



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA AMBIENTAL – RESIDUOS SÓLIDOS

***DEGRADACIÓN DE LA PELÍCULA DE POLIETILENO CON UN
ADITIVO PRO-OXIDANTE DURANTE EL COMPOSTAJE.***

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
Q. ARTURO ÁVAREZ ELIZALDE

TUTOR PRINCIPAL
Dra. Ma. Teresa Orta Ledesma, INSTITUTO DE INGENIERÍA.
COMITÉ TUTOR
Dra. Georgina Fernández Villagómez, FACULTAD DE INGENIERÍA
M. I. Constantino Gutiérrez Palacios, FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. OCTUBRE 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. Constantino Gutiérrez Palacios

Secretario: M.I. José Luis Martínez Palacios

Vocal: Dra. María Teresa Orta Ledesma

1^{er.} Suplente: Dra. Georgina Fernández Villagómez

2^{do.} Suplente: M.A.I. Landy Irene Ramírez Burgos

Lugar donde se realizó la tesis: Instituto de Ingeniería UNAM.

TUTOR DE TESIS:

Dra. María Teresa Orta Ledesma

FIRMA



Índice

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. OBJETIVO	4
1.1.1. General.....	4
1.1.2. Particulares	4
1.1.3. Alcances y limitaciones	4
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Composición de los residuos sólidos urbanos	5
2.2. Generación de residuos sólidos urbanos.....	6
2.3. Compostaje	8
2.3.1. Etapas del proceso	9
2.3.2. Parámetros involucrados en el proceso	10
2.4. Polímeros degradables	12
2.4.1. Tipos de polímeros	12
2.4.2. Degradación de polímeros	13
2.5. Aditivos pro-oxidantes	15
2.5.1. Aditivo pro-oxidante de cobalto	16
2.6. Métodos analíticos para la identificación y cuantificación del Co y la degradación de la película de polietileno.....	17
2.6.1. Espectroscopía de Absorción Atómica (EAA).....	17
2.6.2. Espectroscopía de Infrarrojo de Transformadas de Fourier (FTIR).....	18
3. METODOLOGÍA.....	19
3.1. Preparación y caracterización de la muestra de FORSU para el proceso de compostaje	21
3.2. Preparación y caracterización de la película de polietileno de baja densidad	23
3.3. Diseño de los reactores	25
3.4 Sistema para controlar la temperatura	27
3.5. Cantidad de plástico	28



3.6. Determinación de la concentración de aditivo en la película	29
3.7. Montaje del dispositivo experimental.....	30
3.8. Cuantificación de la degradación	32
3.9. Cuantificación del metal.....	34
3.10. Diseño experimental.....	35
4. RESULTADOS.....	37
4.1. Caracterización	38
4.2. Resultados de las pruebas experimentales durante el proceso de compostaje	38
4.2.1. Proceso de compostaje.....	38
4.2.2. Proceso de aireación	41
4.2.3. Temperatura.....	43
4.2.4. Humedad.....	44
4.2.5. Relación C/N	46
4.2.6. pH	46
4.2.7. Degradación de la película de polietileno en el proceso de compostaje	48
5. CONCLUSIONES	68
6. REFERENCIAS.....	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1. Composición de los RSU en México. 2011. (Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en zonas Urbano-Marginadas. Sedesol México 2012).	6
Figura 2. 2. 2010, Generación per cápita en países de la OCDE, 2013; (Economic, Environmental and Social Statistics, 2013).....	7
Figura 2. 3. Estructura del polietileno.	8
Figura 3. 1. Sitio de muestreo, Bordo Poniente.....	19
Figura 3. 2. Diagrama general de la metodología.....	20
Figura 3. 3. Diagrama general de la metodología.....	21
Figura 3. 4. Fotografía del sitio de muestreo y de la FORSU.	22
Figura 3. 5. Proceso de elaboración de las películas plásticas de baja densidad, a) Pesado de los pellets, b) Adición del aditivo del 1 al 10 % en peso y mezclado, c) Adición de la mezcla a la máquina extrusora y d) Obtención de las películas.	24
Figura 3. 6. Escalamiento de compostero.....	26
Figura 3. 7. Diseño de la bolsa de malla de soporte de la FORSU.....	26



Figura 3. 8. Esquema del sistema de temperatura, resistencia, relevador, controlador de temperatura, sonda para temperatura.....	27
Figura 3. 9. Fotografías del sistema de temperatura, a) controladores de temperatura y b) relevadores de corriente.....	28
Figura 3. 10. Fotografías del sistema de temperatura, a) resistencia con tapa aislante y b) resistencia empacada en tubo de aluminio.	28
Figura 3. 11. Tamaño de las películas de PE.....	29
Figura 3. 12. Montaje de los composteros, a) pesado de muestra, b) trasvaso de la muestra a los composteros, c) montaje de composteros y d) conexión de los sistemas de temperatura.	30
Figura 3. 13. Etapas del proceso de compostaje, (FAO, 2012).	31
Figura 3. 14. Técnica de Espectroscopia de Infrarrojo (FTIR). Foto a) Equipo de Infrarrojo Nicolet Thermo Scientific modelo 6700, b) espectrograma de transmitancia que se obtiene del equipo y c) conversión de transmitancia a absorbancia para determinar el IC.	32
Figura 3. 15. Técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). Foto a) Equipo JEOL 7600 F, b) Montaje de muestras y c) Micrografía, la cual muestra una zona de fragmentación.	33
Figura 3. 16. Fotos del equipo a utilizar para cuantificar el cobalto, a) equipo Thermo Scientific, b) identificación y envase de muestras y c) imagen del automuestreador, en el cual se montan las muestras.	34
Figura 4. 1. Toma y preparación de la muestra FORSU, a) sitio de muestreo, b) trituradora industrial, c) muestra triturada y d) muestra tomada para realizar la caracterización.	37
Figura 4. 2. Fotografías del proceso de compostaje en los días a) día 5, b) día 15 y c) día 15 obtención de lixiviado.	39
Figura 4. 3. Fotografías del proceso de compostaje a los días a) 25, b) 35 y c) 45.....	39
Figura 4. 4. Fotografías del proceso de compostaje a los días 55 a) polietileno con aditivo y b) polietileno sólo y al 65 c) polietileno con aditivo y d) polietileno sólo.	40
Figura 4. 5. Fotografías del proceso de compostaje a los días 68 a) Polietileno con Co, b) polietileno sólo, 75 d.,c) polietileno con Co, 80 d., d) polietileno con Co y a los 90 d., e) polietileno con Co y f) polietileno sólo.	41
Figura 4. 6. Fotografías de las pruebas preliminares y de la fauna asociada. a) sistema de temperatura y FORSU, b) masa compactada de FORSU y c) aparición de larvas y gusanos a los 15 días, debido a la falta de oxigenación.	42
Figura 4. 7. Fotografía de material de soporte utilizado en el proceso de compostaje, en el cual se tienen restos de poda como: pasto, hojas, ramas, etc., obtenidos de la planta de compostaje de Ciudad Universitaria.	43
Figura 4. 8. Comportamiento de la temperatura durante el proceso de compostaje.....	44
Figura 4. 9. Comportamiento de la humedad durante el proceso de compostaje.	45
Figura 4. 10. Comportamiento de la relación C/N durante el proceso de compostaje.	46
Figura 4. 11. Comportamiento del pH durante el proceso de compostaje.....	48
Figura 4. 12. Fotografías del proceso de degradación de la película de polietileno y la de polietileno con Co a los días: a) inicial, b) 25, c) 45, d) 68, e) 78 y f) 90.....	49
Figura 4. 13. Espectro del polietileno sin la banda correspondiente al carbonilo de 1714–1750 cm ⁻¹	50



Figura 4. 14. Espectro del polietileno con la banda correspondiente al carbonilo (1714–1750 cm^{-1}).....	51
Figura 4. 15. Espectrograma de la obtención del área bajo la curva para obtener el IC.	52
Figura 4. 16. Tendencia del IC de las películas de polietileno con y sin el metal Co a lo largo del proceso de compostaje.....	53
Figura 4. 17. Espectrograma del proceso de degradación de la película de polietileno con aditivo de cobalto a lo largo del proceso de compostaje.	54
Figura 4. 18. Espectrograma del proceso de degradación de la película de polietileno sin el aditivo a lo largo del proceso de compostaje.....	55
Figura 4. 19. Espectrograma comparativo de la diferencia entre el polietileno con aditivo de cobalto y sin éste.	56
Figura 4. 20. SEM, (A) micrografías de las películas de polietileno iniciales antes de ser sometidas al proceso de compostaje. (B) micrografías topográficas de las películas de polietileno iniciales antes de ser sometidas al proceso de compostaje.....	57
Figura 4. 21. SEM, (A) micrografías de las películas de polietileno a los 25 días en el proceso de compostaje. (B) micrografías topográficas de las películas de polietileno a los 25 días en el proceso de compostaje.....	58
Figura 4. 22. SEM, (A) micrografías de las películas de polietileno a los 45 días en el proceso de compostaje. (B) micrografías topográficas de las películas de polietileno a los 45 días en el proceso de compostaje.....	59
Figura 4. 23. SEM, (A) micrografías de las películas de polietileno a los 68 días en el proceso de compostaje. (B) micrografías topográficas de las películas de polietileno a los 68 días en el proceso de compostaje.....	60
Figura 4. 24. SEM, (A) micrografías de las películas de polietileno a los 80 días en el proceso de compostaje. (B) micrografías topográficas de las películas de polietileno a los 80 días en el proceso de compostaje.....	61
Figura 4. 25. SEM, (A) micrografías de las películas de polietileno a los 90 días en el proceso de compostaje. (B) micrografías topográficas de las películas de polietileno a los 90 días en el proceso de compostaje.....	62
Figura 4. 26. Fotografías, metodología seguida para la cuantificación de Co por EAA, a) secado de muestras en horno, b) molienda de muestra, c) pesado de muestras, d) digestión de las muestras, e) obtención del filtrado de las muestras y f) determinación del metal.	63
Figura 4. 27. Estadístico de distribución de la concentración de Co en la FORSU en el tiempo de experimentación (90 días).	66
Figura 4. 28. Estadístico de distribución de la concentración de Co en la FORSU + P.E. en el tiempo de experimentación (90 días).....	66
Figura 4. 29. Estadístico de distribución de la concentración de Co en la FORSU + P.E + Co. en el tiempo de experimentación (90 días).	67



LISTA DE TABLAS

Tabla 3. 1. Técnicas analíticas para la determinación de los parámetros en la composta....	23
Tabla 3. 2. Técnicas analíticas para la determinación de la degradación y del metal contenido en la película.	25
Tabla 3. 3. Arreglo por tipo de compostero.....	25
Tabla 3. 4. Dosis de película de polietileno por reactor.	31
Tabla 3. 5. Modelo estadístico, "mediciones repetidas".....	36
Tabla 4. 1. Resultados de la caracterización de la FORSU.	38
Tabla 4. 2. Resultados de humedad a lo largo del proceso de composteo.....	45
Tabla 4. 3. Resultados del IC promedio de las películas de polietileno en el proceso de compostaje.	52
Tabla 4. 4. Resultados de la cuantificación del metal cobalto a lo largo del proceso de compostaje.	63
Tabla 4. 5. Comparativa entre el control y la muestra.....	65



RESUMEN

En México existe la problemática ambiental con respecto a la disposición de los residuos plásticos, en específico el de las bolsas. Este tema es de alto interés debido a éstas son consumidas por las poblaciones de forma indiscriminada, las cuales después de ser usadas por tiempos muy cortos van a ser desechadas, en el mejor de los casos a un cesto de basura, para luego ser depositadas en rellenos sanitarios o en tiraderos sin control ocasionando la contaminación del suelo, aire y agua. Debido a lo anterior se ha implementado el uso de bolsas con tecnología oxobiodegradable, a las cuales en el proceso de manufactura se les adicionan un aditivo. Este aditivo es parte de los llamados “aditivos prooxidantes”, los cuales contienen sales metálicas que rompen las largas y resistentes cadenas de polietileno de baja densidad facilitando su degradación para que los microorganismos posteriormente puedan biodegradarla, reincorporando elementos al suelo, como carbono e hidrógeno en un tiempo aproximado de 24 a 36 meses, en lugar de los 150 a 450 años (INE, 2009) que tardan las bolsas convencionales.

El presente trabajo tuvo como objetivo llevar a cabo el estudio e identificación del proceso de degradación que sigue la película de polietileno de baja densidad debido al aditivo prooxidante, estearato de cobalto, en el proceso de compostaje.

El trabajo se realizó en dos etapas, la primera fue la preparación de la muestra de composta; trituración y caracterización, y selección de los lotes de película plástica con y sin aditivo de cobalto. La segunda consistió en el proceso de composteo, donde se utilizaron 5 reactores con volumen de 19 litros a los cuales se les agregó, a cada uno 10 kg de residuos sólidos orgánicos. A tres de ellos se les agregó muestra de película con aditivo y a los dos restantes, uno se le adicionó película sin aditivo y al último solamente contuvo residuos orgánicos. El tiempo de experimentación fue de 90 días y se monitorearon diariamente.

Se determinó la degradación de la película plástica en el proceso de compostaje mediante el índice de carbonilo (IC) y micrografía, utilizando las técnicas de Espectroscopia de Infrarrojo y Microscopía Electrónica de Barrido respectivamente. La cuantificación del Co, se realizó mediante la técnica analítica de espectroscopía de absorción atómica.

Los resultados obtenidos indican que la mezcla de FORSU utilizada fue la adecuada, ya que se obtuvo un buen proceso de compostaje y composta. Por otra parte la película plástica que contenía el aditivo de cobalto fue la que presentó oxidación en su estructura, ésta se obtuvo al determinar el IC. Éste mostró un valor máximo de 1.3, el cual es bueno según Montoya *et al.*, 2010. Ellos reportan que un IC arriba de 1 unidad es un valor considerable de degradación, en el cual, entre más grande es el valor del IC mayor es la oxidación de la película plástica y mayor es el rompimiento de la misma por el proceso de degradación.



1. INTRODUCCIÓN

Uno de los grandes problemas que existen hoy y que afectan a las grandes ciudades, como en la Ciudad de México, es el manejo de la gran cantidad de bolsas de plástico que son desechadas en rellenos sanitarios o en tiraderos sin control, como consecuencia de las actividades humanas, las cuales forman parte de los llamados residuos sólidos urbanos (RSU). En el año 2011, en México se generaron alrededor de 41 millones de toneladas de RSU, de las cuales se reportó una generación de residuos orgánicos del 52.4% y un 10.9% de residuos plásticos, del cual se recicla del 1 al 2% (INE, 2009). Tan sólo en México en el año 2010 se produjeron 23,230 toneladas de bolsas de plástico (INEGI, 2010), si se considera que del total de los residuos plásticos solo se recicla un bajo porcentaje, y sumado a la gran estabilidad que éstos tienen de varios cientos de años, se ha manifestado una creciente contaminación en el medio ambiente. Esto ocasiona que los rellenos sanitarios resulten afectados, ya que estos plásticos al no poder ser degradados por los microorganismos para ser reincorporados al ambiente, provocan afectaciones en el sitio, como la disminución de la tasa de degradación de la materia orgánica y la recolección del metano.

Las bolsas de plástico, pueden estar hechas de diferentes polímeros, como son: polietileno de baja densidad (PEBD), polietileno de alta densidad (PEAD), polietileno lineal o de polipropileno, los cuales son polímeros no biodegradables, con un espesor variable entre 18 y 30 micras. Estas bolsas al tener una resistencia mecánica alta y su bajo costo de producción las convierte en un magnífico artículo para transportar mercancía y de publicidad para las marcas, ya que se publicitan con ellas al tener los logos de sus marcas.



Tomando el caso del Distrito Federal, lo que respecta a la composición de sus residuos, la cual es: material orgánico (restos de comida, jardín y materiales orgánicos similares) 44%, materiales susceptibles a reciclaje 30% y otros 26% (Orta *et al.*, 2010). De los cuales se estima que los residuos plásticos representan del 10 al 12% en peso (SMA, 2008) y sabiendo que el reciclado de plástico ronda apenas del 1 al 2%, resulta de un alto interés investigar nuevos materiales y aditivos que desintegren estas bolsas de una forma ambientalmente correcta, además de fomentar un adecuado sistema de reciclado para no provocar una problemática ambiental mayor y compleja. Por otra parte es de vital importancia estudiar estos aditivos llamados “pro-oxidantes”, los cuales aceleran la degradación de las bolsas y disminuye el tiempo de permanencia a un tiempo aproximado de 18 a 24 meses (INE. 2009).

La comercialización de bolsas de polietileno con tecnología oxobiodegradable se inició en México a partir del 2008 (INE, 2009). Estas contienen aditivos pro-oxidantes los cuales están formados de sales con contenido metálico (Magagula *et al.*, 2009; Pablos, 2010). Los metales más utilizados para la fabricación del aditivo son: el Hierro, Manganeso y Cobalto. Dentro de los cuales el más eficiente para la termo-oxidación es el de Co, (Nikolic *et al.*, 2012), pero si se considera que en el D.F se producen 32 millones de bolsas diarias la cantidad de Co puede generar un problema de impacto ambiental. En el cual consiste en afectar al medio ambiente (suelo, mantos acuíferos y aire) por la actividad humana en la generación y disposición final de las bolsas plásticas con aditivo pro-degradante.

La adición de este aditivo con contenido metálico no altera el proceso de fabricación de las bolsas de PEBD, simplemente el aditivo es añadido en algún paso del proceso de manufactura. La adición de éste a las bolsas tiene como función oxidar las cadenas poliméricas para ser fragmentadas en cadenas pequeñas, con el objetivo de que posteriormente sean biológicamente degradadas por la acción microbiana. Esto ocurrirá siempre y cuando las bolsas sean sometidas a ciertas condiciones ambientales como son temperatura, humedad, radiación solar y microorganismos, facilitando así su oxidación/degradación en un menor tiempo con respecto a las bolsas de plástico convencionales.

Actualmente, en México no existe una norma que permita determinar si una bolsa es oxobiodegradable o no, tampoco existe información ni estudios relacionados a los potenciales impactos ambientales de estas nuevas bolsas y de los posibles efectos de las sales metálicas en el ambiente (SEMARNAT, 2011).



1.1. OBJETIVO

1.1.1. General

Llevar a cabo el estudio e identificación del proceso de degradación de la película de polietileno (PE) debido al aditivo pro-oxidante, estearato de cobalto, en el proceso de compostaje.

1.1.2. Particulares

- Realizar el muestreo y la caracterización de la fracción de residuos orgánicos urbanos considerando la normativa mexicana.
- Determinar las condiciones y requerimientos necesarios llevando a cabo el proceso de compostaje.
- Determinar la degradación de la película de polietileno en el proceso de compostaje mediante dos técnicas: Índice de Carbonilo, utilizando la Espectroscopia de Infrarrojo (FTIR), y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM),
- Identificar la ubicación del cobalto contenido en la película de plástico dentro del proceso de compostaje, mediante Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA).

1.1.3. Alcances y limitaciones

- ❖ Se experimentará con películas de P.E. de baja densidad, incoloras, con espesor de 3 mm con aditivo pro-oxidante, con una longitud y ancho de 10x1.5 cm, producidas por el equipo de trabajo.
- ❖ Se trabajará a nivel laboratorio con 5 composteros, con un volumen de composta de 10 kg.
- ❖ El tiempo de experimentación será de 3 meses (90 días), según lo estipulado por la ASTM D 6400-04, prueba de degradación de plásticos.



2. MARCO TEÓRICO

El desarrollo económico, la industrialización y la implantación de modelos económicos ha llevado al aumento sostenido del consumo, en los que la cultura de “usar y tirar” se ha extendido a todo tipo de bienes, afectando significativamente el volumen y la composición de los residuos producidos por las sociedades del mundo. Estos residuos son llamados Residuos Sólidos Urbanos (RSU), los cuales se definen como los residuos que se originan por las actividades domésticas y comerciales de ciudades y pueblos (SEMARNAT, 2009). Como ejemplo del aumento en el volumen de RSU, es nuestro país, México, en el cual los residuos han aumentado un 28% en el periodo comprendido entre el 1998 al 2008, pasando de 29.3 a 37.6 millones de toneladas (SEMARNAT, 2009). Este aumento en el volumen de residuos tiene como consecuencia una afectación en el ambiente ya que no se tiene la infraestructura suficiente para poder manejar esta enorme cantidad de residuos y por otro lado la inadecuada disposición de éstos conlleva a la afectación del ambiente y consecuencias negativas en la salud humana y en los ecosistemas naturales.

2.1. Composición de los residuos sólidos urbanos

Los RSU son todos los residuos generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en las actividades domésticas, de los productos que se consumen y de los envases, embalajes o empaques; son también los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública con características domiciliarias.



Los residuos sólidos suelen estar compuestos por (ver figura 2.1):

- Materia orgánica o FORSU (fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos): restos de la limpieza o de la preparación de alimentos.
- Papel y cartón: periódicos, revistas, publicidad, cajas y embalajes, etc.
- Plásticos: botellas, bolsas, embalajes, platos, vasos y cubiertos desechables, etc.
- Metales: latas, botes, etc.
- Vidrio
- Otros.

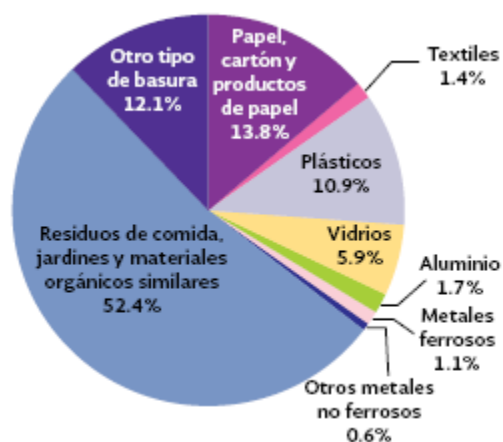


Figura 2. 1. Composición de los RSU en México, 2011. (Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en zonas Urbano-Marginadas. Sedesol México 2012).

2.2. Generación de residuos sólidos urbanos

Las cantidades de RSU que se generan en el mundo son muy variadas, dependiendo de varios factores como: nivel de desarrollo, condición socioeconómica y localización geográfica. En el caso de la Ciudad de México la cantidad de RSU generada por habitante por día para el año 2011 fue de 1.5 kg promedio, mientras que para los habitantes de la región Sur generaron en promedio $0.76 \text{ kg hab}^{-1} \text{ día}^{-1}$ (SEMARNAT, 2010). Por otro lado, comparando a México con los EEUU, éste reporta en promedio arriba de los $2 \text{ kg hab}^{-1} \text{ día}^{-1}$.

En la figura 2.2., se muestra el gráfico por país de la generación per cápita anual de RSU.

