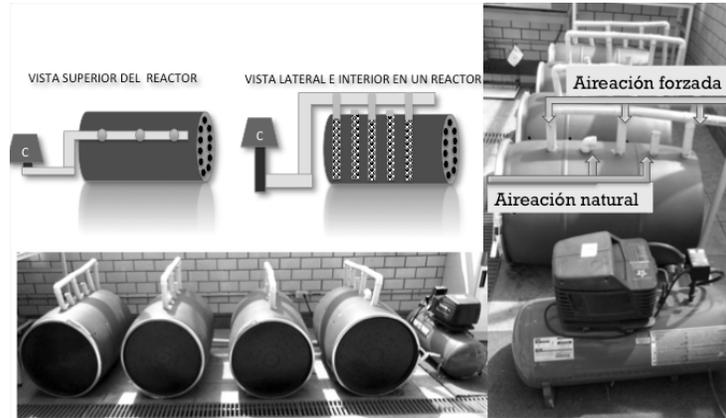


Figura 2. Reactores para proceso de compostaje y sistema de aireación.

La proporción de los sustratos fue medida en volumen. La mezcla general fue de 1100 L, de los cuales el 50% correspondió a residuos sólidos orgánicos, 25% a mulch y 25% a composta madura. Una vez homogeneizada la mezcla de sustratos se llenaron los reactores de 200 L. El reactor 1 fue el control, en el reactor 2 se adicionaron 110 tiras de 30 x 5 cm y 3 tiras de 100 x 30 cm de PEBD convencional irradiado, distribuidas en todo el reactor, en el reactor 3 y 4 se realizó el mismo procedimiento para el plástico PEBDOXO sin irradiar e irradiado, respectivamente.

Para monitorear el proceso de compostaje en cada reactor se determinó el pH y cenizas del sustrato inicial mediante la norma mexicana NMX-AA-25-1984, NMX-AA-18-1984 respectivamente. La humedad relativa y temperatura se midieron mediante humidímetro y termómetro de vástago. La materia orgánica se determinó calculando los sólidos volátiles de 20 g de muestra, la cual se colocó en un crisol a peso constante y se sometió a calcinación a una temperatura de 650°C durante tres horas, una vez frío el crisol se determinó la masa final y se obtuvo el porcentaje de sólidos volátiles. Durante las dos primeras semanas se monitoreó diariamente la humedad relativa y la temperatura con vástagos, en 6 puntos fijos de monitoreo, posteriormente cada tercer día.

Se realizó un muestreo de plásticos obteniendo 10 unidades experimentales a los 11 días, para realizar pruebas de elongación por el método de prueba ASTM D-882 10 para Determinación de Resistencia a la Tensión y Elongación a la Ruptura. Al finalizar cada tratamiento se realizó registro fotográfico de cada tipo de plástico.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN:

La temperatura dentro del proceso de compostaje se comportó como se esperaba: los primeros días aumentó, alcanzando en promedio,  $52.5 \pm 6.3$  °C,  $54.5 \pm 6.8$  °C,  $50.5 \pm 7.5$  °C,  $53.5 \pm 6$  °C, en los reactores 1, 2, 3 y 4 respectivamente. Esto indica un aumento en la actividad microbiana y que la aireación fue eficiente. Cuando la actividad microbiana se redujo se observó la disminución de la temperatura, que para el día 11 disminuyó en promedio a  $29.80 \pm 1.30$  °C,  $30.67 \pm 1.86$  °C,  $30.17 \pm 2.23$  °C y  $32 \pm 2$  °C en los reactores 1, 2, 3, y 4 respectivamente (figura 3).

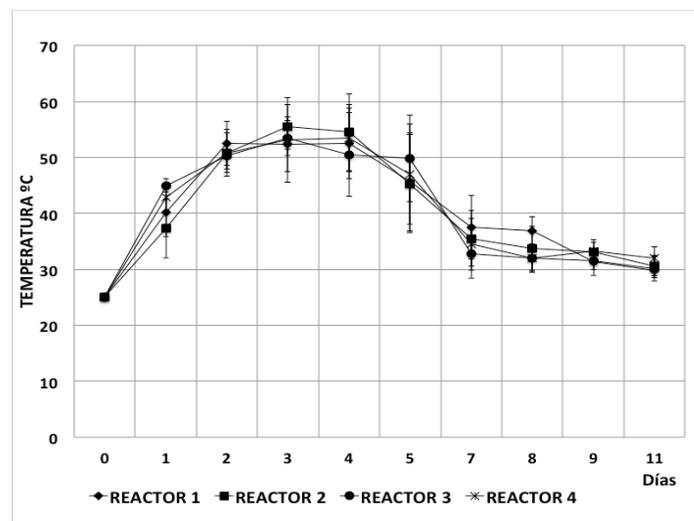


Figura 3. Temperatura registrada en cada reactor durante el proceso de compostaje