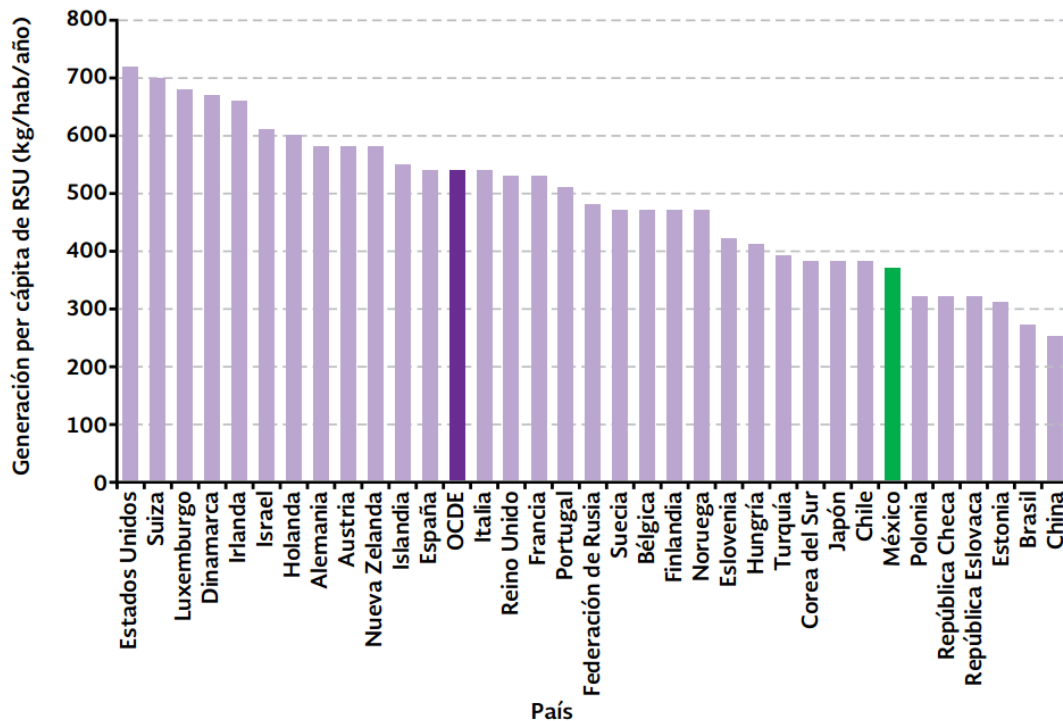


Figura 2. 2. 2010, Generación per cápita en países de la OCDE, 2013; (Economic, Environmental and Social Statistics, 2013).

Como se mencionó, dentro de los RSU se encuentra un porcentaje de residuos plásticos, como las bolsas de plástico, en las cuales se empaquetan, guardan y cargan artículos que se compran en los centros comerciales y comercios. Estas bolsas están hechas de polietileno (PE), el cual es un polímero que se obtiene por polimerización del monómero del etileno ($-CH_2=CH_2-$), formando cadenas repetitivas de etilenos, las cuales se representan en la Figura 2.3. Esta unión le brinda ciertas cualidades únicas, como son: gran estabilidad, flexibilidad, resistencia térmica y química. Es un plástico inerte, de los más comunes debido a su fácil producción y su bajo costo, lo que ocasiona que su producción sea rentable. En el 2009 se reportó una producción mundial de aproximadamente 60 millones de toneladas anuales (INE, 2009).

El PE es un sólido ceroso, del 50 al 60% cristalino, con un punto de fusión aproximado de $115\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una densidad aproximada de 0.9205g/cm^3 . Sus propiedades se encuentran entre las de los materiales rígidos, como el poliestireno, y las de los polímeros flexibles, como el PVC plastificado. Mecánicamente es débil pero es flexible, es resistente y se procesa con facilidad (Harold, 1995).

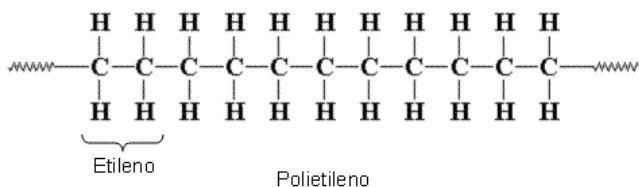


Figura 2. 3. Estructura del polietileno.

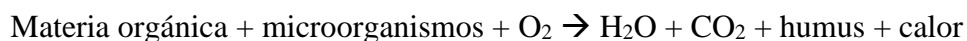
2.3. Compostaje

Dentro de las tecnologías existentes para el tratamiento de los RSU se encuentra el compostaje, que presenta ventajas como:

- Cierre del ciclo de la materia orgánica.
- Recuperación y reciclaje de nutrientes.
- Reducción de la cantidad de residuos sólidos urbanos destinados a rellenos sanitarios e incineración, evitando así problemas de contaminación de suelos y mantos acuíferos por lixiviados, además de la prevención de emisiones de gases de descomposición de los residuos en los rellenos al ambiente.
- El compost es un producto de alto contenido nutritivo, protector contra la erosión y es un mejorador de suelo ya que es un fertilizante natural.

El compostaje es un proceso de descomposición biológica aerobia microbacteriana del material orgánico, el cual se estabiliza en una sustancia rica en nutrientes que se puede utilizar como mejorador de suelos llamado humus. Este proceso se lleva a cabo por microorganismos como bacterias y hongos, los cuales al tener alimento suficiente (materia orgánica), agua, oxígeno, además de las condiciones óptimas de temperatura, humedad, aireación, pH y la relación adecuada de carbono/nitrógeno (C/N 20 a 30/1) para mantener una actividad biológica óptima (Rivas et al, 2010). Este proceso de descomposición debe pasar por dos fases, la mesofílica y la termofílica para dar como producto final CO₂, agua, materia orgánica estabilizada (composta o humus) y calor (ASTM D 6400-04).

De acuerdo a la siguiente reacción:





Los principales tipos de residuos que pueden utilizarse para producir composta son los residuos de jardines y parques, residuos alimenticios, madera, lodos de drenaje y estiércol (Eder, 2006).

Las aplicaciones que tiene la composta dependen de su calidad. Cuando ésta tiene un color café oscuro no presenta mal olor y tiene una textura de tierra mojada, se dice que la composta es de alta calidad (OPS, 1999) y se puede utilizar en agricultura, horticultura, reacondicionamiento de suelos y jardinería; cuando la composta tiene todas las características de alta calidad excepto el olor se dice que es de mediana calidad y se utiliza para el control de la erosión y prevención de derrumbes; cuando la composta no presenta buen color ni olor y además tiene restos de materia orgánica sin estabilizar, se dice que es de baja calidad y se puede utilizar como recubrimiento de rellenos sanitarios o en programas de recuperación de suelos.

Existen diferentes métodos para realizar un proceso de compostaje, de los cuales dos son los típicos; el de contenedor y el de pila. En el método de contenedor, la materia orgánica se descompone dentro de un barril, reactor o alguna otra estructura rígida. Estos contenedores están equipados con sistemas de control que monitorean la evolución del proceso biológico incluyendo las variables de temperatura, concentración de O_2 y/o CO_2 . Las variables del proceso son continuamente monitoreadas y controladas, y el material es aireado mecánicamente. El método de pila involucra el arreglo de los materiales a compostear en una pila o montículo que es aireado mediante algún dispositivo artificial o mecánico.

2.3.1. Etapas del proceso

La degradación de la materia orgánica en un proceso de composta se lleva a cabo en tres fases: mesofílica, termofílica y maduración. La fase mesofílica se inicia al comienzo del proceso de compostaje, bacterias y hongos mesofílicos degradan los compuestos orgánicos fácilmente degradables y solubles como son monosacáridos, almidón y lípidos. Las bacterias producen ácidos orgánicos, lo que produce una disminución en el pH entre 5 - 5.5 (FAO, 2012). La temperatura comienza a aumentar espontáneamente debido al calor liberado por las reacciones exotérmicas de degradación. La degradación de proteínas provoca la liberación de amoníaco, el cual ocasiona un aumento en el pH entre 8 a 9. Esta fase ocurre a una temperatura menor a los 45 ° C y el tiempo de duración de ésta puede variar de unas horas a varios días (ASTM D 6400-04).

La fase termofílica comienza cuando la temperatura llega a los 45 °C. La degradación de la materia orgánica aumenta debido a la proliferación de bacterias y hongos termofílicos. Disminuye su actividad si la temperatura sobrepasa los 60 °C. Esta fase puede durar desde



unos días hasta varios meses. Después de que se consumen las fuentes de carbono fácilmente degradables, la composta comienza a enfriarse, cuando llega a una temperatura estable se dice que la composta se encuentra estabilizada. En ese momento aparecen bacterias y hongos mesofílicos diferentes a los de la primera etapa y comienza la etapa de maduración. Los procesos biológicos se desarrollan lentamente y la materia presente continúa transformándose hasta llegar a la madurez. La duración de esta etapa depende de la composición de la materia orgánica y de la eficiencia del proceso (Tuomela, 2002).

Los microorganismos que se presentan en las diferentes etapas del proceso de compostaje son muy variados. La descomposición inicial se lleva a cabo por microorganismos mesofílicos que rápidamente rompen los compuestos solubles y fácilmente degradables; el calor que produce esta actividad causa un incremento en la temperatura de la composta y conforme ésta aumenta, la actividad microbiana va disminuyendo, hasta el punto en el que la temperatura es excesiva para su supervivencia (alrededor de 45°C). En estos momentos, las bacterias termofílicas comienzan a activarse, las bacterias que predominan en estas condiciones pertenecen al género *Bacillus*. A una temperatura igual o mayor a 55°C, muchos microorganismos que son patógenos a plantas y humanos son destruidos. A temperaturas de 65°C o mayores la mayoría de los microorganismos mueren. De esta manera se limita la velocidad de descomposición y para evitar este efecto, se recurre a la aeración y al mezclado para mantener la temperatura debajo de este punto.

2.3.2. Parámetros involucrados en el proceso

Los parámetros más importantes de un proceso de compostaje son el pH, contenido de humedad, temperatura y oxígeno, el cual está regulado por la aireación y los espacios libres; relación C/N, tamaño de partícula, rigidez, cantidad y naturaleza de los nutrientes.

El carbono y nitrógeno son dos de los elementos más importantes en el proceso de compostaje. El primero sirve como fuente de energía para los microorganismos heterótrofos, además de que una pequeña fracción se incorpora a su estructura celular y el segundo es un elemento constituyente de las proteínas, las cuales constituyen el 50% en peso seco de la masa celular. Si no hay suficiente nitrógeno, la población bacteriana será pequeña y por lo tanto el proceso de descomposición será más lento. La relación de C/N recomendado para el compostaje de residuos sólidos urbanos oscila entre 25:1 y 40:1 en peso. Esta relación por lo general debe ser acondicionada para satisfacer diferentes actividades biológicas (OPS, 1999).

Las condiciones de humedad óptimas requieren de un balance entre la actividad microbiana y la reserva de oxígeno. La humedad es esencial para el proceso de descomposición ya que la mayoría de los procesos de descomposición se llevan a cabo en capas delgadas de líquido



en la superficie de las partículas. La humedad en exceso produce el llenado de los poros entre partículas, lo que limita el transporte de oxígeno. Para una rápida descomposición de residuos sólidos urbanos se recomienda una humedad mínima entre 50 y 55%. El calor y la aireación evaporan una cantidad significativa del agua, de tal manera que durante la fase activa del composteo usualmente se debe añadir agua para prevenir un secado prematuro y una incompleta estabilización. La composta de residuos sólidos urbanos, usualmente comienza con 52% de humedad y se reduce hasta un 37% en la etapa de estabilización.

Los parámetros de temperatura y oxígeno varían dependiendo de la respuesta a la actividad microbiana, la cual consume oxígeno y generan calor, el cual es medido por medio de la temperatura. Estos dos parámetros pueden ser controlados por medio de la aeración, en la cual se suministra oxígeno y se disipa el calor introduciendo al sistema aire. Este proceso es de suma importancia ya que inadecuados niveles de oxígeno, bajos o nulos, provocan el crecimiento de microorganismos no deseados como son los anaerobios, los cuales producir compuestos de fermentación de mal olor. Por lo que la concentración de oxígeno debe de estar por lo menos entre 12 y 14% y se esperaría de forma ideal una concentración entre 16 y 17 % para permitir una adecuada difusión (OPS, 1999).

La mayoría de los sistemas de compostaje de residuos sólidos urbanos utilizan un sistema de aireación forzada con sopladores y sistemas de distribución para suministrar oxígeno y controlar la temperatura durante el proceso de compostaje. Con respecto a la temperatura, los valores más adecuados para llevar a cabo la tasa de degradación de residuos más alta son entre los 45 y 60°C. Mientras que valores mayores o menores de temperatura producen una disminución en la tasa de consumo de residuos.

Dentro del rango de temperatura conveniente para la degradación de los residuos, éste abarca al intervalo (55 – 60 °C), en el cual los patógenos son eliminados para no generar problemas de salud, estas temperaturas se necesitan mantener varios días para asegurarnos la eliminación de dichos agentes. Por lo que los sistemas de composta controlada tratan de mantener el rango de temperaturas entre 55 a 60°C para obtener un equilibrio entre velocidad de degradación, reducción de patógenos y condiciones anaeróbicas.

La calidad de la composta se refiere al estado global de ésta con respecto a sus características físicas, químicas y biológicas. Los parámetros para evaluarla incluyen la distribución del tamaño de partícula, contenido de materia orgánica y carbono, concentración y composición de sustancias húmicas, contenido de nitrógeno, fósforo y potasio, contenido de metales, salinidad y naturaleza de los iones responsables, capacidad de intercambio catiónico, capacidad de retención de agua, porosidad y densidad, contaminantes inertes, patógenos y estabilidad. La estabilidad de una composta se refiere a la resistencia de la materia orgánica



a la degradación y puede ser medida directamente por pruebas respirométricas. La madurez se relaciona con su potencial para permitir el crecimiento de plantas, y se evalúa mediante pruebas de fitotoxicidad (Rudnik, 2008).

Por otra parte, la producción de plásticos ha crecido exponencialmente, al tiempo que ha aumentado la preocupación por el medio ambiente. Según los expertos, los residuos plásticos generados por el hombre tardan una media de 100 años en descomponerse. Por eso la razón de realizar una investigación con el objetivo de experimentar con los plásticos con aditivo pro-oxidante en el proceso de composteo y poder determinar su degradación.

2.4. Polímeros degradables

Hoy en día los polímeros son ampliamente utilizados para cubrir las necesidades de la sociedad moderna debido a su excelente resistencia y a su bajo costo de producción. Las aplicaciones de estos materiales van desde el embalaje y la construcción, hasta aplicaciones biomédicas y espaciales, jugando un rol importante en el mejoramiento de la calidad de vida (Rudnik, 2008). El desarrollo económico y el crecimiento poblacional ocasionan el aumento en el consumo de productos plásticos, debido a su bajo costo de producción y a su resistencia, por lo que el crecimiento de volumen de los residuos plásticos va en aumento. Este aumento sumado a su alta resistencia a la degradación, está provocando un desequilibrio en el medio ambiente, lo que conlleva a la contaminación de éste. Para solucionarlo, se han realizado acciones y estrategias, en todo el mundo, para minimizar el impacto de este desequilibrio. Estableciendo como objetivos; la prevención de la generación de residuos, el reciclaje y la rápida asimilación natural durante su estancia en los sitios de disposición final (Ewa, 2008, Rudnik, 2008). El término de “asimilación natural”, se refiere a la degradación de los polímeros en tiempos cortos, mediante condiciones ambientales abióticas (luz, calor, humedad, pH, etc.) y bióticas (microorganismos).

Dentro de la familia de los polímeros existen actualmente polímeros degradables, los cuales son fabricados especialmente para permitir que una vez terminada su vida útil comiencen su rápida descomposición y asimilación en el medio ambiente siempre y cuando se cumplan ciertas condiciones ambientales, como son: temperatura, luz, humedad y microorganismos.

2.4.1. Tipos de polímeros

Hasta el momento se conocen dos tipos de polímeros degradables; los naturales y los sintéticos. Los polímeros naturales, o también llamados biopolímeros, son los que se obtienen a partir de microorganismos o plantas genéticamente diseñadas para producirlos. Este tipo de polímeros son poliésteres como los polihidroxialcanoatos (PHA), polilactidas, policaprolactonas, poliésteres alifáticos, polisacáridos y copolímeros o mezclas de estos. Por



otro lado, los polímeros sintéticos son mezclas de polímeros convencionales con aditivos que promueven la degradación. Estos aditivos pueden ser orgánicos como el almidón, o inorgánicos, llamados aditivos pro-oxidantes, los cuales provenientes de sales metálicas (Aamer *et al.*, 2008).

Para el caso de utilizar un aditivo orgánico como el almidón, el cual es utilizado por los microorganismos para su crecimiento, su trabajo es fragmentar las cadenas de polímeros en pequeños componentes de bajo peso molecular, los cuales pueden ser asimilados fácilmente por los microorganismos (Rudnik, 2008). Para el caso de los aditivos pro-oxidantes, su función es muy parecida a los orgánicos, pero éstos realizan su trabajo mediante oxidación de la matriz polimérica, por medio de reacciones químicas llamadas mecanismos de reacción por radicales libres, los cuales rompen la cadena de polímero formando productos de bajo peso molecular, facilitando el consumo por los microorganismos.

Los polímeros con aditivos pro-oxidantes están diseñados para degradarse con rapidez por medio de la oxidación que se lleva a cabo en presencia de aire, lo cual causa el rompimiento de las largas cadenas de polímeros en fragmentos de bajo peso, que son bioasimilados por los microorganismos (Ammala *et al.*, 2011). La formación de estos polímeros de alto peso molecular, provienen de la polimerización de olefinas, también llamadas alquenos, las cuales mediante reacciones de adición se van formando la cadena de monómeros insaturados, los cuales dan lugar a las poliolefinas, o polialquenos, como el polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés), polietileno de baja densidad (LDPE, por sus siglas en inglés), polietileno lineal de baja densidad (LLDPE, por sus siglas en inglés) y el polipropileno (PP). Las poliolefinas son los polímeros más producidos y consumidos en la actualidad (Telmo *et al.*, 2011).

2.4.2. Degradación de polímeros

La degradación de polímeros se lleva a cabo por procesos físicos y químicos, que resultan de factores ambientales como luz, calor, humedad, condiciones químicas o actividad biológica. Estos procesos inducen cambios en las propiedades funcionales de los polímeros provocando el rompimiento de enlaces y transformaciones químicas. La degradación se observa en cambios en las propiedades mecánicas, ópticas o eléctricas, en la formación de grietas, decoloración, etc. Estos cambios incluyen el rompimiento de la cadena polimérica y la formación de nuevos grupos funcionales. Por tanto, cuando la degradación se origina por energía térmica se le denomina termodegradación; si es por energía de radiación ultravioleta se le denomina fotodegradación; y si es por acción de los microorganismos se le denomina biodegradación, la cual tiene que ver con la oxo-biodegradación (Pospisil, 1997).



2.4.2.1. Termodegradación

La degradación de los polímeros, por medio de temperatura, es un proceso de deterioro molecular que resulta del calentamiento a altas temperaturas, donde los componentes de la cadena polimérica comienzan a separarse y a reaccionar entre sí. Estas reacciones químicas que se producen provocan cambios tanto físicos como químicos de las propiedades originales. La degradación térmica generalmente provoca cambios en el peso molecular, reducción de la ductilidad, fragilidad, cambios en el color y fracturas (Olayan, 1996).

2.4.2.2. Fotodegradación

La Fotodegradación se debe a la tendencia natural de la mayoría de los polímeros a reaccionar gradualmente con el oxígeno atmosférico en presencia de luz. Para lograr este efecto se emplean agentes sensibles a la luz para acelerar esta tendencia natural. El mecanismo de fotodegradación involucra la absorción de luz ultravioleta que provoca la generación de radicales libres, que promueven un proceso de auto-oxidación que conlleva al rompimiento eventual de la cadena polimérica (Ammala, 2011).

2.4.2.3. Biodegradación

La biodegradación es el proceso en el cual sustancias orgánicas son transformadas por microorganismos. Los materiales orgánicos pueden ser degradados aeróbicamente (presencia de oxígeno), o anaeróbicamente (sin oxígeno). Los polímeros son biodegradados aeróbicamente en el suelo y en composta, anaeróbicamente en rellenos sanitarios y sedimentos. Pero también puede realizarse en condiciones de degradación mixtas (aerobio-anaerobio). Durante la biodegradación aeróbica se produce CO_2 y agua, mientras que en la biodegradación anaeróbica se produce CH_4 , CO_2 y agua. La degradación de polímeros requiere de la participación de diferentes organismos por cada etapa; uno rompe el polímero en sus monómeros constituyentes, otro consume los monómeros y excreta compuestos más simples y, finalmente, otro utiliza los subproductos excretados para producir biomasa (Aamer, 2008).

La mayoría de los productos de oxidación biológica son de bajo peso molecular y son utilizados para el crecimiento microbiano. Se encuentra reportado que para alcanzar niveles aceptables de biodegradación en un periodo razonable de tiempo, el peso molecular promedio de los productos de oxidación debe ser menor a 5000Da (Ammala, 2011), los cuales son degradados por los microorganismos para formar dióxido de carbono y agua como productos finales.



2.4.2.4. Oxo-biodegradación

El término oxo-biodegradación se utiliza para describir el proceso de degradación de polímeros en dos etapas. La primera etapa, llamada abiótica la cual involucra la reacción del oxígeno del aire con el polímero. La cadena polimérica es oxidada, por termo-oxidación o foto-oxidación, lo que produce fragmentos moleculares de bajo peso molecular. La incorporación de oxígeno a la cadena polimérica resulta en la formación de grupos funcionales como ácidos carboxílicos y ésteres, así como aldehídos y alcoholes. Además los polímeros cambian su comportamiento de hidrofóbico a hidrofílico para permitir a los fragmentos producidos absorber agua. La etapa abiótica determina la velocidad de todo el proceso. La segunda etapa es la biodegradación de los productos de oxidación por microorganismos (bacterias, hongos y algas) que consumen los fragmentos oxidados de la cadena polimérica para formar CO₂, H₂O y biomasa.

2.5. Aditivos pro-oxidantes

Los aditivos prooxidantes son sustancias químicas que aceleran el proceso de degradación de un plástico junto con el oxígeno a ciertas condiciones de humedad, radiación solar y temperatura. Su utilidad radica en su habilidad de catalizar la descomposición de hidroperóxidos en radicales libres.

Los aditivos pro-oxidantes más utilizados son los iones de metales de transición, aunque también se utilizan materiales no metálicos. Los metales de transición más utilizados incluyen al Hierro (Fe), Cobalto (Co) y Manganeseo (Mn). El hierro es sensible a la fotodegradación, mientras que el manganeso y el cobalto son sensibles a la degradación térmica (termooxidación). Estos iones metálicos son introducidos en cantidades muy bajas, en la forma de sales metálicas, como: ácidos grasos esteáricos, amidas, ditiocarbamatos, ferroceno, óxidos metálicos y carboxilados. Las marcas de aditivos pro-oxidantes más utilizadas actualmente son: aditivo polimérico totalmente degradable, (TDPA, por sus siglas en inglés), Renatura, Reverte, AddiFlex, d₂W y Scott-Gilead technology (Ammala *et al.*, 2011).

El TDPA contiene poliolefinas las cuales son degradables por la acción de luz solar y son composteables. Este aditivo se puede incorporar en las diferentes poliolefinas: HDPE, LDPE, LLDPE y sus combinaciones; polipropileno y poliestireno. La cantidad de aditivo pro-oxidante, el cual está compuesto en una parte por estearatos de metales tales como: Fe, Co y Ce, así como ácido cítrico (Ammala *et al.*, 2011). Se adiciona, según lo reportado en 2 y 3% en peso, y reportan un periodo de degradación entre 20-36 meses, siempre y cuando el material esté dispuesto en un medio con las condiciones de temperatura, luz y humedad apropiadas.



La empresa Renatura utiliza un porcentaje de aditivo de 2% en peso de una mezcla entre estearato de hierro, más un antioxidante y absorbedores de radiación UV. Además, utiliza un aditivo constituido por un fotoinhibidor más un ion pro-oxidante y aditivos orgánicos, los cuales promueven la degradación por microorganismos. El aditivo de la marca AddiFlex promueve la degradación térmica y trabaja en conjunto con carbonato de calcio (CaCO_3). Tiene la habilidad de aumentar la degradación por efecto de rayos UV hasta en un 66%, con la ventaja de utilizar menor cantidad de aditivo. La empresa asegura que este aditivo es biodegradable y es finalmente transformado a CO_2 , agua y biomasa. Su composición incluye carboxilados de Fe, Mn, Cu, Co y Ni, además de almidón y CaCO_3 (Ammala *et al.*, 2011).

El aditivo d₂W se degrada abióticamente en presencia de oxígeno, se añade en cantidades entre 1y 3% en peso. Contiene sales metálicas de manganeso y estabilizantes en diferentes proporciones para producir diferentes tiempos de estabilidad (Ammala *et al.*, 2011).

El aditivo Scott-Gilead contiene ditiocarbamato el cual reacciona con sales metálicas de Fe, Cu, Co y Ni formando complejos. Este aditivo metálico funciona como antioxidante durante el proceso de manufactura y almacenamiento; pero sí éste es expuesto, en su disposición final, a radiación UV, se comporta como un foto y termo oxidante (Ammala, 2011).

2.5.1. Aditivo pro-oxidante de cobalto

Según la literatura el término de metal pesado denomina a un grupo de elementos no bien definidos que presentan propiedades muy similares. Los elementos representantes son los de transición, algunos semi-metales, lantánidos y actínidos. Muchas definiciones diferentes han propuesto basarse en la densidad, Thornton, 1995, otras en el número atómico o peso atómico (Chang, 1999; Stevenson, 1991; Phipps, 1981), y algunas otras en sus propiedades químicas o de toxicidad (Duffus, 2002; Scott, 1981). El término *metal pesado* es considerado como una "mala denominación" en un informe técnico de la IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*), debido a su definición contradictoria y su falta de "bases de coherencia científica". Existe un término alternativo *metal tóxico*, para el cual tampoco existe consenso de su exacta definición. Por tanto, no existe un consenso sobre la definición de metal pesado. Por lo cual se debe crear una clasificación basada en principios científicos que consideren su especiación química, selectividad biológica, desempeño funcional y toxicidad (Duffus, 2002).

Si se enfoca en el aspecto de la toxicidad, existe la posibilidad de que por las concentraciones de Co que se acumulen en el suelo presente un serio problema ambiental por contaminación de suelos. En la actualidad, existen fuentes antropogénicas de metales pesados, por ejemplo



la contaminación derivada de la basura (no orgánica), la cual generalmente aportan estos metales. Las motivaciones para controlar las concentraciones de metales pesados son diversas. Dentro de la Comunidad Europea los once elementos más importantes para su control son el arsénico, cadmio, cobalto, cromo, cobre, mercurio, manganeso, níquel, plomo, estaño y talio (Duffus, 2002; Thornton, 1995).

Debido a que las bolsas oxobiodegradables utilizan aditivos pro-oxidantes para su degradación y éstos están compuestos por metales pesados como el cobalto (Co) el cual es un metal con número atómico de 27 y un peso atómico de 58.93. Se encuentra distribuido con amplitud en la naturaleza y forma aproximadamente el 0.001% del total de las rocas ígneas de la corteza terrestre. Los minerales de cobalto importantes en el comercio son los arseniuros, óxidos y sulfuros (Lenntech, 2014).

El cobalto presenta valencias variables y forma iones complejos y compuestos coloreados, como hacen todos los compuestos de transición. Las sales más comunes de éste son derivados del cobalto (II); el estado de valencia mayor sólo se encuentra formando compuestos de coordinación. Los compuestos de cobalto tienen gran variedad de aplicaciones industriales, incluso se usan como catalizadores, y en agricultura para remediar la deficiencia de cobalto en el suelo y en la vegetación natural (Lenntech, 2014).

El Co se encuentre en el ambiente y puede reaccionar con otras partículas o ser absorbido por las partículas del suelo o el agua. Éste se mueve sólo bajo condiciones ácidas, pero al final la mayoría de él terminará en el suelo y sedimentos.

2.6. Métodos analíticos para la identificación y cuantificación del Co y la degradación de la película de polietileno

Los métodos analíticos reportados para la cuantificación del metal Co y para la identificación de la degradación de la película de polietileno en la composta son, para el primero por Espectroscopia de Absorción Atómica y el segundo por espectrometría de Infrarrojo de Transformadas de Fourier.

2.6.1. Espectroscopía de Absorción Atómica (EAA)

La EAA es una técnica para determinar la concentración de un elemento, llamado analito, en una muestra y se basa en gran medida en la ley de Beer-Lambert.

En resumen de la técnica, los electrones de los átomos en el atomizador pueden ser promovidos a orbitales más altos por un instante mediante la absorción de una cantidad de energía (es decir, luz de una determinada longitud de onda). Esta cantidad de energía (o



longitud de onda) se refiere específicamente a una transición de electrones en un elemento particular, y en general, cada longitud de onda corresponde a un solo elemento. Como la cantidad de energía que se pone en la llama es conocida, y la cantidad restante en el otro lado (el detector) se puede medir, es posible, a partir de la ley de Beer-Lambert, calcular cuántas de estas transiciones tienen lugar, y así obtener una señal que es proporcional a la concentración del elemento que se mide. (Skoog, 2004).

2.6.2. Espectroscopía de Infrarrojo de Transformadas de Fourier (FTIR)

La espectroscopía de infrarrojos de Transformadas de Fourier (FTIR), por sus siglas en inglés es un tipo de espectrometría de absorción que utiliza la región infrarroja del espectro electromagnético. Como las demás técnicas espectroscópicas, puede ser utilizada para identificar un compuesto o investigar la composición de éste en una muestra. Se basa en el hecho de que los enlaces químicos de las sustancias tienen frecuencias de vibración específicas, que corresponden a los niveles de energía de la molécula. Estas frecuencias dependen de la forma de la superficie de energía potencial de la molécula, la geometría molecular, las masas atómicas y, posiblemente, el acoplamiento vibracional (Skoog, 2004).



3. METODOLOGÍA

En este capítulo se describe la selección del sitio de muestreo y ubicación, el muestreo, los materiales y equipos utilizados, así como los métodos analíticos aplicados y las condiciones establecidas para llevar a cabo la experimentación y dar cumplimiento a los objetivos de estudio propuestos.

- El sitio de muestreo es la Planta de Composta de Bordo Poniente (ver fig. 3.1), la cual se ubica al oriente de la Ciudad de México y se localiza al noreste del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México y al suroeste del ex Lago de Texcoco, sus coordenadas geográficas son $19^{\circ} 21'30''$ latitud norte y $99^{\circ} 15'45''$ longitud oeste, con una altitud de 2,250 m.s.n.m. (SOBSE, 2004).



Figura 3.1. Sitio de muestreo, Bordo Poniente.



La metodología se realizó en dos etapas, las cuales son:

1. Preparación de la muestra de composta: trituración, caracterización y selección de los lotes de película de polietileno con y sin aditivo de cobalto.
2. Proceso de composteo en 5 reactores con FORSU (fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos), de los cuales uno será el blanco, otro será el control, el cual contendrá película de P.E. sin aditivo y 3 contendrán película de P.E. con el aditivo de cobalto. El tiempo de experimentación será 90 días. Se monitorearán los composteros diariamente durante todo el tiempo de experimentación.

A continuación se ilustra el proceso seguido en la metodología, (figura 3.2 y 3.3).

Paso 1)

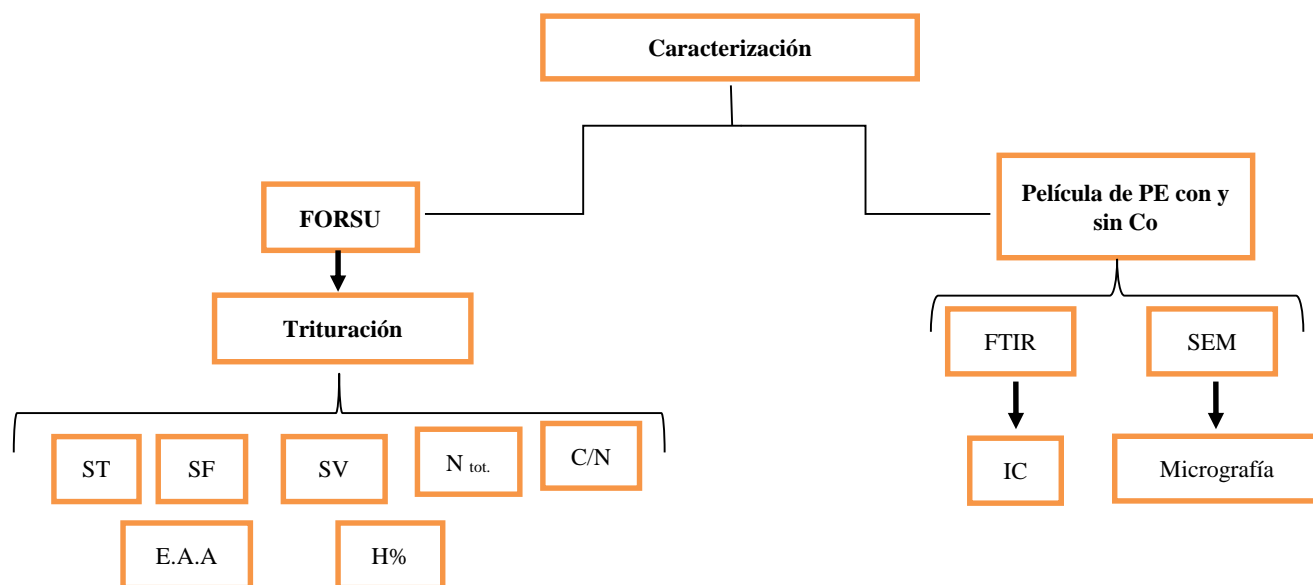


Figura 3. 2. Diagrama general de la metodología.



Paso 2)

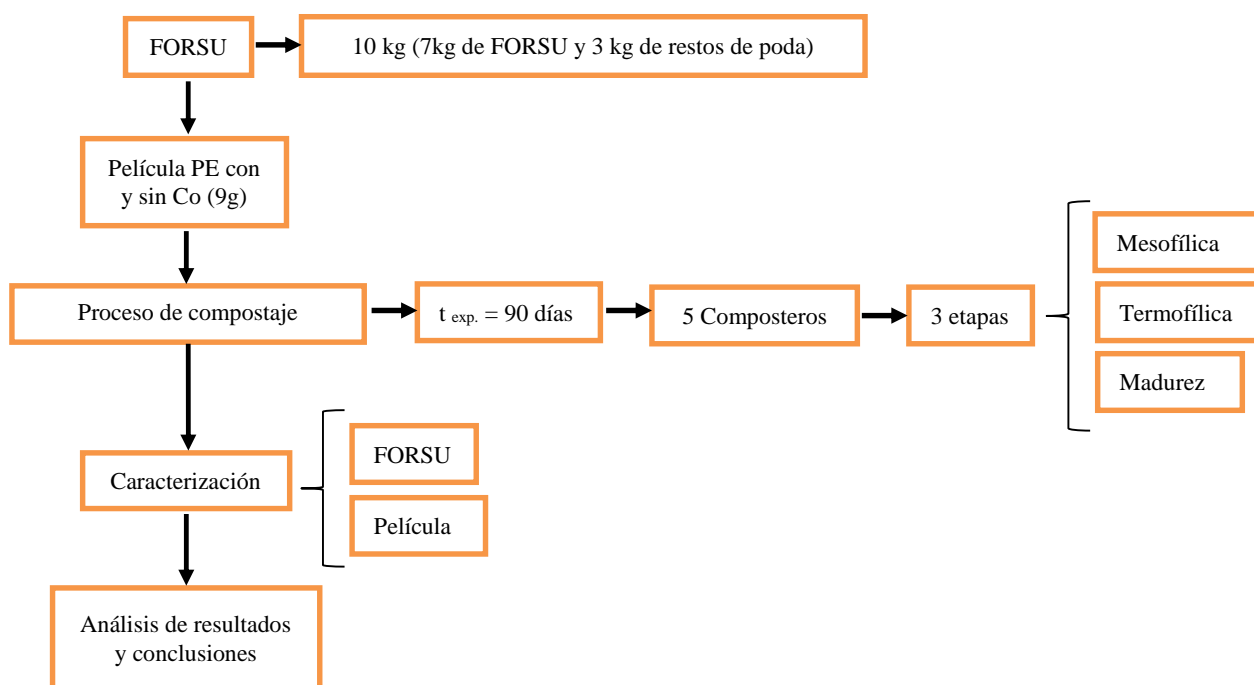


Figura 3.3. Diagrama general de la metodología.

3.1. Preparación y caracterización de la muestra de FORSU para el proceso de compostaje

La FORSU con la que se trabajó, fue obtenida de un muestreo en la estación de transferencia de Bordo Poniente (ver figura 3.4), y los restos de poda fueron tomados de la Planta de Composta de Ciudad Universitaria, UNAM. Estas muestras se homogenizaron mediante el método de cuarteo dado en la norma mexicana NMX-AA-015-1985. Protección al ambiente - contaminación del suelo – residuos sólidos municipales – muestreo – método de cuarteo, posteriormente se trituró para reducir de tamaño y tener un mejor manejo de ésta en los composteros. La cantidad de muestra que se tomó fue de 51 kg, para el caso de la FORSU y en el caso de los restos de poda se tomaron 16 kg. En seguida se detalla cada etapa experimental.



Figura 3. 4. Fotografía del sitio de muestreo y de la FORSU.

La FORSU fue utilizada como material para compostaje. A ésta, se le realizó un pretratamiento mecánico para reducir el tamaño de partícula, esto tiene como objetivo tener una muestra más homogénea y así mejorar su representatividad.

El primer paso es la trituración con una trituradora industrial, marca “Bearcat”, modelo 1020, la cual cuenta con un motor de 5 hp y la alimentación de los residuos es directa. El tamaño de partícula que se obtiene del triturado es de 1 a 10 cm. Del total de la muestra, que son 51 kg, se tomó 1 kg para someterlo a un segundo proceso de trituración empleando un molino manual de dos discos para reducir el tamaño de partícula de 1 a 0.1 mm. Con esta muestra se realizó las pruebas físico-químicas para la caracterización. Para los restos de poda también se tomó 1 kg para la caracterización y no fue necesario la disminución de tamaño ya que este ya lo era (entre 5 a 8 cm). La metodología seguida se muestra en la Tabla 3.1.

Una vez realizado su acondicionamiento en tamaño, se le determinó cada uno de los parámetros necesarios para la caracterización, los cuales fueron: pH, sólidos totales (ST) los cuales están conformados por los sólidos totales fijos (SF) y sólidos totales volátiles (SV), humedad (%H), nitrógeno total (N_{tot}), relación C/N y cuantificación del cobalto (E.A.A), ver Figura 3.2.



Tabla 3. 1. Técnicas analíticas para la determinación de los parámetros en la composta.

Determinación	Método	Técnica de la determinación
pH	NMX-AA-024-1984	Medición directa con potenciómetro
Humedad	NMX-AA-016-1984	Gravimetría. Se obtiene por diferencia entre la masa inicial y los sólidos totales determinados
Sólidos Totales (STT)	APHA 2540-B	Gravimetría. Sólidos secados a una temperatura de 105°C
STF y STV	APHA 2540-E	Gravimetría. Sólidos previamente secados a 105°C e incinerados a 550°C
Relación C/N	NMX-AA-067-1985	Medición por método de Walkley-Black para el caso de Corg y el Kjeldahl para el caso del Ntot
Nitrógeno total	Kjeldahl (titulación)	Digestión ácida y posterior neutralización y titulación con H ₂ SO ₄ 0.02N (titulación por retroceso)
Metal	NXM-AA-051-SCFRI-001	Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA)

3.2. Preparación y caracterización de la película de polietileno de baja densidad

Las películas de polietileno de baja densidad (PEBD) con las que se experimentará serán tomadas de dos lotes de película plástica producidas por el equipo de trabajo. La forma de elaboración consistió en pesar los pellets de polietileno, la adición del aditivo, entre el 1 al 1% en peso, se mezcla y una vez ya homogenizado se vacía al cono de alimentación de la máquina extrusora, la cual calienta y derrite los pellets y por medio de un tornillo sin fin empuja la mezcla hacia el cabezal para formar la película plástica, ver Figura 3.5.

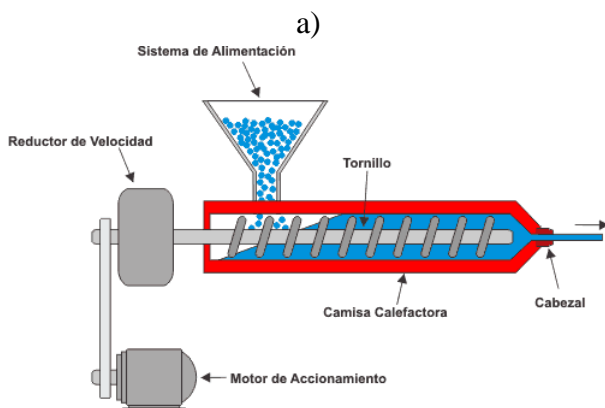
El material utilizado para la fabricación de las películas fueron pellets de PEBD del tipo PX-20020X de PEMEX, división Petroquímica. La fabricación de la película se realizó con el apoyo de la empresa PLAFUSA S.A. de C.V., la cual cuenta con un departamento de investigación y desarrollo para la fabricación de todo tipo de películas plásticas para la industria. El método de fabricación de las películas es por medio de extrusión, en el cual cuentan con una máquina extrusora con un tornillo sin fin, el cual impulsa a los pellets por el tornillo mezclando y calentando el material el cual sale por un orificio en forma de película, ya que la máquina produce películas por laminado.



a)



b)



c)



d)

Figura 3. 5. Proceso de elaboración de las películas plásticas de baja densidad, a) Pesado de los pellets, b) Adición del aditivo del 1 al 10 % en peso y mezclado, c) Adición de la mezcla a la máquina extrusora y d) Obtención de las películas.

De la fabricación de las películas se obtuvieron dos lotes, el primer lote es de película sin aditivo y el segundo lote es de película con aditivo de cobalto.

Para realizar la caracterización, se tomará una muestra de película de cada uno de los lotes antes mencionados y se les determinarán los siguientes parámetros: identificación de la estructura química por medio de la técnica analítica de espectroscopía de infrarrojo (FTIR), cuantificación del metal cobalto mediante la técnica analítica de espectroscopía de absorción atómica (EAA) y la topología superficial mediante espectroscopía electrónica de barrido (SEM).

El objetivo de llevar a cabo la caracterización, tanto de las películas como de la FORSU, es con el objetivo de contar con parámetros de inicio y así poder identificar los cambios en el proceso experimental. Para las películas se medirá la degradación por medio de análisis de FTIR, E.A.A. y SEM, mientras que para la FORSU, se medirán: la pérdida de humedad, sólidos totales, material carbonoso y E.A.A, para el Co.



A continuación se enuncian en la Tabla 3.2., las determinaciones seguidas para monitorear el proceso de identificación de la degradación de la película plástica y la cuantificación del Co.

Tabla 3. 2. Técnicas analíticas para la identificación de la degradación y la cuantificación del Co contenido en la película.

Determinación	Método	Técnica de la determinación
Grupos funcionales	Espectroscopía	Espectroscopía Infrarroja
Metal	NXM-AA-051-SCFRI-2001	Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA).
Degradación	Microscopía	Microscopía electrónica de barrido (SEM)

3.3. Diseño de los reactores

El diseño de los reactores se basó en el volumen mínimo necesario para realizar una composta, el cual es de 1 m³ (Figura 3.2). Partiendo de lo anterior se escaló a una escala de 1:100, en el cual el volumen de FORSU por reactor será de 10 L. el total de reactores utilizados fue de cinco, distribuidos de la siguiente manera: 1° testigo, 2° control negativo y los restantes son las repeticiones, ver Tabla 3.3.

Tabla 3. 3. Arreglo por tipo de compostero.

#	Muestra	Tipo	Cantidad
1	Testigo	Sólo FORSU	Sólo composta 10 kg
2	Control negativo	FORSU + sólo P.E	FORSU 10 kg + 9 g sólo P.E
3	R1	FORSU + P.E con Co	FORSU 10 kg + 9 g P.E con Co
4	R2	FORSU + P.E con Co	FORSU 10 kg + 9 g P.E con Co
5	R3	FORSU + P.E con Co	FORSU 10 kg + 9 g P.E con Co

Escalamiento de los composteros

Partiendo de lo reportado en la FOA, 2012, el volumen mínimo necesario para que se pueda realizar un buen proceso de compostaje es de 1 m³. Este volumen representa las condiciones



necesarias de temperatura y humedad para que por sí sólo se pueda llevar el proceso de degradación de la materia orgánica en el compostaje.

A partir de este volumen se calculó la escala necesaria (ver figura 3.6), para poder experimentar a escala laboratorio, fue de 1:100, lo cual representa un volumen 10 litros, los que representan en peso, considerando la densidad del agua de 1 kg/m³, de FORSU de 10 kg.

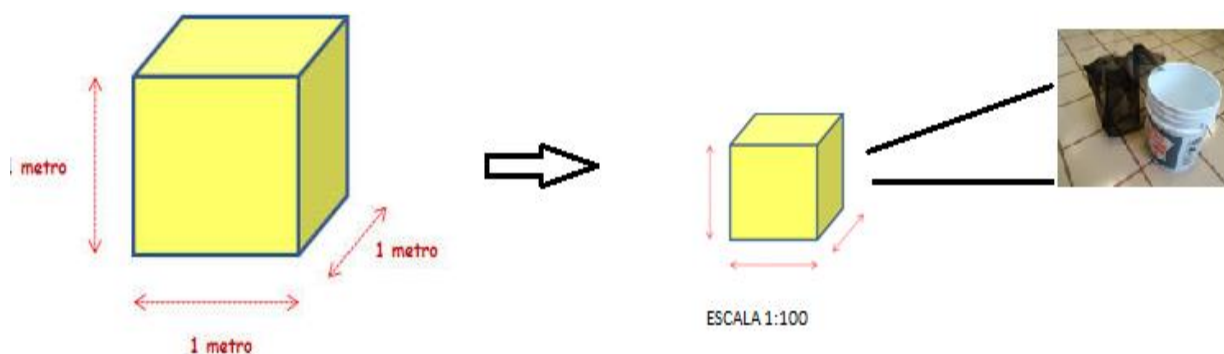
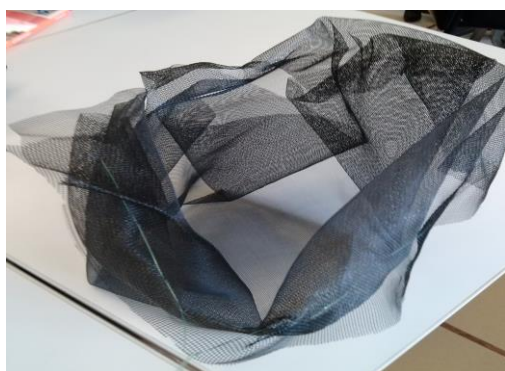


Figura 3. 6. Escalamiento de compostero.