Al inicio del proceso la mezcla de sustratos presentó un pH de 7. Conforme avanzó el proceso de biodegradación éste fue aumentando hasta alcanzar, al día 11, pH de  $9.11 \pm 0.01$ ,  $8.98 \pm 0.16$ ,  $9.26 \pm 0.06$  y  $9.12 \pm 0.04$  en los reactores 1, 2, 3 y 4 respectivamente (figura 4). Para que el proceso de compostaje termine y el pH se estabilice entre 7 y 8 se requiere de más tiempo, sin embargo el objetivo de este estudio fue evaluar la capacidad de compostaje de los plásticos con aditivo pro-oxidante, la cual se da los primeros días del proceso, donde gracias al inicio de la degradación de la materia orgánica por bacteria psicrófilas y mesófilas se alcanzan las temperaturas para dar lugar al crecimiento de bacterias termófilas, logrando elevar la temperatura de la composta hasta 65 °C o más y este grupo bacteriano es el responsable de degradar la mayor parte de materia orgánica. Una vez que baja su actividad la composta reduce su temperatura, como se observa en la figura 3.

## II CONFERENCIA INTERNACIONAL 'Gestión de Residuos en América Latina, GRAL 2011'

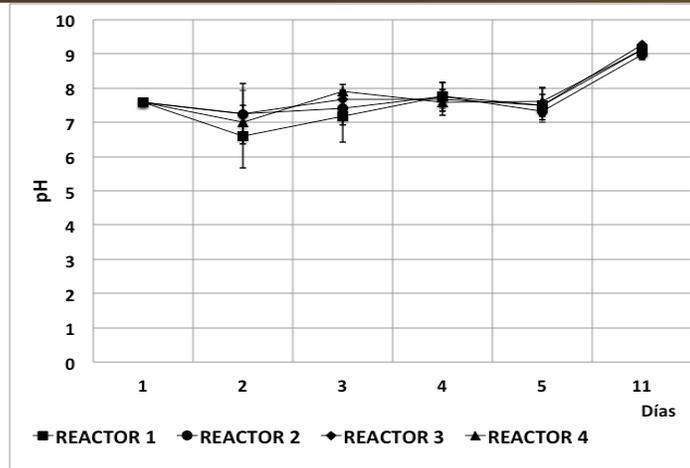


Figura 4. pH registrado en cada reactor durante el proceso de compostaje.

Mantener la humedad relativa entre el 60 y 80% en el proceso de compostaje es vital para el desarrollo microbiano y para favorecer las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, sin embargo la humedad dependerá del tipo de residuos orgánicos. En este caso los residuos fueron principalmente cáscaras de fruta, lechuga y vegetales, los cuales tienen un alto contenido de humedad, por lo cual la humedad de la composta durante los 11 días se mantuvo en un promedio de  $97.22 \pm 2.98\%$ ,  $96.74 \pm 1.98\%$ ,  $98.07 \pm 2.14\%$  y  $98.39 \pm 2.46\%$  para el reactor 1, 2, 3 y 4, respectivamente, y el volumen de la materia orgánica disminuyó en un 50% a los 10 días del proceso.

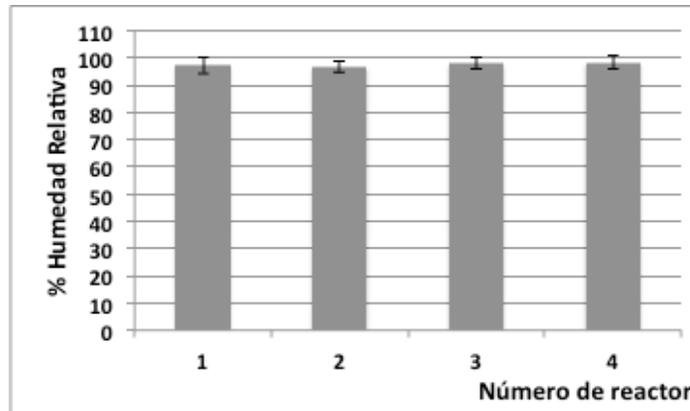


Figura 4. Humedad relativa registrada en cada reactor durante el proceso de compostaje.

El efecto de la exposición a luz UV-A y a  $57.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  logró que la elongación antes de la ruptura en el PEBD disminuyera de  $176.03 \pm 13.5\%$  a  $153.38 \pm 23.8\%$  (figura 5) sin embargo, dado que la desviación estándar del PEBD irradiado es alta, se considera que el tratamiento no tuvo efecto sobre este tipo de plástico. Para el OXO-PEBD la elongación disminuyó de  $178.8 \pm 51\%$  a  $10.35 \pm 5.63\%$ . La diferencia entre el control

## II CONFERENCIA INTERNACIONAL 'Gestión de Residuos en América Latina, GRAL 2011'

y el tratamiento es significativa; la elongación disminuyó en un 94.21%, lo que indica que la película plástica se oxidó logrando escindir la cadena del polímero en cadenas de carbono de menor tamaño y afectando las propiedades mecánicas del plástico, sin embargo, 4 días de exposición no fue suficiente para alcanzar el 5% de elongación el cual es el porcentaje que se considera recomendable para iniciar el proceso de biodegradación por compostaje.