Para poder manipular la muestra de forma segura, se diseñó una bolsa hecha de malla, la cual se pone dentro del compostero y en esta se coloca la FORSU triturada y mezclada. Esto con el propósito de facilitar el manejo de los residuos en el proceso de compostaje y también para poder darle una aireación adecuada y homogénea a cada uno de los composteros. (Ver Figura 3.7)



Malla de soporte para la FORSU



Malla montada dentro del compostero

Figura 3. 7. Diseño de la bolsa de malla de soporte de la FORSU.



3.4 Sistema para controlar la temperatura

El sistema de temperatura consiste en un controlador marca: Autonics modelo: TC3YF-34R (NTC), un relevador marca: Schneider Electric modelo: SSRPP8S24A1 y una resistencia marca Rodríguez (Figura 3.8).

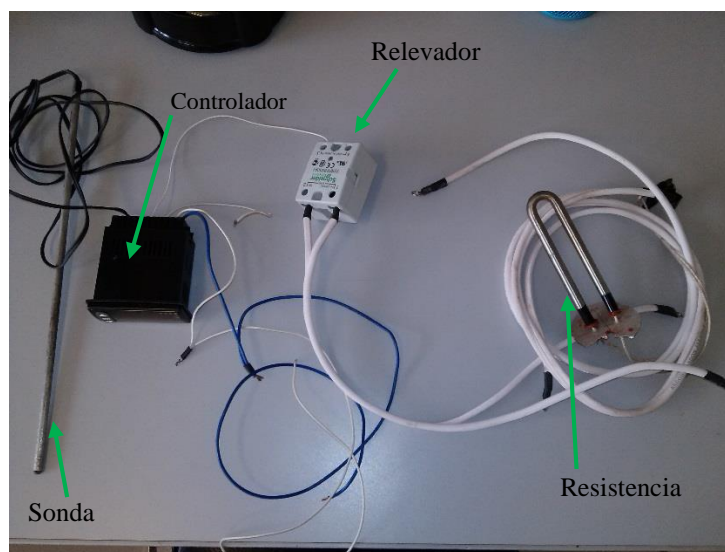


Figura 3. 8. Esquema del sistema de temperatura, resistencia, relevador, controlador de temperatura, sonda para temperatura.

El sistema completo es el que se muestra en la Figura 3.8. Una vez que los cinco sistemas se terminaron, se conectaron en serie a un control maestro, el cual los mantiene a las mismas condiciones para monitorear y controlar la temperatura del sistema; ya que si esto no sucede los residuos se quemarán. El sistema controlará la temperatura para que la degradación de los residuos se vaya llevando a cabo dentro de sus tres etapas del compostaje. Mesofílica (15 – 45 °C), etapa inicial, Termofílica (45 – 65 – 45), degradación de la materia orgánica y Mesofílica – madurez (45 – 15), etapa de estabilización de la composta (FAO, 2012).



a)



b)

Figura 3. 9. Fotografías del sistema de temperatura, a) controladores de temperatura y b) relevadores de corriente.

Para el caso de la resistencia tuvo que ser empacada en un cilindro de aluminio para que esta no quemara los residuos, como se puede observar en la Figura 3.10, las fotos de la resistencia y la resistencia empacada.



a)



b)

Figura 3. 10. Fotografías del sistema de temperatura, a) resistencia con tapa aislante y b) resistencia empacada en tubo de aluminio.

3.5. Cantidad de plástico

Las cantidades de plástico con las que se experimentó fueron determinadas a partir de la ASTM-5338, en la cual se indica que para determinar la cantidad de plástico se parte del peso seco de composta y que a partir de éste se debe de utilizar el 3%, el cual corresponderá al plástico necesario para el compostaje.

El contenido de humedad promedio de la FORSU es del 70%. A partir de este porcentaje se realizó el cálculo para determinar la cantidad de plástico para cada uno de los composteros.



La base del cálculo se muestra a continuación:

- El %H en los residuos orgánicos, con base en trabajos previos (Ramos-González, 2012), reportan un 70% de humedad, por tanto:
- En cada compostero se tienen 10 kg de FORSU, de los cuales 7 kg son humedad, representada como agua y que 3 kg son base seca de material orgánico.
- La cantidad de plástico requerido en peso es el correspondiente al 3% del peso seco de la FORSU, correspondiente a la experimentación de plásticos biodegradables (Rabel-Contreras *et al.*, 2011).
- Plástico requiero por compostero son de 9 gramos el cual se cortará en películas de 10x1.5 centímetros, como se muestra en la Figura 3.11.



Figura 3. 11. Tamaño de las películas de PE.

3.6. Determinación de la concentración de aditivo en la película

La concentración de aditivo está determinado por trabajos previos del grupo de trabajo de la doctora Ma. Teresa Orta Ledesma, realizados en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, donde la concentración adecuada es del orden de 1 a 5% en peso, para que el aditivo lleve a cabo la degradación de la película de plástico en el proceso de composteo.

El aditivo utilizado es el estearato de cobalto (CoSt), con peso molecular de 625.88 g/mol, y con un contenido de cobalto es de 9.6%, $\pm 0.22\%$. De lo anterior, se determina que por cada 100g de CoSt se tienen 9.6g de cobalto. Sabiendo, que el aditivo se adiciona en un porcentaje del 1 al 5% en las bolsas, podemos decir que la cantidad presente de aditivo en el lote de película es el adecuado para que se lleve a cabo la degradación y fragmentación de ésta en el proceso de compostaje.

3.7. Montaje del dispositivo experimental

El montaje de los composteros consistió en pesar 10 kg de muestra, de la cual 7 kg fueron de FORSU y 3 kg de residuos de poda, los cuales se pesaron en un costal para mezclar los residuos homogéneamente, lo anterior se realizó para cada uno de los 5 composteros. Para ello se utilizó una báscula marca Oken con capacidad para 100 kg. Una vez pesadas las muestras, se trasvasaron a cada uno de los reactores, como se puede apreciar en la Figura 3.12. Realizado lo anterior se le adicionará la cantidad de película plástica, como se muestra en la tabla 3.4



a)



b)



c)



d)

Figura 3. 12. Montaje de los composteros, a) pesado de muestra, b) trasvaso de la muestra a los composteros, c) montaje de composteros y d) conexión de los sistemas de temperatura.



Tabla 3. 4. Dosis de película de polietileno por reactor.

Compostero	Tipo de película	Cantidad (g)
1	Sin	0
2	Sin aditivo	9
3	Con aditivo	9
4	Con aditivo	9
5	Con aditivo	9

Una vez montados los composteros se conectó el sistema de control de temperatura a cada uno de ellos, se iniciará el proceso. El proceso de compostaje, como se mencionó consta de 3 etapas: mesofílica, termofílica y madurez, en las cuales van a ocurrir cambios en la temperatura, humedad, pH y en la relación C/N, este proceso se ejemplifica en la figura 3.13. El tiempo de experimentación será de 3 meses, 90 días, según lo reportado en la ASTM D 6400-04.

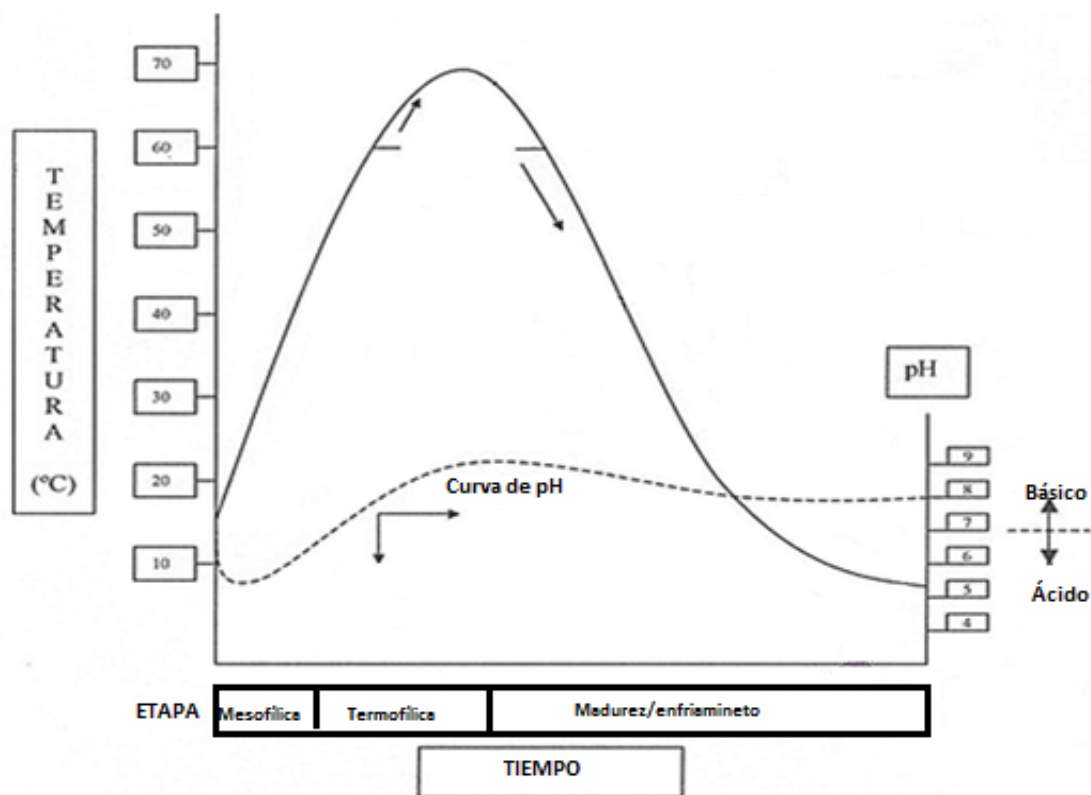
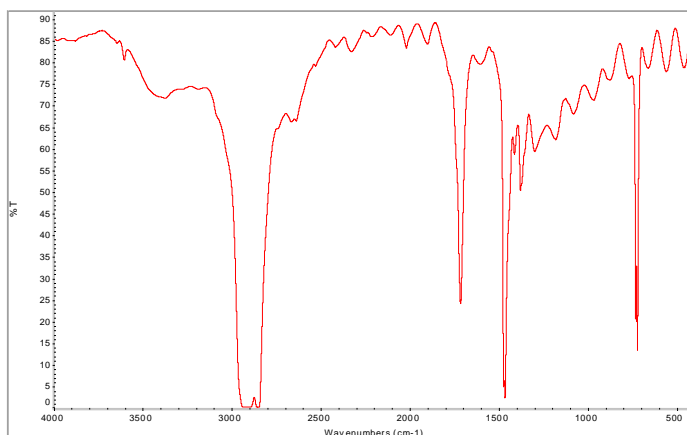
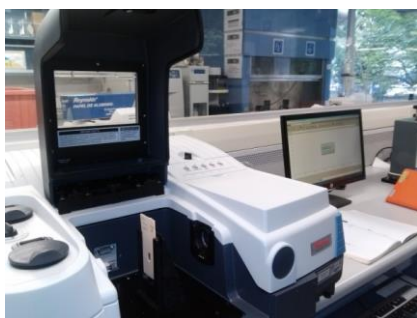


Figura 3. 13. Etapas del proceso de compostaje, (FAO, 2012).



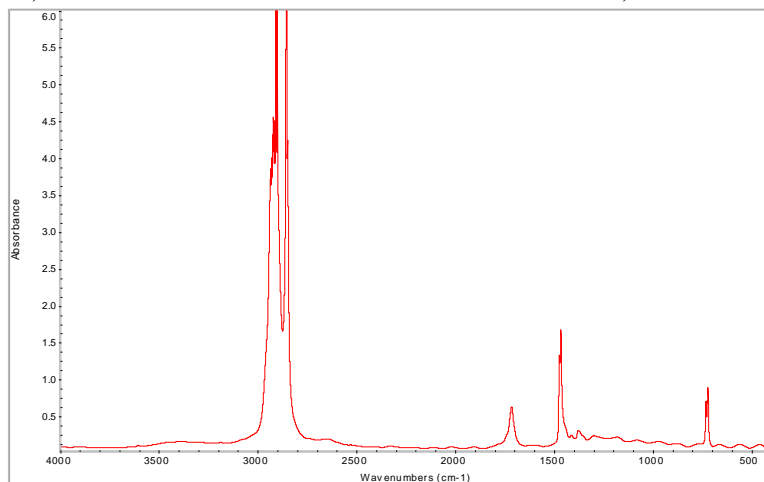
3.8. Cuantificación de la degradación

Para cuantificar la degradación de la película se utilizaron dos técnicas analíticas; la primera es la espectroscopía de Infrarrojo (FTIR) y la segunda, la microscopía electrónica de Barrido (SEM). En la primera se utilizó el equipo marca Nicolet Thermo Scientific, modelo 6700, el cual se utilizará para cuantificar los grupos funcionales, mediante la medición del índice de carbonilo, ver figura 3.14.



a)

b)



c)

Figura 3. 14. Técnica de Espectroscopia de Infrarrojo (FTIR). Foto a) Equipo de Infrarrojo Nicolet Thermo Scientific modelo 6700, b) espectrograma de transmitancia que se obtiene del equipo y c) conversión de transmitancia a absorbancia para determinar el IC.

Se identifica este grupo porque al ser degradada la película en el proceso de compostaje el grupo funcional que se forma es el carbonilo. Este grupo es el resultado de la degradación de

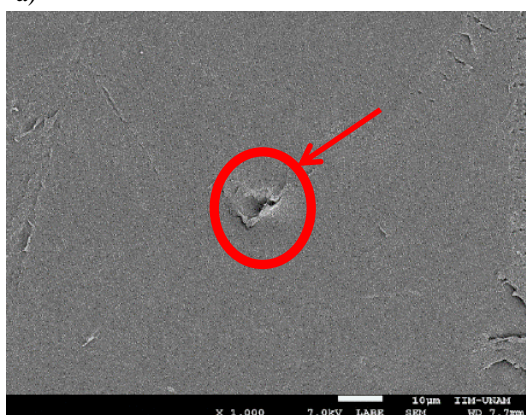
la película al ser sometida a compostaje. Por tanto, al tener una banda ancha y larga en el espectro de IR, ésta indica la presencia del carbonilo y de la degradación de la misma. En la segunda técnica se utiliza el equipo marca JEOL modelo JSM-7600F, el cual sirve para la identificación de la degradación de la película mediante el cambio en la superficie de ésta. El montaje de la muestra se puede ver en la Figura 3.15, en la cual se observa en la Figura 3.15.b, el montaje de las muestras sobre los porta objetos de cobre. Una vez montadas las muestras, se les recubre con una capa de oro de 2 micras, para que el haz de luz no rebote en la superficie plástica y pueda incidir en la muestra, dando una señal que el equipo detectará en forma de una imagen. Por último, la fotografía c), en la cual se muestra la imagen, llamada micrografía, de la superficie del plástico en donde se puede observar una zona de fragmentación.



a)



b)



c)

Figura 3. 15. Técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). Foto a) Equipo JEOL 7600 F, b) Montaje de muestras y c) Micrografía, la cual muestra una zona de fragmentación.

3.9. Cuantificación del metal

Para la cuantificación del Co se utilizó la técnica analítica de absorción atómica para poder detectar al metal dentro del proceso de compostaje. Esta determinación es de vital importancia ya que no existe información sobre la migración del metal al suelo o la retención del mismo en la película durante el proceso de degradación y fragmentación de las mismas con el aditivo. Además, de poder ubicar al metal dentro del proceso de compostaje. El equipo utilizado fue el Thermo Scientific modelo iCE 3000 Series, ver Figura 3.16. Para la cuantificación del Co se seguirá la metodología establecida en la norma NXM-AA-051-SCFRI-2001.



a)



b)



c)

Figura 3. 16. Fotos del equipo a utilizar para cuantificar el cobalto, a) equipo Thermo Scientific, b) identificación y envase de muestras y c) imagen del automuestreador, en el cual se montan las muestras.



3.10. Diseño experimental

El diseño experimental propuesto, tiene como propósito dar información de la degradación de la película con aditivo prooxidante durante el proceso de compostaje.

Para el estudio a realizar, el modelo que mejor se acomoda para el experimento es el diseño de mediciones repetidas, el cual consiste en realizar mediciones, o toma de muestras, de forma repetida y constante para poder realizar un monitoreo a lo largo del tiempo de experimentación y así poder determinar el efecto del tiempo en cada etapa. El modelo que representa este diseño experimental es el siguiente:

$$y_{ij} = \mu + \pi_i + \tau_j + \epsilon_{ij}$$

$$i = 1, \dots, n$$

$$j = 1, \dots, t$$

Dónde:

y_{ij} = es la respuesta que va a tener el compostero i en la etapa j

μ = media general

π_i = es el efecto aleatorio del compostero i y es constante para todas las ocasiones

τ_j = es el efecto fijo de la etapa j

ϵ_{ij} = es el componente del error aleatorio específico del compostero i en la etapa j

Las hipótesis que se prueban son:

H_0 : no existe diferencia entre las observaciones en el tiempo.

H_a : si existe diferencia entre las observaciones en el tiempo.



Tabla 3. 5. Modelo estadístico, "mediciones repetidas".

	Etapa			
	1	2	3	
Compostero	1	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}
	2	Y_{21}	Y_{22}	Y_{23}
	3	Y_{31}	Y_{32}	Y_{33}
	4	Y_{41}	Y_{42}	Y_{43}
	5	Y_{51}	Y_{52}	Y_{53}

Las ventajas de los experimentos de mediciones repetidas:

- Es el único tipo de diseño en el que se pueden estudiar los patrones individuales de cambio.
- Economiza el número de unidades experimentales (u.e.).
- Las u.e. pueden servir como sus propios controles dado que la variable de respuesta se puede medir bajo las condiciones de control y experimental de cada u.e.

Por tanto, como la variable de respuesta es la degradación de la película de plástico con aditivo, se relacionará la degradación de la película por medio de la determinación del Índice de Carbonilo (I.C), en el cual se observará el aumento del valor del I.C al aumentar el área en la banda del carbonilo debido a la degradación de la película. La estadística realizada fue si es o no significativo el aumento en el I.C a lo largo del proceso de compostaje, realizando comparaciones en las 3 etapas.

4. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados experimentales de la degradación de los residuos orgánicos y de la fragmentación de las muestras de película de PE a lo largo del proceso de compostaje.

De acuerdo con la primera etapa de la metodología (preparación de la muestra), figura 4.1, se tomó 1 kg de muestra de FORSU con la cual se realizó la caracterización de que parte de una muestra total de 51 kg de FORSU previamente triturados y homogeneizados en una trituradora industrial. Posteriormente el kilogramo de muestra fue molida, en un molino manual de dos discos para disminuir su tamaño de partícula en un intervalo de 1.0 a 0.1 mm.



Figura 4. 1. Colecta y preparación de la muestra FORSU, a) sitio de muestreo, b) trituradora industrial, c) muestra triturada y d) muestra tomada para realizar la caracterización.



4.1. Caracterización

La caracterización de la FORSU se realizó con base en los métodos estándar descritos en el capítulo 3. Los resultados se muestran en la Tabla 4.1, y se presentan en unidades del Sistema Internacional.

Tabla 4.1. Resultados de la caracterización de la FORSU.

Parámetro	pH	Humedad (%H)	C/N	ST (mg/kg)	SV (mg/kg)	SF (mg/kg)	Ntot (mg/kg)
	6.0	77	29	31,230	178,445	518,281	4,141

La FORSU presentó un pH ácido, con valor de 6, una humedad inicial de 77 % y una relación C/N de 29. El material seco se representa por los sólidos totales (ST), los cuales están constituidos por la suma de los sólidos totales volátiles (SV) y sólidos totales fijos (SF), de los cuales, el primero corresponde al material orgánico con un 77.2% y el segundo al inorgánico con un 22.4% de los sólidos totales. Los valores obtenidos en la caracterización de los residuos sólidos son los adecuados para llevar a cabo el proceso de compostaje (FAO, 2012; OPS, 1999).

4.2. Resultados de las pruebas experimentales durante el proceso de compostaje

4.2.1. Proceso de compostaje

Los residuos orgánicos triturados se pesaron y se trasvasaron a cada uno los composteros para iniciar el proceso de compostaje, el cual se muestra en las figuras 4.2 a 4.5. En la figura 4.2, foto a), se puede observar que los residuos presentan un alto contenido de humedad, y tienen la apariencia de un cúmulo de lodo con ramas y restos vegetales, en el cual no se logra distinguir la composición de ésta. En la figura 4.2., foto a) día 5, se puede observar que los residuos han perdido el exceso de humedad, la cual se pierde como lixiviado en el fondo del compostero, (figura c) y como resultado de esta pérdida en los residuos se puede distinguir la composición de los mismo. El lixiviado que se obtuvo presentó un color verde ocre, con grumos y un olor fuerte característico a materia en descomposición.

Otra observación que se tuvo, fue la presencia de vapor de agua al realizar la aireación de los composteros, éste vapor de agua se debió a choques térmicos ocasionados por los cambios bruscos de que la temperatura ya que en la composta se reportaba una temperatura de 35 °C y en el ambiente de 14 °C.

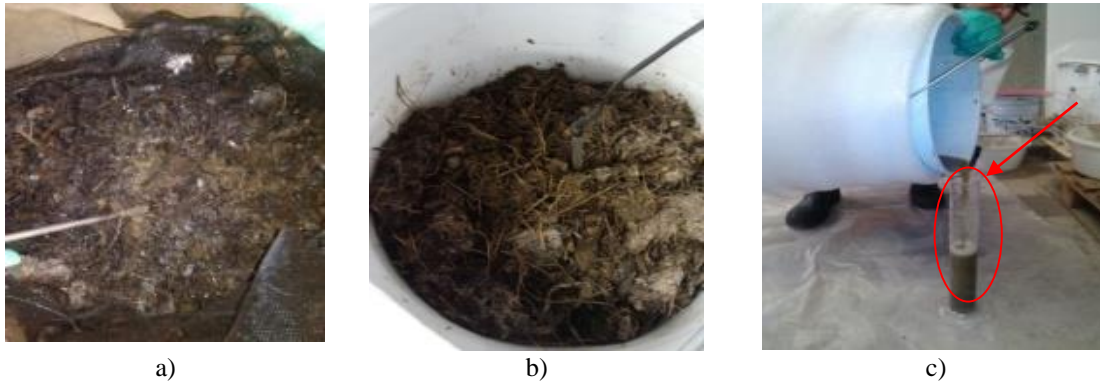


Figura 4. 2. Fotografías del proceso de compostaje en los días a) día 5, b) día 15 y c) día 15 obtención de lixiviado.

Para los días 25, 35 y 45, se puede apreciar (Figura 4.3) el cambio de coloración de los residuos, de textura y la pérdida de humedad; además estos residuos presentaron un olor a tierra húmeda y no el olor característicos de la FORSU. También se observa el rompimiento de la película de polietileno con el aditivo de Co mientras que en la película de polietileno sin aditivo no hay tal.

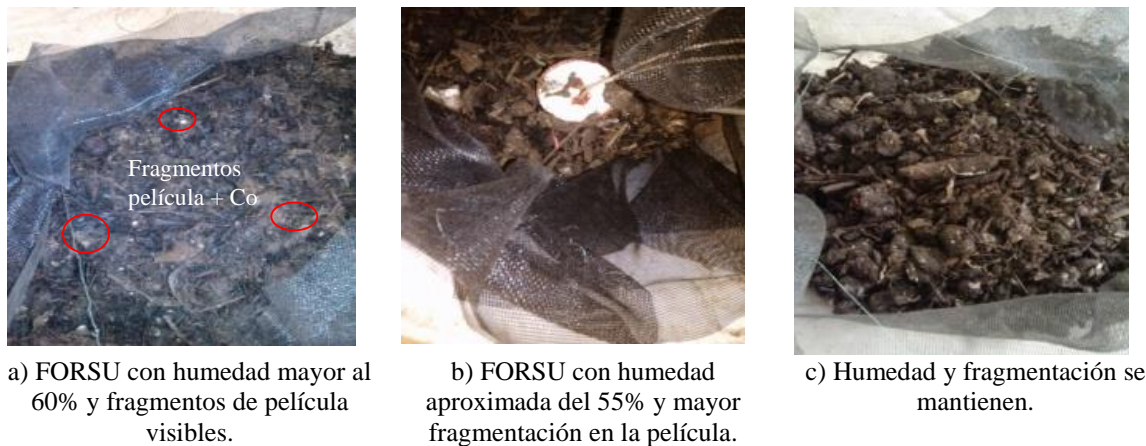


Figura 4. 3. Fotografías del proceso de compostaje en los días, a) día 25, b) día 35 y c) día 45.

En los días 55 y 65, los residuos mostraron una coloración café oscuro, una textura y olor a tierra, con una humedad del 50% y ya no se puede distinguir la materia orgánica inicial (trozos de alimentos), solamente restos de madera, los cuales tardan más tiempo en degradarse por el proceso de compostaje. Tampoco se puede distinguir la película de polietileno con el aditivo de Co en su totalidad, solamente fragmentos de ésta, como se puede



apreciar en la Figura 4.4. En cambio para el caso de la película de polietileno sin aditivo no se observa ningún cambio.

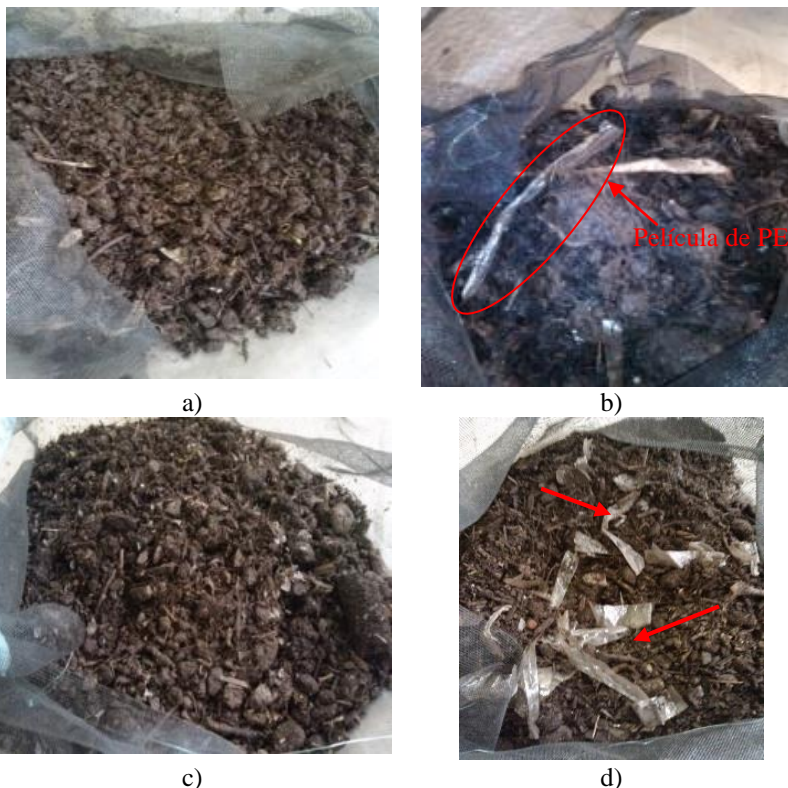


Figura 4. 4. Fotografías del cambio por el proceso de compostaje a los días: 55 a) polietileno con aditivo y b) polietileno sólo y al día 65 c) polietileno con aditivo y d) polietileno sin aditivo.

En los días siguientes (68, 75, 80 y 90) los residuos están totalmente degradados, sólo persisten los restos de madera y algunos huesos de fruta (figura 4.5), los cuales tardan entre 6 meses a un año en degradarse (Terra, 2003) debido a la gran cantidad de lignina que éstos contienen.

Por tanto, la última etapa del proceso de compostaje, etapa de enfriamiento, es en la cual casi toda la materia orgánica ha sido consumida por los microorganismos, y éstos han dejado de reproducirse ya que no hay más alimento. Lo que ocasiona una disminución en la tasa de crecimiento microbiano y disminución en la temperatura por la falta de la actividad microbiana. Una vez que lo anterior sucede, comienza la etapa de madurez, en la que los residuos ya presentan las características típicas de la composta, como son: olor, textura, humedad y relación C/N (OPS, 1999).



a) P.E con aditivo



b) P.E sin aditivo



c) P.E con aditivo



d) P.E con aditivo



e) P.E con aditivo



f) P.E sin aditivo

P.E = Polietileno

Figura 4. 5. Fotografías del proceso de composteo al tiempo: 68 días a) y b), 75 días c), 80 días d) y a los 90 días e) y f).

4.2.2. Proceso de aireación

El proceso de aireación durante el compostaje es muy importante ya que, si no se realiza de manera constante, ésta queda sin oxígeno ocasionando que se convierta en un proceso anaerobio y de fermentación, fomentando el crecimiento de la fauna asociada (larvas y

gusanos) a este tipo de condiciones, (figura 4.6). Para evitar lo anterior, se realizó una serie de pruebas preliminares en las cuales se determinó que la FORSU tenía que ser mezclada con restos de poda (figura 4.7), los cuales ayudaron a dar soporte a la misma y que ésta no formara una masa compacta y viscosa que impidiera el mezclado y la aireación necesaria (Terra, 2003; OPS, 1999).



a)



b)



c)

Figura 4. 6. Fotografías de las pruebas preliminares y de la fauna asociada. a) sistema de temperatura y FORSU, b) masa compactada de FORSU y c) aparición de larvas y gusanos a los 15 días, debido a la falta de oxígeno.

Debido a que se trabajó con una cantidad de FORSU pequeña (escala 1:100), la necesidad de aireación fue determinada de dos veces por semana, resultando lo más adecuado para esta cantidad. En cambio el aumento en la temperatura fue más rápido, lo que ocasionó tener tiempos cortos de altas temperaturas, pero largos para que ésta disminuyera. Esta



disminución en la temperatura indicó la necesidad de los microorganismos por oxígeno. A diferencia de lo que pasa en las pilas de compostaje, en las que se manejan volúmenes de FORSU de varios miles de kilogramos en donde el consumo de oxígeno es muy rápido, al igual que el aumento y disminución de la temperatura. Estos cambios, se deben a la tasa de crecimiento de los microorganismos, la cual es exponencial por la abundancia de alimento, ocasionando aumento de la temperatura, en forma de calor por el consumo del mismo y la necesidad de oxígeno para satisfacer la demanda por los microorganismos (FAO, 2012).

Por tanto, llevar a cabo el volteo de los residuos para airearlos, resulta ser de vital importancia para lograr un buen y rápido proceso de compostaje para así evitar malos olores ocasionados por la falta de oxígeno de los mismos.



Figura 4. 7. Fotografía de material de soporte utilizado en el proceso de compostaje, en el cual se tienen restos de poda como: pasto, hojas, ramas, etc.

4.2.3. Temperatura

La temperatura se monitoreó diariamente durante los 90 días más 5 días más, para cerciorarnos de que la temperatura permaneciera constante, por lo que el tiempo total de monitoreo fue de 95 días. La medición de la temperatura se realizó con un termómetro digital y con el mismo se corroborar las lecturas que marcaban la sonda de los controladores de temperatura de cada uno de los composteros. Se tomó registro de la temperatura dos veces al día, por la mañana y tarde, para realizar un promedio de la temperatura por día.

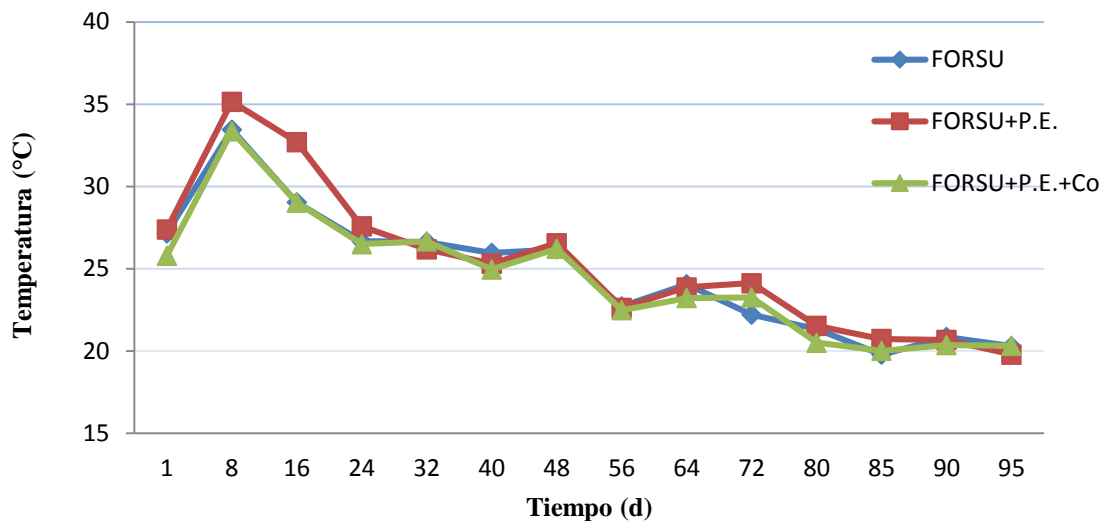


Figura 4. 8. Comportamiento de la temperatura durante el proceso de compostaje.

En la Figura 4.8 se muestran los resultados del monitoreo de la temperatura en el proceso de compostaje hasta el día 95, cinco días más del periodo de experimentación, con el propósito de cerciorarse que la temperatura era constante. En ésta figura, se puede observar que la temperatura inicial fue de 25 °C y en cuestión de 6 días, (tiempo de adaptación de los microorganismos), la temperatura se elevó por arriba de los 33°C, esta etapa duró aproximadamente 16 días. Este aumento, es debido al proceso de degradación de los residuos por los microorganismos, los cuales liberan calor por la acción del consumo de los residuos (FAO, 2012; OPS, 1999).

Aunado a lo anterior, la temperatura de experimentación nunca llegó a las temperaturas que reporta la teoría, las cuales son: etapa mesofílica de 40 °C, termofílica de 70 °C y de enfriamiento/madurez de 20 °C, esto se debe, posiblemente, al bajo volumen de residuos utilizados, el cual fue de tan sólo 10 kg (escala utilizada de 1:100). Es por esto que tal vez, en cuestión de días llegó a un equilibrio a el cual ya no necesitó de una mayor temperatura.

4.2.4. Humedad

Para la determinación de la humedad se realizó de forma gravimétrica, por el método NMX-AA-016-1984, y consistió en tomar 5 gramos de muestra de cada uno de los composteros, previamente homogenizados, cada 7 días durante los 95 días. La muestra tomada se colocó dentro de cápsulas de porcelana y éstas se pusieron en una estufa a 105 °C por 12 horas. Este procedimiento se repitió a lo largo de todo el proceso de compostaje, obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 4.2 y de forma gráfica en la figura 4.9. Con una humedad inicial promedio de 76.9%, el cual va disminuyendo de forma gradual hasta llegar



a una humedad no menor al 30%. Esta disminución, se debe al aumento en la temperatura y a la aireación realizada a los composteros para mantener el sistema en un proceso aerobio.

Tabla 4. 2. Resultados de humedad a lo largo del proceso de composteo.

HUMEDAD														
Días	1	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	95
MUESTRA														
FORSU	77.8	72.5	71.4	66.3	70.8	61.9	55.5	53.5	47.6	53.9	48.2	45.7	33.4	29.8
FORSU+P.E.	74.5	73.3	69.3	70.1	68.6	62.0	59.7	52.6	54.5	52.8	45.7	41.9	37.6	30.6
FORSU+P.E.+Co	78.3	70.0	70.9	65.3	68.1	61.0	64.0	59.9	56.5	51.8	43.8	39.7	32.8	31.4

FORSU = fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos

FORSU+P.E. = fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos con polietileno

FORSU +P.E.+Co = fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos con polietileno y aditivo

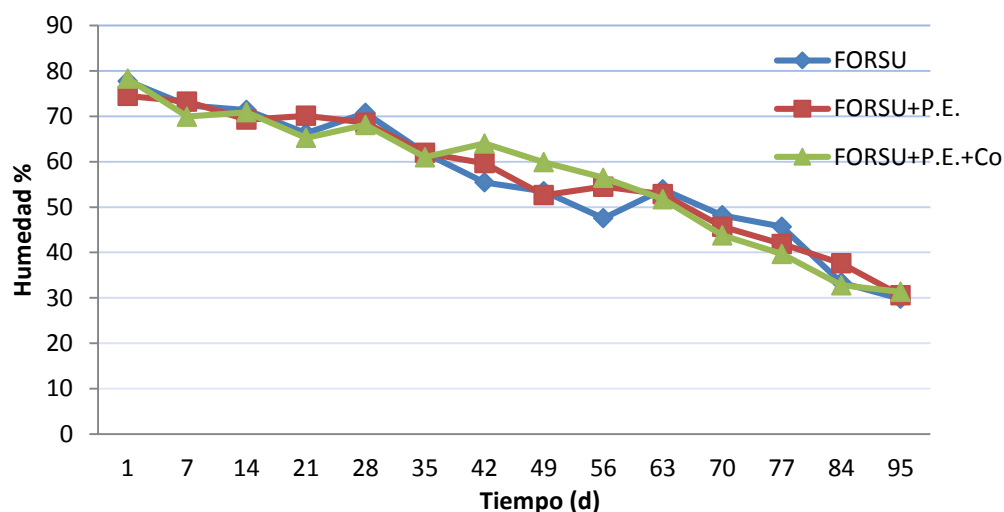


Figura 4. 9. Comportamiento de la humedad durante el proceso de compostaje.

En el proceso de compostaje, a los días 6 y 15, se presentó lixiviado con un volumen aproximado, para todos los composteros, de 500 mL. Esto se debió, por una parte, a que el día de la toma de muestra coincidió con un periodo de lluvias, lo cual ocasionó tener un exceso de humedad de aproximadamente 10% en la muestra, basados en 70% de humedad que aproximadamente corresponden a los residuos sólidos urbanos. Por otra parte, esta humedad se debe al proceso de degradación de los residuos, ya que estos también contienen una gran cantidad de agua y la van perdiendo como consecuencia del alza en la temperatura por el proceso de la degradación de la FORSU. La presencia de lixiviado sólo se presentó en estas dos ocasiones, en las cuales los residuos estaban frescos y la temperatura era mayor a los 30 °C, la cual era debida al proceso de consumo de los residuos orgánicos por los microorganismos y al crecimiento de los mismos, ocasionando la generación de lixiviados.



4.2.5. Relación C/N

Para poder llevar a cabo el proceso de degradación del material orgánico es necesario determinar la relación C/N, ya que ésta es de vital importancia para poder determinar si la mezcla de FORSU es la adecuada para llevar a cabo el proceso de compostaje. Esto se determinó de acuerdo al método NMX-AA-067-1985.

Los resultados que se muestran a continuación, en la figura 4.10, describen la tendencia que siguió la relación, iniciando con una relación C/N mayor a 25, la cual corresponde en el rango de 25 a 30 que se menciona en la literatura consultada. Esta relación es bastante satisfactoria para que se pueda llevar a cabo el proceso de compostaje y conforme el proceso avanza, esta relación va disminuyendo hasta una relación aproximada de 12, la cual indica que el proceso ha llegado a su fin. Durante el proceso, se logra ver en el gráfico una tendencia de sube y baja a partir de día 40 al 95, esto se debió a que dentro del proceso de compostaje se llevaron a cabo procesos de hidrólisis de proteínas y consumo de las mismas al igual que del material carbonoso, mostrando al final del proceso una composta con una buena cantidad de nitrógeno, el cual es importante para ser utilizado como un mejorador de suelo.

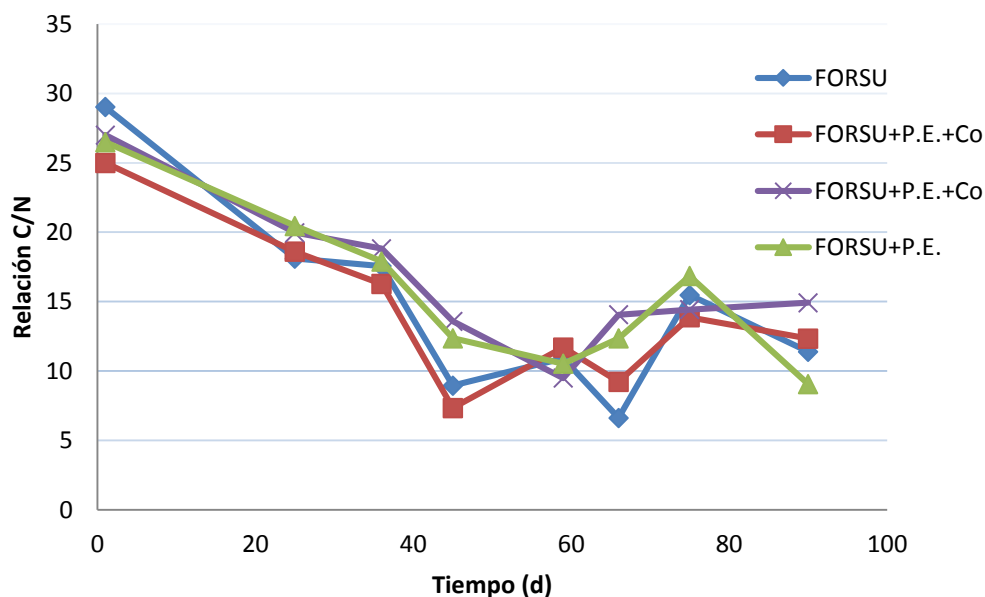


Figura 4. 10. Comportamiento de la relación C/N durante el proceso de compostaje.

4.2.6. pH

Para la determinación de pH, primero se optó por la medición directa utilizando la metodología descrita en la norma NOM-AA-024-1984, pero al no tener una buena determinación debido a que la composta va perdiendo humedad, se optó por utilizar la norma



NOM-021-RECNAT-2000, medición de pH, ésta indica que se debe de establecer una relación de muestra sólida:agua con relación 1:2, en este caso se utilizó una relación de 1:3, (1 g de muestra de residuos por 3 mL de agua destilada). La cantidad de muestra que se tomó fue de 5 g, a los cuales se les agregaron 15 mL de agua destilada, la muestra se agitó con una parrilla de agitación por 5 minutos y se dejó reposar durante 10 minutos. Transcurrido el tiempo de reposo se realizó la medición de pH con un potenciómetro. Los resultados obtenidos se muestran a continuación (Figura 4.11). La materia orgánica se va descomponiendo debido al crecimiento microbiano, los cuales van modificando el valor de pH conforme van degradando los residuos orgánicos.

El pH inicial de los residuos orgánicos fue de 6 unidades, el cual lo cataloga en la escala de pH, que va de 0 a 14, como ácido. En este valor, es en el cual las bacterias tendrán su máximo desarrollo para consumir y bio-transformar toda la materia orgánica y obtener como producto final la composta.

Durante el proceso de compostaje el valor de pH fue variando de la siguiente manera: mesófila, el pH disminuye por la formación de ácidos orgánicos originados por la acción de microorganismos sobre los carbohidratos, lo que favorece al crecimiento de hongos y la descomposición de la celulosa y lignina; termófila, el pH aumenta hasta valores de 9, por la formación de amoníaco, producto de la desaminación de las proteínas. Provocando la pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco al presentar pH alcalino; maduración, el pH disminuye entre 7 y 8, como consecuencia de la capacidad amortiguadora que tiene el humus por la degradada da la materia orgánica. Finalmente se da una fase estacionaria de pH próximo a la neutralidad en la que se estabiliza la composta.

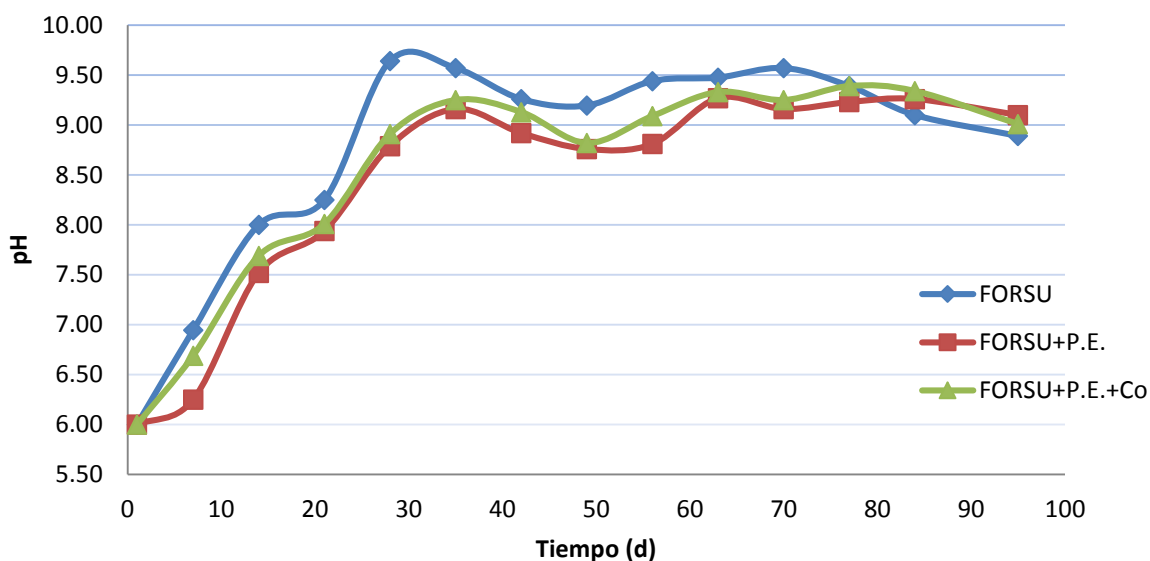


Figura 4. 11. Comportamiento del pH durante el proceso de compostaje.

4.2.7. Degradación de la película de polietileno en el proceso de compostaje

La degradación de la película debido a la oxidación de las cadenas de polímeros, se muestra en la siguiente figura 4.12, en la cual se monitorea a las muestras de película a los días: 1, 25, 45, 68 y 90, en los que se esperó tener cambios significativos, los cuales sí se obtuvieron y se muestra paso a paso en la figura 4.12. Fotografía a), se observa la muestra inicial en la cual se logran ver los dos tipos de películas antes de iniciar el experimento. Fotografía b), a los 25 días, se tomó muestra de las películas en la cual, la muestra de sólo P.E. no presentó cambios visuales, mientras que la de P.E. con aditivo, presentó un opacamiento y oxidación, la cual degradó y rompió la película. Fotografía c), a los 45 días, se observó fragmentos de menor tamaño que los anteriores de P.E. + Co, mientras que la de PE se muestra intacta. Fotografía d), a los 68 días, la degradación continúa para la muestra de P.E. + Co, fotografías e) y f), mientras que la muestra sólo de P.E, sigue intacta.