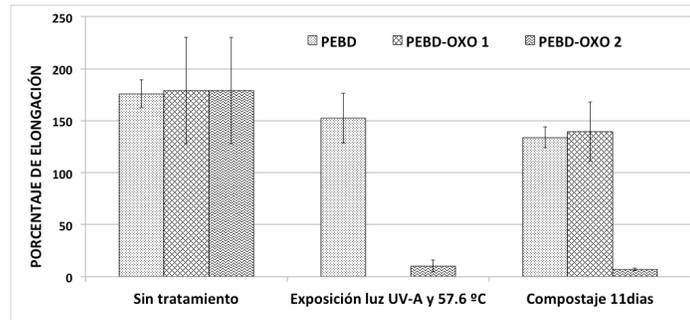
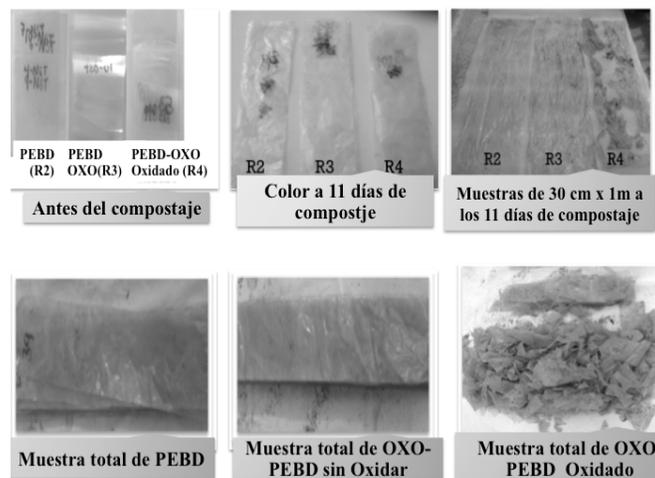


Figura 5 Elongación antes de la ruptura de PEBD y PEBD-OXO

Después de 11 días de compostaje el PEBD irradiado y el PEBD-OXO sin tratamiento foto-termo oxidativo presentaron una elongación de  $134.02 \pm 9.96\%$  y  $139.6 \pm 28.22\%$  respectivamente. Esto representa una disminución respecto a su control en esta propiedad de 23.87% y 21.92% respectivamente; esta disminución no se consideró como un efecto del tratamiento. Por otro lado el PEBD-OXO que fue previamente foto-oxidado presentó 7.27% de elongación, lo que representa una disminución con respecto a su control de 95.94%, a pesar que la diferencia en la disminución del plástico después de la radiación respecto a los 11 días de compostaje fue de 1.73% y dado que no se logró el 5% de elongación para el inicio de la biodegradación visualmente el plástico se fraccionó y las películas plásticas presentaron coloración amarilla (figura 7).



## II CONFERENCIA INTERNACIONAL 'Gestión de Residuos en América Latina, GRAL 2011'

Figura 7 Evidencia visual de los efectos del compostaje en el PEBD y OXO-PEBD foto-termo oxidado y del OXO-PEBD sin tratamiento.

La resistencia a la tensión después de la foto-termo oxidación disminuyó de 1.43 a 0.8 mPa lo que representa un decremento de 44.29% para el PEBD-OXO. El comportamiento de esta propiedad para el PEBD foto-termo oxidado y OXO-PEB después del compostaje no tuvo cambios significativos (figura 8).

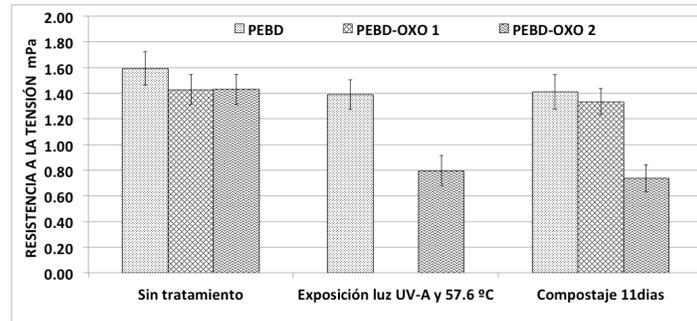


Figura 8 Resistencia a la tensión de PEBD y PEBD-OXO

### CONCLUSIÓN

La combinación de la foto y termo oxidación seguida de un proceso de compostaje utilizando una combinación de sustratos con residuos sólidos orgánicos sobre el PEBD-OXO presentó un efecto positivo en su degradación. Aún cuando la degradación oxidativa no alcanzó la elongación deseada de 5%, se presenta una disminución de sus propiedades mecánicas como la elongación y tensión a la ruptura se redujeron a 95.94% y 44.29% respectivamente.