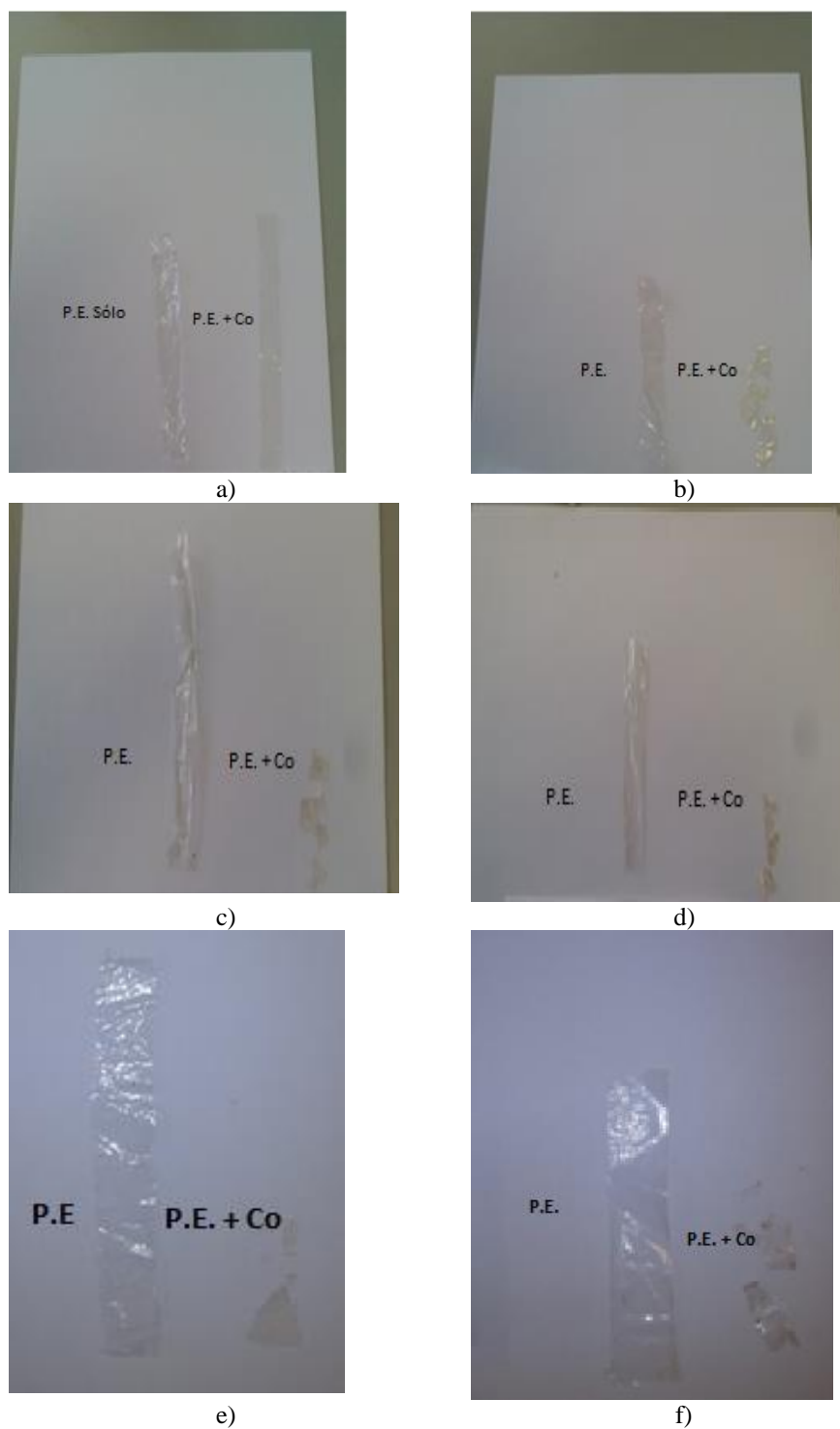


Figura 4. 12. Fotografías del proceso de degradación de la película de polietileno y la de polietileno con Co a los días: a) Inicial, b) 25, c) 45, d) 68, e) 78 y f) 90.



4.2.7.1 Índice de carbonilo

Para determinar el índice de carbonilo (IC), se deben realizar análisis de espectroscopía de infrarrojo para cada una de las muestras de película, el cual consiste en tomar de cada uno de los composteros una muestra de película, lavarla con agua destilada y un hisopo de algodón para retirar los residuos que estén impregnados en la película y que estas partículas no interfieran en el análisis. Posteriormente las muestras se colocan en un porta muestra para poder ser analizadas en el equipo de espectroscopía de infrarrojo marca Nicolet X700, a éste se le programó un barrido de la muestra por 12 veces, con el objeto de tener una buena calidad en el espectro. Al espectro obtenido se le identifica, para el caso de la muestra de polietileno, solamente la banda correspondiente a la unión C-H (1465 cm^{-1}), con la cual se corroboró que la muestra está compuesta solamente de polietileno sin ninguna alteración, ya que no existe en estas muestras degradación alguna. Para el caso de la muestra con Co, en el espectro se identifican dos bandas, la primera correspondiente a la unión de C-H, la cual corresponde a la banda de 1465 cm^{-1} , y la segunda en 1700 cm^{-1} , la cual corresponde al grupo funcional del carbonilo ($1714 - 1750\text{ cm}^{-1}$), en ésta se encuentra presente este grupo porque el aditivo al oxidar la cadena de carbonos del polietileno la va rompiendo provocando la formación de un nuevo grupo funcional que es el carbonilo mencionado (figura 4.13. y 4.14). Esta es la razón de medir mediante el IC la degradación de la película de polietileno.

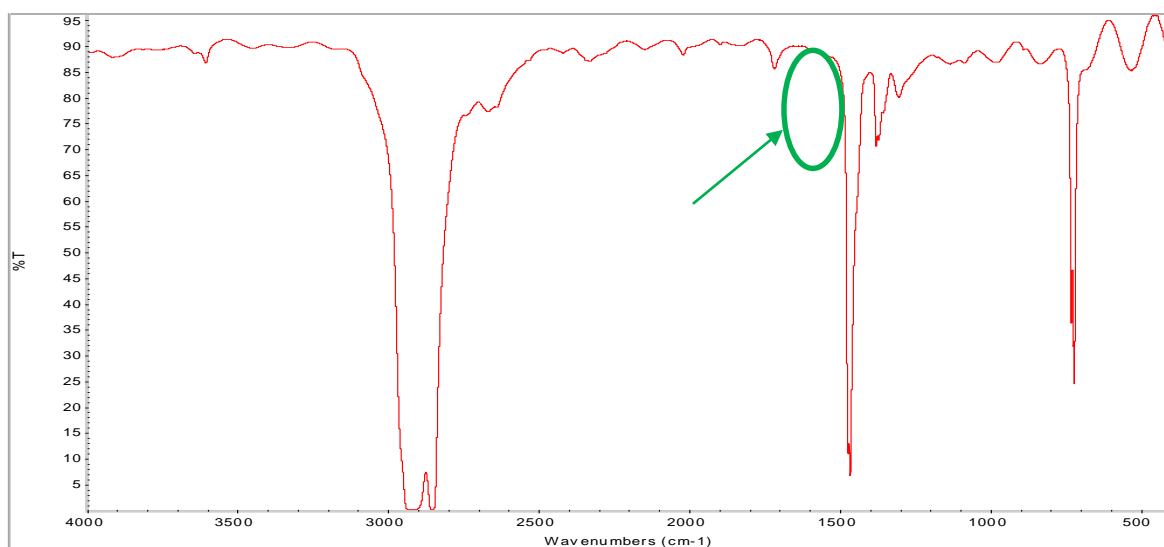


Figura 4. 13. Espectro del polietileno sin la banda correspondiente al carbonilo de $1714 - 1750\text{ cm}^{-1}$.

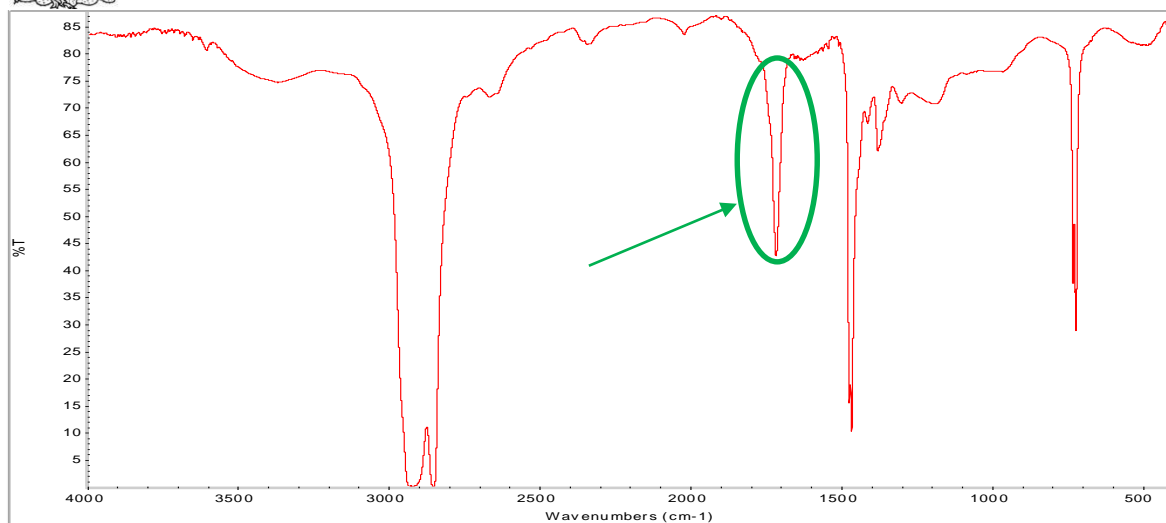


Figura 4. 14. Espectro del polietileno con la banda correspondiente al carbonilo (1714 – 1750 cm-1).

En la figura 4.14 se puede observar una banda en 1714 cm^{-1} , que es la banda correspondiente al grupo funcional del carbonilo, la cual indica la presencia del aditivo y el efecto de degradación en la película de polietileno.

Para obtener el valor de IC, se tuvo que determinar el área bajo la curva de todos los espectrogramas de IR, esto se realizó seleccionando el área del pico correspondiente como se observa en la Figura 4.15 y el programa calculó las áreas de cada pico. Una vez obtenida el área se debe de calcular el IC mediante la siguiente fórmula:

$$IC = \frac{A_{1720}}{A_{1465}}$$

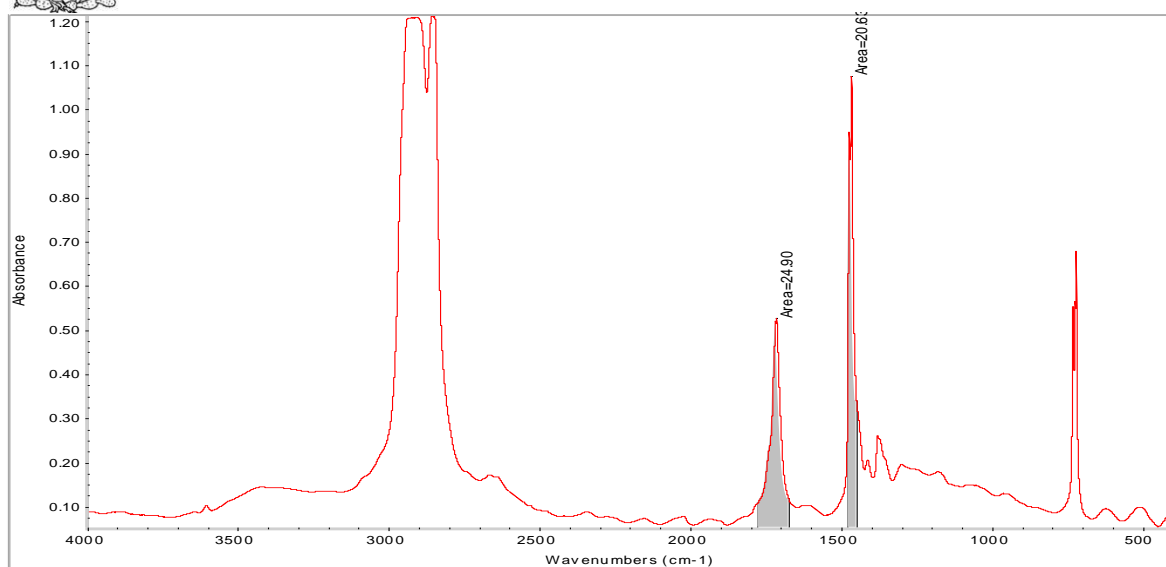


Figura 4. 15. Espectrograma de la obtención del área bajo la curva para obtener el IC.

Los resultados del IC para las películas de polietileno a lo largo del proceso de compostaje se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4. 3. Resultados del IC promedio de las películas de polietileno en el proceso de compostaje.

DÍAS	1	11	16	21	25	30	35	40	45	53	61	68	77	83	90	
#C																DS
1	0.11	0.35	0.85	0.95	0.97	1.01	1.22	1.19	1.05	1.06	1.03	1.05	1.18	0.90	0.96	0.30
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0.11	0.83	1.23	1.11	0.99	1.23	1.47	1.22	0.97	1.13	1.13	1.34	0.95	1.23	0.72	0.32
4	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0
5	0.11	0.98	0.92	0.94	0.85	1.28	1.33	1.16	1.01	0.96	1.17	1.02	1.14	1.32	1.30	0.30

#C = NÚMERO DE COMPOSTERO, DS = DESVIACIÓN ESTANDAR

2 FORSU = fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos

4 FORSU+P.E. = fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos con polietileno

#1, 3 y 5 FORSU +P.E.+Co = fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos con polietileno y aditivo, réplicas.

De forma gráfica, en la figura 4.16, se muestra el comportamiento de las tres muestras; FORSU, FORSU+P.E, FORSU +P.E.+Co (réplicas) para dar un total de 5 composteros. en. En el cual se observó un aumento del IC conforme pasaron los días en el proceso de compostaje, este aumento se observa en la muestra de FORSU +P.E.+Co, en la cual se realizó un promedio de las 3 réplicas para mostrar el efecto del aditivo en la película plástica. Retomando la figura 4.16, se puede observar que para la muestra FORSU +P.E.+Co, la degradación no es homogéneo para los 3 composteros con Co, debido a que a pesar de que



se supone que éstos son muestras homogéneas, estos presentan heterogeneidad por la naturaleza de los residuos orgánicos, lo que ocasionó que se tuviera diferencias en los valores de I.C. Ahora bien este aumento fue rápido, ya que en un periodo de 10 días se tuvo un IC de 0.98 unidades y la tendencia de éste a lo largo del proceso de compostaje fue de aumento, obteniendo un I.C. máximo de 1.30 unidades. Por tanto el mayor IC se obtuvo en los días 25 al 45. En los que la temperatura estuvo por arriba de los 25 °C, la relación C/N disminuyó en los residuos, lo que ocasiona que los microorganismos consuman el carbono de la película de P.E y la humedad se encontró en un porcentaje de 60%, para llevar un adecuado proceso de compostaje.

Por otra parte, en el estudio realizado por Balasubramanian *et al.*, 2011, influencia de la termo-oxidación en la película de polietileno, en el cual realizaron éstas pruebas a una temperatura de 70 °C por periodos de 35 días, en películas con y sin aditivo. En el estudio obtuvieron valores en unidades de I.C. de 1.24, en los días iniciales y hasta 4.04 al día 35, para el caso de la película con aditivo y para la de polietileno de 2 unidades a lo largo de los 35 días. Estos resultados al compararlos con los obtenidos, muestran una marcada diferencia, lo cual se debe a que la concentración del aditivo con la cual trabajó el equipo de Balasubramaiaam *et al.* 2011, es del 10 al 20%, mucho mayor a la utilizada por nosotros. Además, la temperatura que ellos eligieron fue superior a la que se alcanzó en los composteros, la cual fue de 35 °C. Por lo que se puede decir que entre mayor concentración de aditivo y temperatura, mayor degradación.

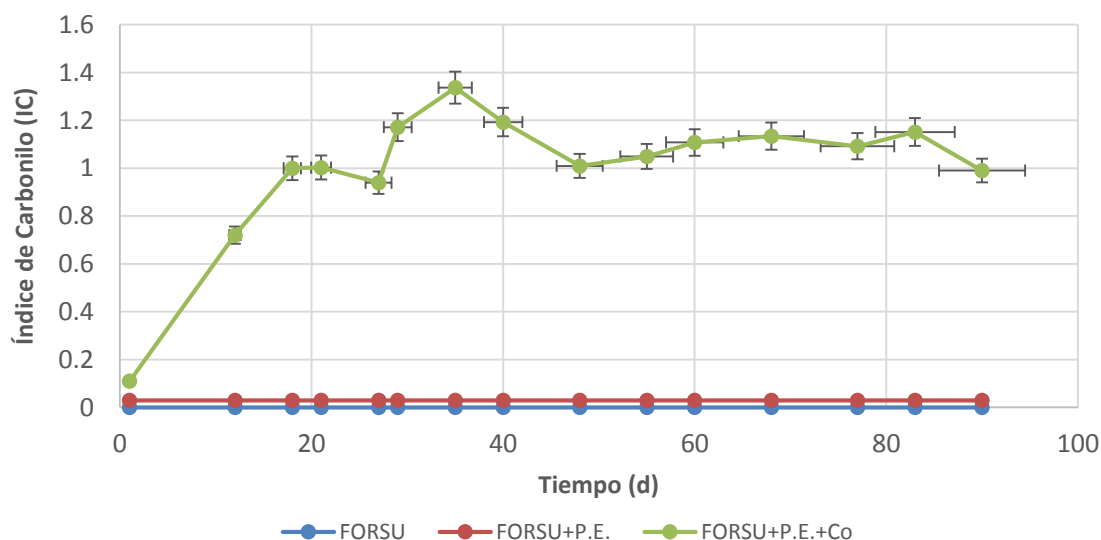


Figura 4. 16. Tendencia del IC de las películas de polietileno con y sin el aditivo de Co a lo largo del proceso de compostaje por compostero.

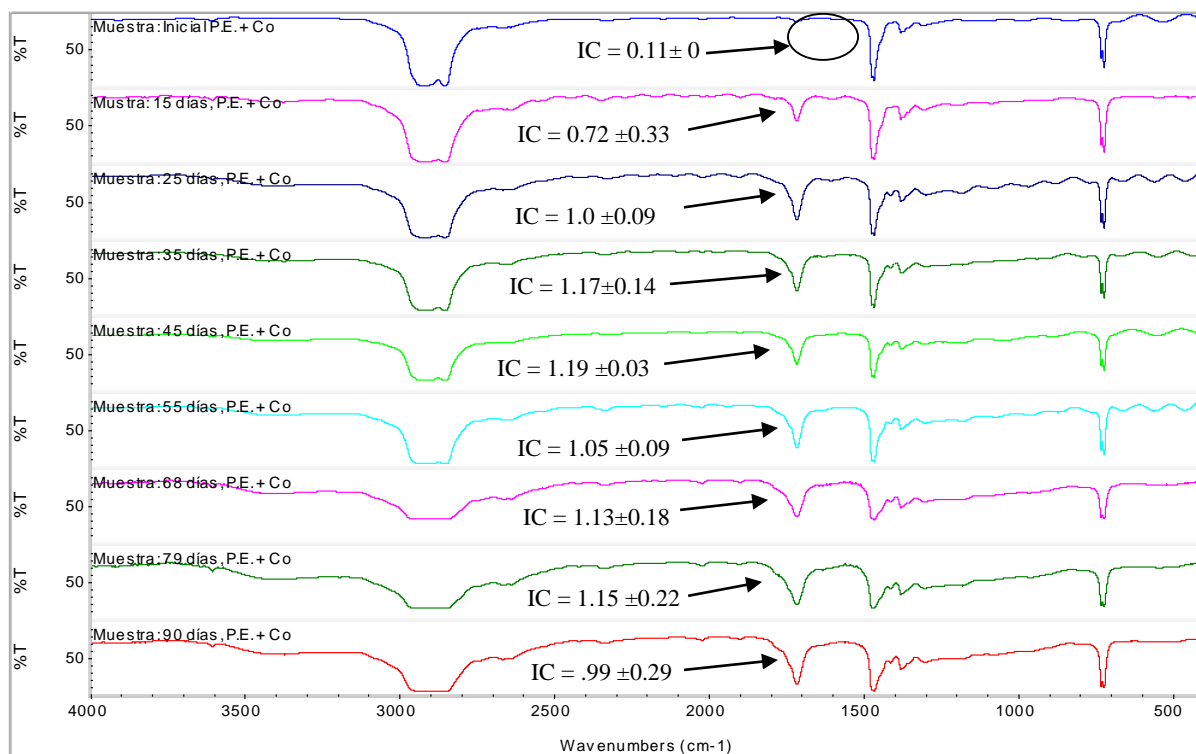


Figura 4. 17. Espectrograma del proceso de degradación de la película de polietileno con aditivo de cobalto a lo largo del proceso de compostaje.

Se realizó un monitoreo de la oxidación de las películas en el proceso de compostaje mediante la utilización de la técnica analítica espectroscopía de infrarrojo, en la cual se fue midiendo el crecimiento de la banda del grupo funcional carbonilo (C=O) que se encuentra en el espectro a los 1714 cm^{-1} en función del tiempo al inicio, 15, 25, 35, 45, 55, 68, 79 y 90 días, los cuales son los días de un total de 90 días en los que se observó un cambio significativo. Las dos películas fueron sometidas al estudio, pero solamente la que presentó oxidación fue la que contenía el aditivo pro-oxidante. Los resultados del estudio se muestran en la figura 4.17 y 4.18.

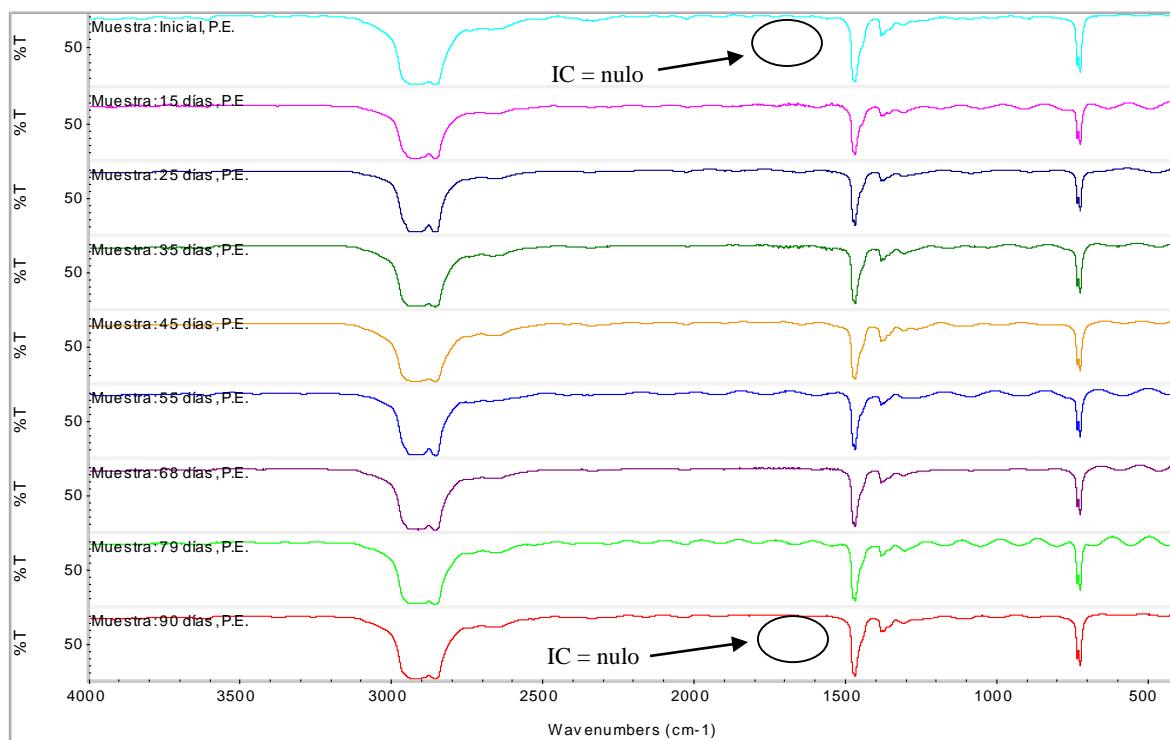


Figura 4. 18. Espectrograma del proceso de degradación de la película de polietileno sin el aditivo a lo largo del proceso de compostaje.

Como se puede observar en el espectro de IR de la figura 4.17, la banda del carbonilo aumenta conforme avanza el proceso de degradación en el compostaje, esto confirma que la degradación de la película sí se está llevando a cabo al igual que la fragmentación de la misma, lo anterior se puede ver de forma visualmente la figura 4.12.

En la Figura 4.19 se muestra un espectrograma comparativo de la diferencia entre las dos películas de polietileno. En el cual se observa, de color verde, el espectro característico del polietileno, en el cual se pueden identificar los picos característicos del polietileno que son 1465 cm^{-1} y de color rojo el espectro correspondiente a la película de polietileno con Co, el cual muestra un pico en 1720 cm^{-1} , que corresponde al carbonilo (C=O), el cual marca la diferencia entre los polímeros e indica la degradación del mismo.

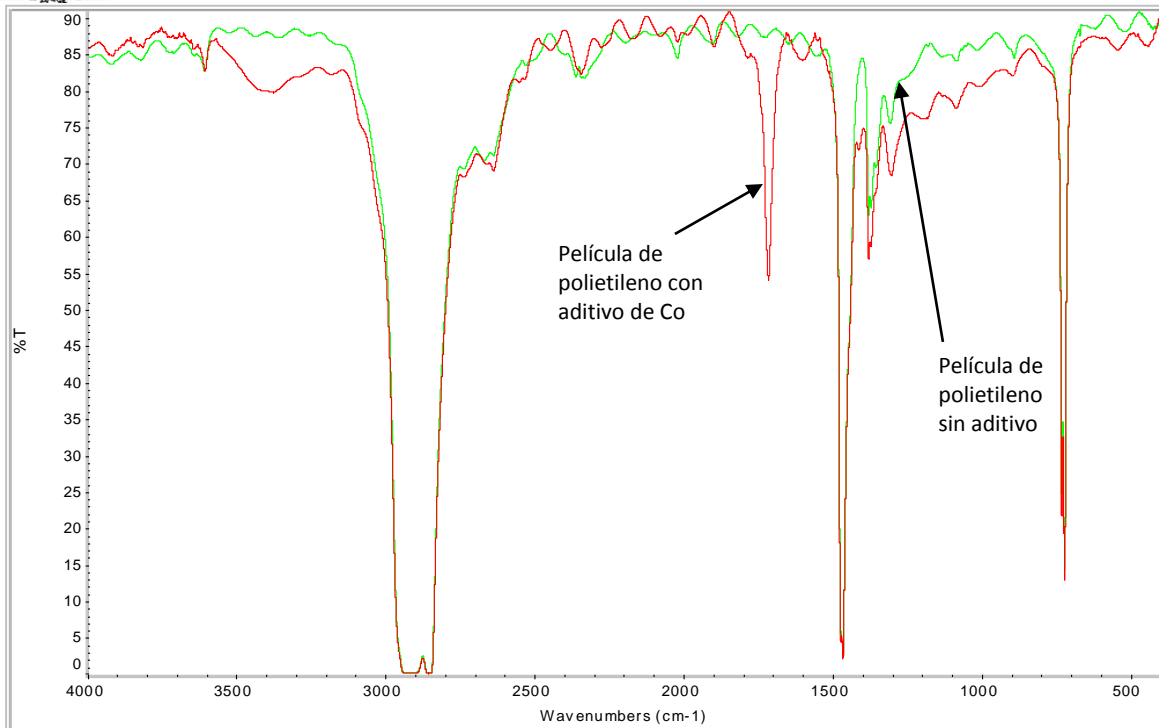


Figura 4. 19. Espectrograma comparativo de la diferencia entre la prueba de polietileno con aditivo y sin éste.

4.2.7.2. SEM

Se recurrió a la técnica analítica de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) para poder identificar visualmente la oxidación de la película debido al aditivo y a los efectos de la temperatura y humedad durante el proceso de compostaje.

En las imágenes de la figura 4.20, se muestran las micrografías de ambas películas antes de ser sometidas al proceso de compostaje. En la imagen A.1, que corresponde al polietileno, muestra una superficie limpia, sin fracturas o puntos que identifiquen la presencia de algún elemento diferente al carbono, el cual constituye a la película de PE. En la imagen A.2, correspondiente a la de PE con Co, muestra una superficie limpia, sin embargo se pudo apreciar unos puntos, los cuales indican la presencia del aditivo de Co.

Para tener un mejor análisis, se aumentó la energía de la lámpara para tener más luz y poder observar mejor la imagen, las cuales se muestra en la figura 4.20.B.

Muestra

Día 1

Polietileno sólo

Polietileno con Co

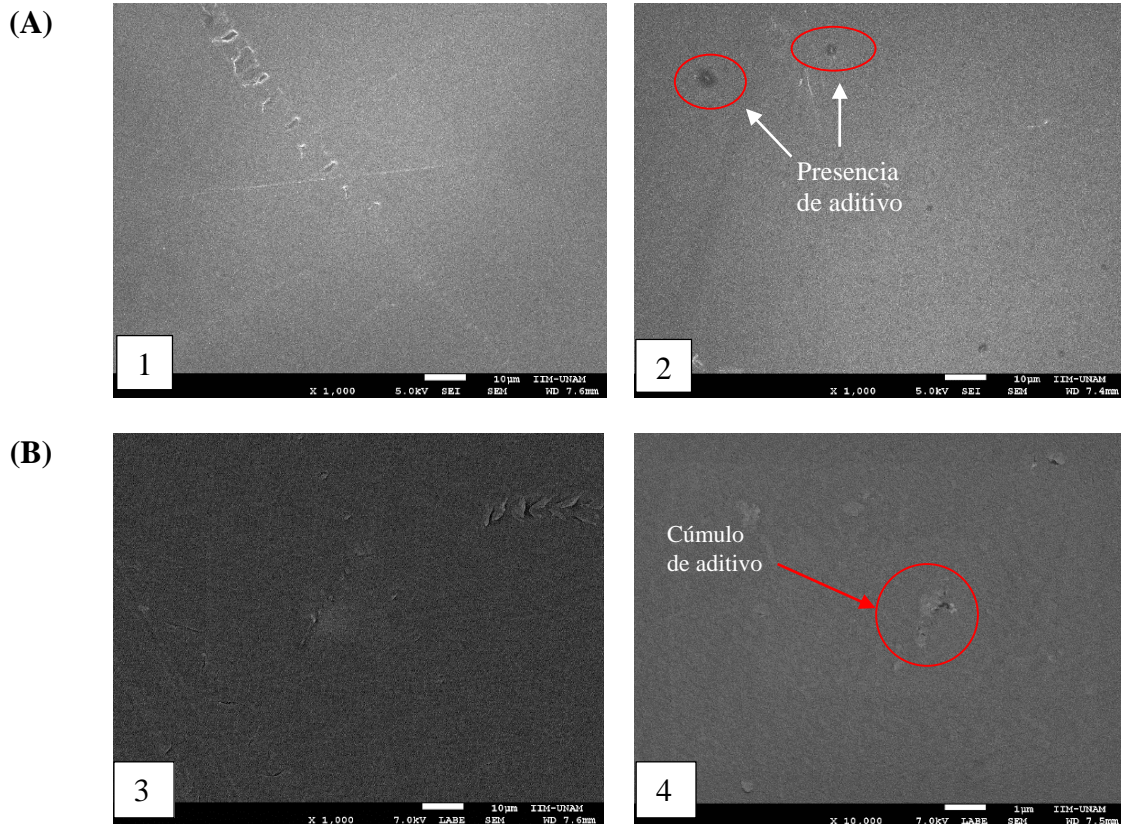


Figura 4. 20. SEM, (A) micrografías de las películas de PE iniciales antes de ser sometidas al proceso de compostaje, a 5 kV y (B) micrografías topográficas de las películas de PE iniciales antes de ser sometidas al proceso de compostaje, a 7 kV.

Se realizó un primer análisis de las películas en el proceso de compostaje al día 25, que corresponde a la etapa termoflica del proceso de compostaje, elevación de la temperatura. En la figura 4.21, se pueden observar los cambios en la película de polietileno con Co provocados por el proceso de compostaje, mientras que en la muestra sin aditivo no presentó ningún cambio.

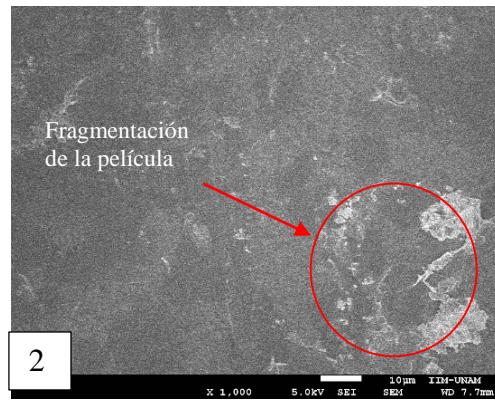
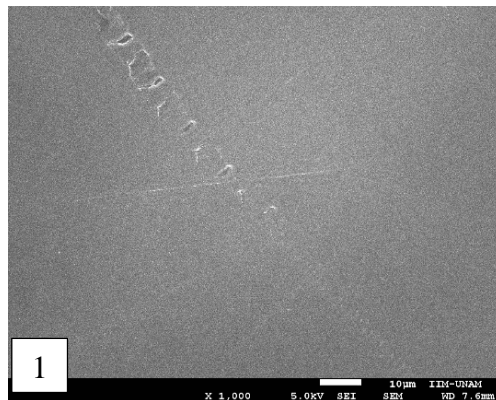
Día
25

Muestra

Polietileno sólo

Polietileno con Co

(A)



(B)

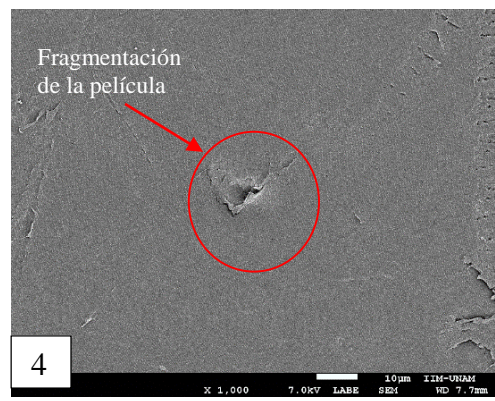
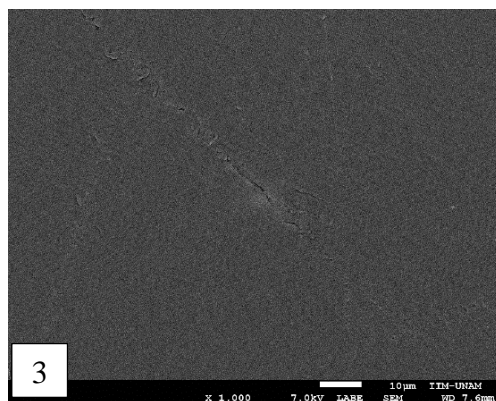


Figura 4. 21. SEM, (A) micrografías de las películas de polietileno a los 25 días en el proceso de compostaje, a 5 kV y (B) micrografías topográficas de las películas de polietileno a los 25 días en el proceso de compostaje, a 7kV.

El segundo análisis se realizó a los 45 días, figura 4.22, el cual correspondió a la fase final de la etapa termofílica y a la inicial de la de enfriamiento. Con este segundo análisis, se pudo hacer una comparativa inicial entre las dos fases; inicial, comienza la degradación de la FORSU, aumento de temperatura y pérdida de humedad. Termofílica, en la cual se tienen las temperaturas más elevadas y una humedad superior al 50%. Estas condiciones favorecieron a que el aditivo oxidara a la película de PE provocando el rompimiento de la misma en pequeños fragmentos.

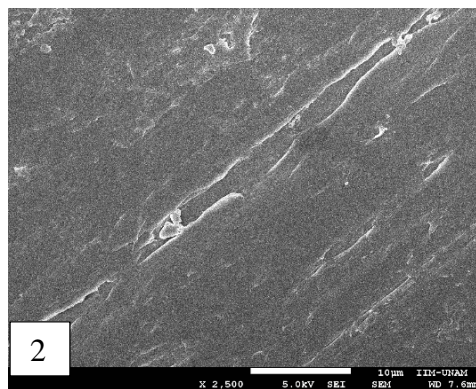
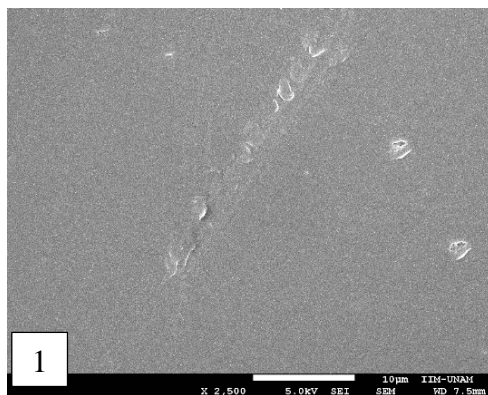
**Día
45**

Muestra

Polietileno sólo

Polietileno con Co

(A)



(B)

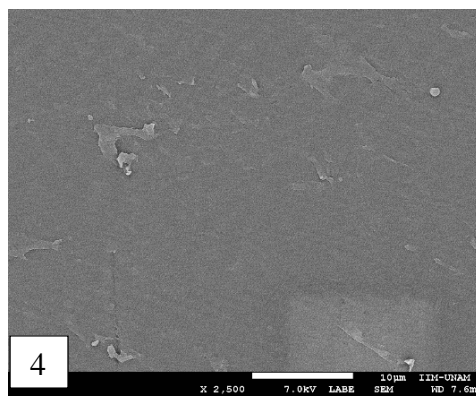
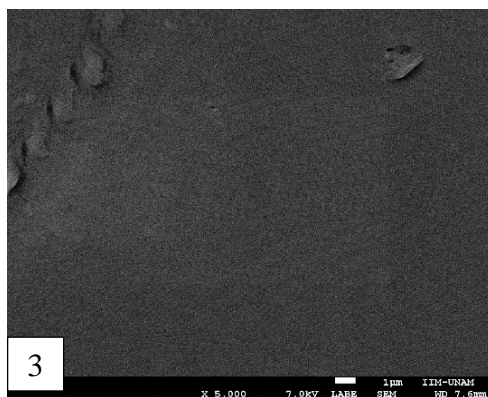


Figura 4. 22. SEM, (A) micrografías de las películas de polietileno a los 45 días en el proceso de compostaj, a 5 kV y (B) micrografías topográficas de las películas de polietileno a los 45 días en el proceso de compostaje, a 7 kV.

El tercer análisis se realizó a los 68 días, y correspondió enteramente a la etapa de enfriamiento del proceso, en la cual continuó la degradación de la película, a una velocidad menor a la que se había presentado anteriormente. Lo anterior se debió a la disminución de la temperatura, ocasionado por el bajo porcentaje de materia orgánica existente posible de ser consumida por los microorganismos, lo cual resulta en una disminución en la velocidad de degradación. La temperatura reportada en la etapa fue de 23 °C, aproximadamente con una humedad del 40%. Los resultados obtenidos por la técnica SEM se muestran en la figura 4.23.

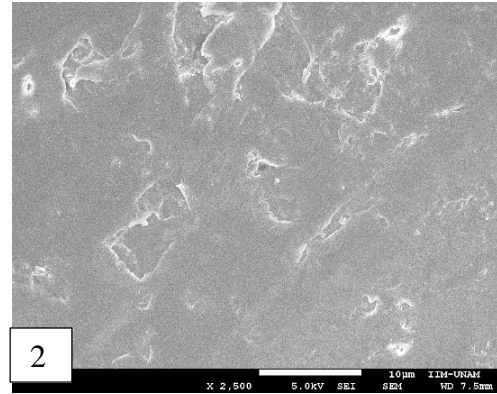
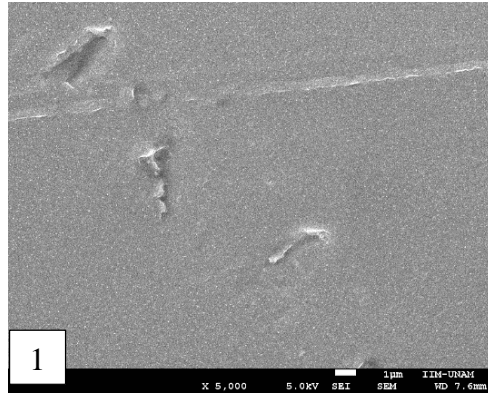
**Día
68**

Muestra

Polietileno sólo

Polietileno con Co

(A)



(B)

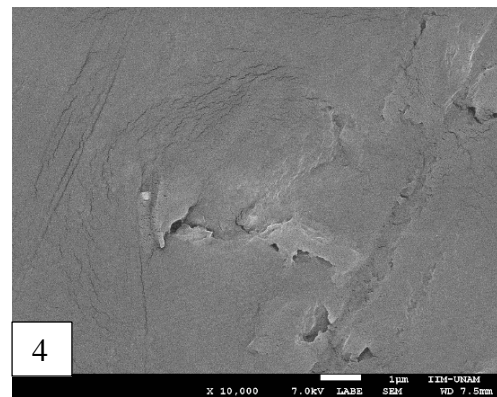
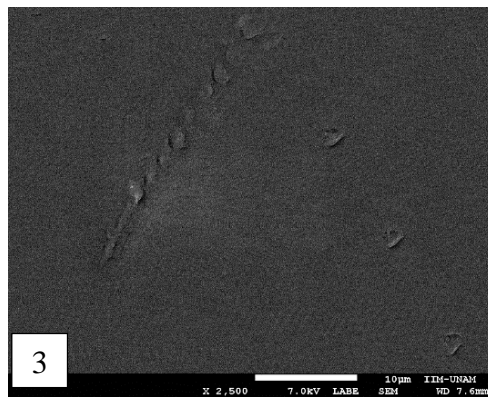


Figura 4. 23. SEM, (A) micrografías de las películas de polietileno a los 68 días en el proceso de compostaje, a 5 kV. (B) micrografías topográficas de las películas de polietileno a los 68 días en el proceso de compostaje, a 7 kV.

El cuarto análisis se realizó a los 80 días, el cual siguió correspondiendo a la etapa de enfriamiento. En ésta, la acción de la degradación de la película de PE con Co, continuó fragmentándola hasta el punto en el que sólo se pudo observar pequeños pedazos plásticos. Otro punto importante fue que la temperatura siguió disminuyendo, por la misma razón de la baja cantidad de residuos orgánicos y la disminución de los microorganismos que generan aumento de temperatura. A continuación se muestran en la figura 4.24, los resultados obtenidos por la técnica SEM.



**Día
80**

Muestra

Polietileno sólo

Polietileno con Co

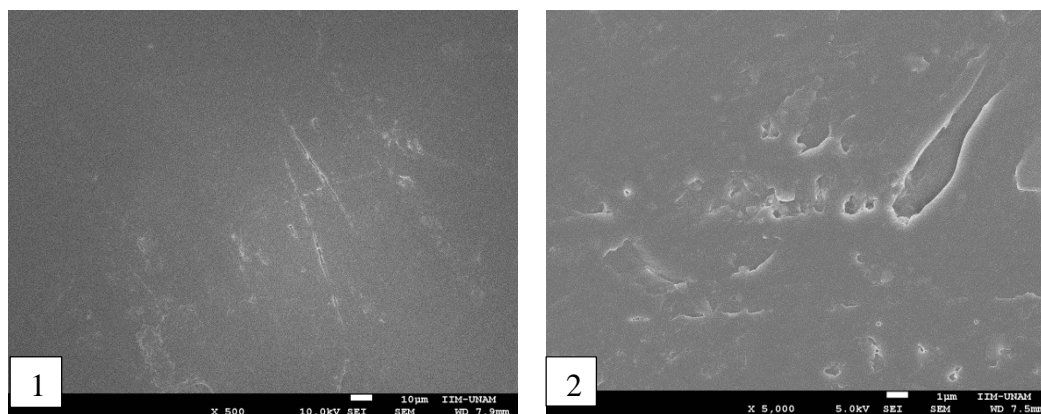


Figura 4. 24. SEM, micrografías de las películas de polietileno a los 80 días en el proceso de compostaje a 1) 500X, muestra de PE sólo y 2) 5000X, muestra con PE con Co.

El último análisis se realizó a los 90 días. En este punto, los residuos orgánicos han sido degradados casi en su totalidad, no así los restos de material lignocelulósico, el cual tarda más tiempo en ser degradado (6 meses). Por otra parte, la película de PE siguió presentando degradación, ya que visualmente se observó fragmentos más pequeños y se comprobó con SEM, figura 4.25. En éstos resultados, se mostró fracturas en la superficie de la película de PE con Co cada vez más grandes, indicando que la acción del aditivo continua fragmentando la cadena polimérica.