Los datos obtenidos acerca del comportamiento del PEBD-OXO en un proceso de compostaje a pequeña escala con residuos sólidos orgánicos permiten demostrar que es viable llevar a cabo este proceso en las plantas de compostaje del Distrito Federal mediante una investigación más extensa y en condiciones reales respecto al manejo de los residuos sólidos de la Ciudad de México, así como de ecotoxicidad para conocer los efectos al biodegradar este tipo de plástico en el producto final del compostaje, debido a que en la actualidad no se conocen reportes de investigación científica en estas condiciones de tratamiento.

### REFERENCIAS

**American Section of the International Association for Testing Materials (ASTM) D -6954-04.** Standard Guide for Exposing and Testing Plastics that Degrade in the Environment by a Combination of Oxidation and Biodegradation

**American Section of the International Association for Testing Materials (ASTM) D882 – 10.** Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheet

## II CONFERENCIA INTERNACIONAL

'Gestión de Residuos en América Latina, GRAL 2011'

**Grupo BIMBO (2008).** Boletines [en línea]. México D.F. [citado 28 agosto 2008]. Disponible en Internet: <http://www.grupobimbo.com.mx/salaprensa/index.php?fuseaction=home.boletin&bolID=211>. Fecha de consulta: Julio 2010.

**INE (Instituto Nacional de Ecología) 2009.** Estudio comparativo de bolsas de plástico degradables versus convencionales mediante la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida, Informe final julio 2009 [en línea]. Disponible en internet: [http://www.ine.gob.mx/descargas/dgcenica/estudio\\_comp\\_bolsas.pdf](http://www.ine.gob.mx/descargas/dgcenica/estudio_comp_bolsas.pdf). Fecha de consulta: Enero 2011.

**Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal.** Publicada en la Gaceta Oficial del Distrito Federal el 22 de abril de 2003 [en línea]. Disponible en internet: [http://www.provecino.org.mx/pdfs/leyes/Ley\\_Residuos\\_Solidos\\_DF.pdf](http://www.provecino.org.mx/pdfs/leyes/Ley_Residuos_Solidos_DF.pdf). Fecha de consulta: Enero 2011.

**NMX-AA-25-1984.** Norma Mexicana Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos solidos - Determinación del pH método potenciométrico [en línea] Disponible en internet: <http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/normas/Normas%20Mexicanas%20Vigentes/NMX-AA-025-1984.pdf>. Fecha de Consulta: Enero 2011

**NMX-AA-18-1984.** Norma Mexicana Protección al ambiente-Contaminación del suelo- Residuos sólidos-Determinación de cenizas [en línea] Disponible en internet: <http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/normas/Normas%20Mexicanas%20Vigentes/NMX-AA-018-1984.pdf>. Fecha de Consulta: Enero 2011

**Orta Ledesma T., Rojas Valencia N., Yañez Noguez I., Toscano Vélez L., Zenil Rodríguez A. y Roé Sosa A (2009).** Estudio para actualizar la composición y generación de los residuos sólidos urbanos en el Distrito Federal. Coordinación de Ingeniería Ambiental. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

**Saucedo Castañeda G., Guzmán López O. y Baca Sánchez G. (2009).** Estudio para actualizar la composición y generación de los residuos sólidos urbanos en el Distrito Federal (2006-2008). Caso de las estaciones de transferencia de: Benito Juárez, Central de Abasto, Iztapalapa y Venustiano Carranza y la Planta de Selección de San Juan de Aragón. Departamento de Biotecnología Unidad Iztapalapa. Universidad Autónoma Metropolitana.

**SMA (Secretaría del Medio Ambiente) (2008).** Inventario de Residuos Sólidos 2008 [en línea]. Disponible en internet: <http://www.sma.df.gob.mx/rsolidos/inventario-08/inventario2008.pdf>. Fecha de consulta: Julio 2010.



## II CONFERENCIA INTERNACIONAL 'Gestión de Residuos en América Latina, GRAL 2011'

**Tovar Gálvez L., Castro Corona R., Solano Carmona A., Santiago Benítez Y. y Rodríguez Tapia C. (2009).** Estudio para actualizar la composición y generación de los residuos sólidos urbanos en el distrito federal. I. Cinco estaciones de transferencia y una planta de selección. Centro interdisciplinario de investigaciones y estudios sobre medio ambiente y desarrollo, Instituto Politécnico Nacional.