**Día
90**

Muestra

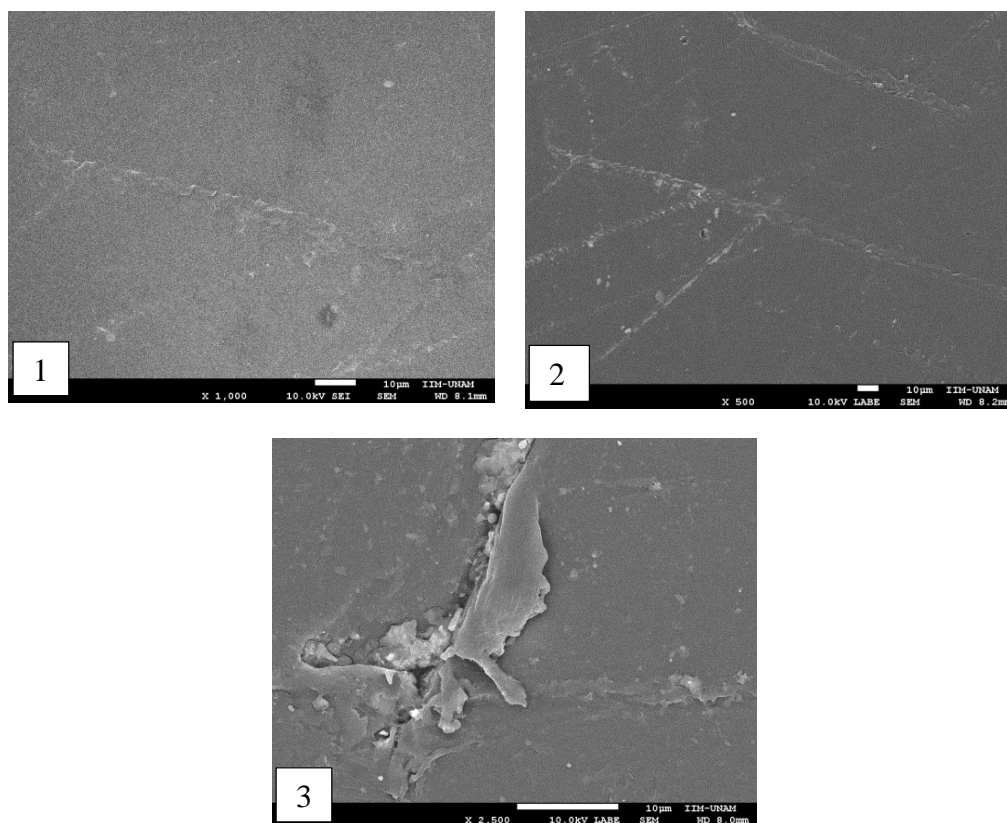


Figura 4. 25. SEM, micrografías de las películas de PE a los 90 días en el proceso de compostaje, a 1) 1000X, PE sólo y 2) 500X y 2500X, PE con Co.

4.2.7.3. Determinación de cobalto

La determinación del cobalto se realizó por medio de la técnica analítica, Espectroscopía de Absorción Atómica (EAA), las cuales se secaron, molieron, homogeneizaron y pesaron (0.5 g); posteriormente se les realizó una digestión con una mezcla de ácido H_2SO_4 y HNO_3 , más calor, para obtener el filtrado de la muestra el cual se analizó para determinar la concentración de Co, (figura 4.26), el procedimiento seguido se encuentra en el método NOM-AA-051-SCFRI-2001.



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Figura 4. 26. Fotografías, metodología seguida para la cuantificación de Co por EAA, a) secado de muestras en estufa, b) molienda de muestra, c) pesado de muestras, d) digestión de las muestras, e) obtención del filtrado de las muestras y f) determinación del metal.

Los resultados de la determinación de cobalto por la técnica de absorción atómica se muestran en la tabla 4.4. En la cual se observa la concentración de Co en cada etapa del proceso de compostaje.

Tabla 4. 4. Resultados de la cuantificación del metal cobalto a lo largo del proceso de compostaje.

DÍA	0	25	45	68	90
MUESTRA	µg/kg	µg/kg	µg/kg	µg/kg	µg/kg
CoSt	83556.9	83556.9	83556.9	83556.9	83556.9
P.E.+Co	141	141	141	141	141
FORSU	1000.9	1887.6	2219.7	3217.7	3375.7
FORSU+P.E.	1000.9	1793.9	1972.5	2748.9	2732
FORSU+P.E.+Co	1000.9	2568.9	3352.9	3421.5	3306.1



La concentración más alta de Co es la del CoSt y a partir de ésta se adicionó a la película de PE en una concentración entre el 1 al 5% en peso, dando una concentración de 141 $\mu\text{g}/\text{kg}$, la cual fue la más baja de todas. La concentración en la FORSU fue de 1000.9 $\mu\text{g}/\text{kg}$, siendo ésta la más alta de todas. Esto indica que tan sólo éstos contuvieron casi una octava de la concentración que se tuvo en el CoSt.

Realizada la determinación del metal cobalto en las muestras de residuos durante el proceso de compostaje, se percató que aunque se siguió la metodología de la norma NMX-AA-015-1985, método de cuarteo, para obtener muestras representativas, los resultados obtenidos mostraron diferencias marcadas entre ellas y sus réplicas, esto indica que por más que se homogenizó la toma de muestra para cada análisis, siguieron mostrando heterogeneidad entre ellas. Lo anterior se debe a la gran diversidad de los residuos orgánicos que se desechan, los cuales varían por razones indistintas. Esto demuestra la dificultad de obtener muestras representativas que sean cien por ciento homogéneas. Sumado también, a la diversidad inherente de los residuos, en la cual es posible que éstos contengan cobalto, pudiendo provocar que los resultados obtenidos no reflejen el impacto que tiene el aditivo de la película de plástico en la FORSU dentro el proceso de composteo.

Por tanto, el estudio realizado se quiso comparar con alguna referencia, pero lo que se encontró fue que no existe información de trabajos que hayan realizado estudios del análisis del Co dentro de la FORSU, ni en el proceso de compostaje. A falta de información para comparar, se decidió realizar una comparativa con investigaciones en suelos y la presencia de Co como un indicador de salud del suelo, en ellos se reportó un rango óptimo de éste entre 1 a 40 $\mu\text{g}/\text{kg}$. Al compararlo con lo obtenido en la FORSU, 1000.9 $\mu\text{g}/\text{kg}$, reflejó una excesiva concentración. La cual se pudo interpretar analizando la tabla 4.5, en donde al día cero o inicial las dos muestras presentaron la misma concentración de Co y a partir del día 25 en las muestras se identificó un aumento en la concentración de éste en las muestras con aditivo. El aumento en la concentración del metal se debió por dos razones, la primera por el aditivo contenido en la PE, que al ser fragmentado el Co queda como radical libre dentro de la FORSU y la segunda por la heterogeneidad de la FORSU, la cual contiene Co y al ser degradada lo libera. Lo anterior se corroboró al analizar las muestras control, en las que también se presentó el aumento. Esto se debe a que dentro de la matriz de la FORSU existe Co retenido dentro de la matriz estructural de ésta que por efecto de cargas positivas y negativas, impiden que éste se encuentre como catión libre en la matriz para poder ser cuantificado antes de iniciar la degradación de la materia orgánica.



Tabla 4. 5. Comparativa entre el control y la muestra.

DÍA		0	25	45	68	90
MUESTRA	TIPO	µg/kg	µg/kg	µg/kg	µg/kg	µg/kg
Control	FORSU+P.E.	1000.85	1793.89	1972.47	2748.91	2732.00
Muestra	FORSU+P.E.+Co	1000.85	2568.91	3352.89	3421.5	3306.13

Por lo tanto, si se considera que la concentración de Co va a estar determinada por el tipo de residuos orgánicos que se tengan y por la concentración del aditivo en la película, el cual no se encuentra repartido homogéneamente en la película, sino en cúmulos heterogéneos de éste; con lo cual se determinó que no todas las películas contienen la misma concentración de aditivo, ocasionando que la degradación de la película no sea de forma homogénea. Lo anterior se identificó al analizar las muestras mediante la técnica SEM.

Como resultado del proceso de compostear FORSU con película de PE con aditivo, se identificó que el Co se encontró retenido en la matriz de la composta y que la concentración de éste aumenta conforme avanza el proceso, sobrepasando la concentración de la muestra control a más del doble.

El aumento total de Co en el proceso de compostaje fue de un 25.15%. Siendo los factores responsables; la variación en la composición de los residuos, disponibilidad del Co dentro de la matriz de los mismos y la concentración del Co en la película. Lo anterior se comprobó al analizar los resultados estadísticos. Los cuales mostraron para el caso de la muestra control (FORSU), un aumento progresivo en la concentración de Co conforme los residuos orgánicos se van degradando en el proceso de compostaje, figura 4.27.

En el caso del control negativo (FORSU + P.E.), figura 4.28, el comportamiento mostrado es muy parecido al que sólo contiene FORSU, esto se debe a que éste contiene película de PE sin aditivo, la cual no aporta Co a la determinación.

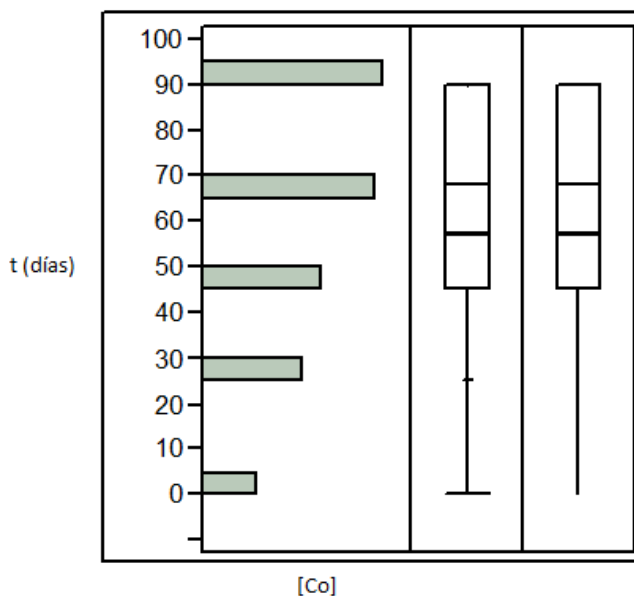


Figura 4. 27. Estadístico de distribución de la concentración de Co en la FORSU en el tiempo de experimentación (90 días).

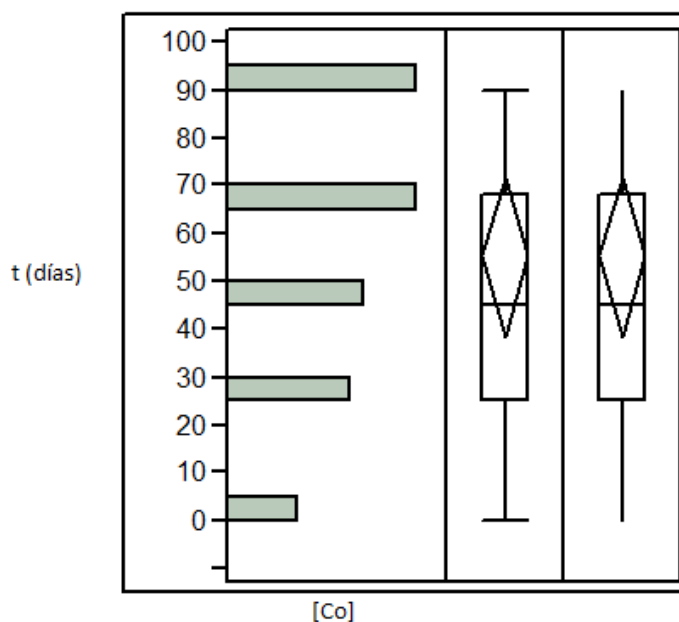


Figura 4. 28. Estadístico de distribución de la concentración de Co en la FORSU + P.E. en el tiempo de experimentación (90 días).

Por último, muestra (FORSU + P.E. + Co), se observa que el aumento en la concentración de Co es diferente al de las muestras anteriores, figura 4.29. Debido a que éste aumenta de forma progresiva a partir del día 1 al 35 y a partir de éste mostró un aumento drástico, el cual



permaneció constante para el resto del proceso de degradación. El aumento se debió a que los residuos en este punto se encontraban en la etapa termofílica del proceso de compostaje en la cual presenta las temperaturas más elevadas, también aumento en el pH y la mayor pérdida de humedad ocasionando que el aditivo reaccione por los cambios presentes en el medio y comience a acelerar la degradación de la película de PE con aditivo, dejando al Co como radical libre después de reaccionar en la composta.

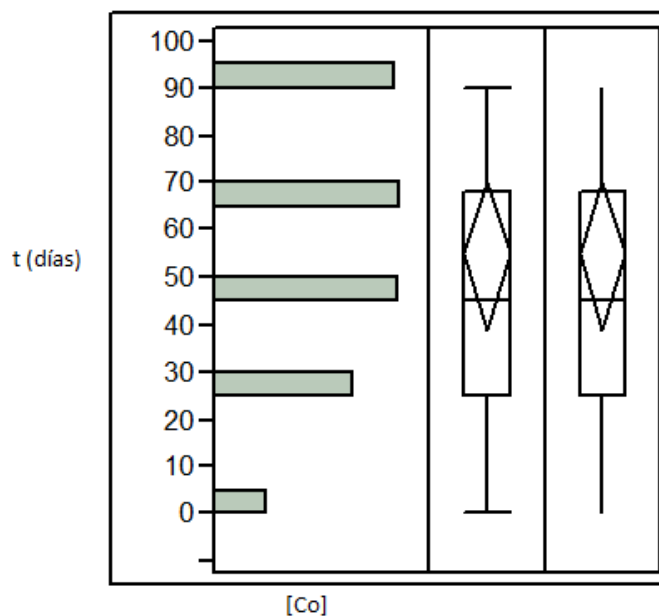


Figura 4. 29. Estadístico de distribución de la concentración de Co en la FORSU + P.E + Co. en el tiempo de experimentación (90 días).

Una vez analizados todos los resultados correspondientes al proceso de degradación, se puede decir que el proceso de compostaje y degradación tanto de los residuos orgánicos como de la película de PE con aditivo prodegradante fue el adecuado, ya que se obtuvo una composta de buena calidad y la película fue fragmentada y degradada, no en su totalidad pero en buena parte de ella, por la acción del Co, el cual quedó retenido en la matriz de la composta.

Sumado a lo anterior, el olor, color, textura y contenido de carbono y nitrógeno que fueron cambiando durante el proceso y que además sirvieron como indicadores del adecuado avance. Estos parámetros, al final del proceso de compostaje indicaron que éste fue realizado de forma adecuada, y que se logró llevar a cabo un buen compost a partir de la FORSU obtenida.



5. CONCLUSIONES

Se realizó el muestreo y caracterización de la FORSU recolectada en la planta de compostaje del relleno sanitario Bordo Poniente. La mezcla de FORSU utilizada en el experimento presentó una relación C/N de 29, la cual la ubican en una excelente posición dentro del intervalo requerido para materiales composteables, el cual es del orden de 20 a 30:1. Esta relación fue cambiando debido al proceso de degradación de la materia orgánica a lo largo del tiempo en el proceso de compostaje, hasta llegar a una relación final de C/N de 12, la cual corresponde a una composta dentro de la etapa de maduración y enfriamiento.

Se determinaron las condiciones y requerimientos necesarios para el proceso de compostaje. Las cuales fueron pH de 6, %H de 60, relación C/N de 29, temperatura de 32 °C, aireación dos veces por semana y aislamiento, ya que la escala 1:100, que son 10 kg de FORSU, es un volumen pequeño en el cual la pérdida energética, en forma de calor es alta.



Sumado a lo anterior, se determinaron el olor, color y textura, para poder evaluar visualmente el avance del proceso de composteo de la FORSU, el cual indicó un cambio en cada uno de ellos en cada una de las tres etapas del proceso de compostaje.

Se llevó a cabo la degradación de la película de PE de baja densidad (PEBD), no total, pero en gran parte y se determinó la degradación de la misma debido al aditivo pro-oxidante, estearato de cobalto (CoSt), en el proceso de compostaje. En éste mediante el índice de carbonilo (IC) y micrografía, utilizando las técnicas de Espectroscopia de Infrarrojo (FTIR) y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) respectivamente.

De las dos películas de polietileno de baja densidad con las que se experimentaron, la que contenía el aditivo de cobalto fue la que mostró oxidación en su estructura, ésta se obtuvo al determinar el IC. Éste mostró un valor máximo de 2.2, el cual es muy bueno según Montoya et al., 2010 y reportan que un IC arriba de 2 unidades es un valor de degradación alto. También explica que entre más grande es el valor del IC mayor es la oxidación de la película plástica y mayor es el rompimiento de la misma por el proceso de degradación.

Los cambios en la estructura química de las películas de PEBD con el aditivo pro-oxidante, fueron medidos a través del aumento o formación del índice de carbonilo, cuyos resultados se mostraron en el capítulo 4. Durante los primeros 2 días de experimentación, no presentan un aumento considerable en el índice de carbonilo, pero en el día 5, presentan un incremento y a partir de ahí permanece constante hasta los 72 días de proceso, este comportamiento muestra que la película con Co presenta una sensibilidad a la oxidación provocada por el aditivo, el cual acelera la degradación y el rompimiento de la película. Para el caso de la película de polietileno, esta muestra no presenta ningún indicio de oxidación, presentando nula banda de carbonilo. Este resultado muestra la resistencia del polietileno a la degradación del ambiente, por eso su gran estabilidad y durabilidad a lo largo de los años.

La ubicación del metal cobalto se pudo llevar a cabo mediante la espectroscopia de absorción atómica. En un inicio, el metal contenido en la película plástica se ubicó en la misma película, conforme fue avanzando el proceso de degradación y fragmentación de ésta en el compostaje, el metal cobalto fue migrando a los residuos orgánicos, para al final, quedarse retenido en la matriz de la composta.



6. REFERENCIAS

- Aamer, A. S., Fariha, H., Hameed, A., Ahmed, S. (2008), Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances* 26. Issues 3, pp. 246 - 265. Pakistan
- Ammala A., Batemans S., Dean K., Petinashis E. Sangwa P., Wong S., Yuan Q., Yu Li, Patrick L., Leong K. H., (2011). An overview of degradable and biodegradable polyolefins, *Progress in Polymer Science* vol. 36, pp 1015-1049. Australia.
- ASTM D 5510-01 "Standard Practice for Heat Aging of Oxidatively Degradable Plastic.
- ASTM D 6400-04 "Standard specification for compostable plastics"
- Avila, N. N., Gallo G. A., Arnal L. M., Sánchez J. J., Müller J. A. (2011). *Influencia de la incorporación de un aditivo "oxo" en un polietileno lineal de baja densidad grado película*. Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela. *Rev. Latin Matal. Mat.*
- Balasubramanian Suresh., S. Maruthamuthu, Alike Khare, N Palanisamy, V. S.Muralidharan, R. Rangunathan, M. Kannan, K. Navaneetha Pandiyaraj., (2011). Influence of thermal oxidation on surface and thermo-mechanical properties of polyethylene. *J Polym Res* 18:2175-2184.
- Chang Raymond. (1999), *Química*. Sexta edición. Mc GrawHill.
- Duffus J. H. (2002), *"Heavy Metals", A Meaningless Term*, (IUPAC Technical Report) "Pure Applied Chemistry, Vol. 74, pp. 793-807.



Eder P., (2006), Case study-compost, in: End of Waste Project. Institute for Prospective Technological Studies, DG Joint Research Institute. September 2006, <http://www.jrc.ec.europa.eu>.

EPR, 2009 European Plastic Recyclers, Oxodegradable additives are incompatible with mechanical recycling. <http://www.plasticsrecyclers.eu/docs/press%20release/EuPR%20Press%20Release%20%20OXO%20Degradables%20Incompatibility%20with%20Plastics%20Recycling.pdf>.

FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación 2012. Cambio climático y Sostenibilidad Ambiental. Taller de técnicas de compostaje Uruguay 2012.

Fontanella S., Bonhomme S., Koutny M., Husarova L., Brusson J-M., Courdavault J-P., Pitteri S., Samuel G., Pichon G., Lemaire J., Delort A-M., (2010). Comparison of the biodegradability of various polyethylene films containing pro-oxidant additives. *Polymer Degradation and Stability* 95. Pp. 1011-1021.

Harold A. W., Bryan G. R., (1995), *Productos químicos orgánicos industriales*. Limusa Noriega Editores.

Hsu Yu-Chien., P. Weir W, W. Truss R., J. Garvey C., M. M. Nicholson T., J. Halley P., (2012). A fundamental study on photo-oxidative degradation of linear low-density polyethylene films at ambient temperature. *Polymer* 53, 2385-2393.

INE, 2009. Instituto Nacional de Ecología, Estudio comparativo de bolsas de plástico degradable versus convencionales, mediante la herramienta del ACD, Análisis de Ciclo de Vida. En línea: www.ine.gob.mx/descargas/dgcneca/estudio_comp_bolsas.pdf.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (2010). *Encuesta Industrial Mensual Ampliada*, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Diciembre, 2010.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (2011), Información por Entidad, Distrito Federal. <http://buscador.inegi.org.mx/search>.

Ishigaki T., Sugano W., Nakanishi A., Tateda M., Ike M., Fujita M., (2004). The degradability of biodegradable plastics in aerobic and anaerobic waste landfill model reactors. *Chemosphere* 54. P.p 225-233.

Kountny Marek, Jacques Lemaire y Anne-Marie Delort, (2006), Biodegradation of polyethylene films with prooxidant additives. Centre National d'Evaluation de Photoprotection (CNEP), Université Blaise Pascal, 63 177 Aubiere cedex, France.

Lenntech. Elementos (2014), Cobalto, <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/co.htm>

Magagula, B., Nhlapu, N., Focke, W.W, (2009), Mn₂Al-LDH and Co₂Al-LDH stearate as photodegradants for LDPE film. *Polymer Degradation and Stability*. Vol. 94, 947-954. Africa del Sur.

Montoya M. C., Álvarez-Laínez M., (2010). Preparación, caracterización y degradación de mezclas entre termoplástico de almidón (TPS) y polietileno de baja densidad (LDPE). Grupo de Investigación en Materiales de Ingeniería. Medellín Colombia.



- Nikolic, M., Gauthier, E., George, K., Cash, G., de Jonge, M.D., Howard, D.L., Paterson, D., Laycock, B., Halley, P.J., George, G. (2012), Antagonism between transition metal pro-oxidants in polyethylene films. *Polymer Degradation and Stability* 97(7) 1178- 1188.
- OECD Factbook (2013). Economic, Environmental and Social Statistics. Disponible en www.oecd.org/publications/factbook_18147364.
- Olayan H. B., Hamid H. S., Owen ED. (1996). Photochemical and thermal crosslinking of polymers, *J. Macromol Sci. Rev. Macromol Chem Phys* 36: 671-719.
- OPS, Organización Panamericana para la Salud, (1999). Manual para la elaboración de compost bases conceptuales y procedimiento. América y el Caribe
- Orta L. M. T., Saucedo C. G., Tovar G. L R. (2010). Composición y generación de residuos sólidos en la Ciudad de México.
- Pablos J. L., Abrusci C., Marín I., J. López-Marín, F. Catalina, Espí E., Correles T., (2010). Photodegradation of polyethylenes: Comparative effect of Fe and Ca stearates as pro-oxidant additives. *Polymer Degradation and Stability* 95. Pp 2057-2064.
- Pospisil J., Nespurek S., (1997), Highlights in chemistry and physics of polymer stabilization, *Macromol Symp* 1997, 115:143-63.
- Phipps D. A., (1981), *Chemistry and biochemistry of trace metals in biological systems, in Effect of Heavy Metal Pollution on Plants*, Applied Science Publishers. Reino Unido.
- Rabell-Contreras, A. Vázquez-Morilla, R. M. Espinoza Valdemar, M. Beltrán Villavicencio, M. H. Osada Velazquez, J. U. González Filio (2011). Estudio de la factibilidad de la biodegradación de plásticos mediante composteo. Hacia la sustentabilidad: Los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima. Pp. 519-523. ISBN: 978-607-015-4.
- Ramos-González, D. P. (2012). Trituración de la fracción orgánica de los residuos orgánicos de la Ciudad de México y la producción de biogás. Instituto de Ingeniería, UNAM. México.
- Rivas Solano, O. Faith Vargas, M. Guillen Watson, R., (2010). Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. *Tecnología en Marcha*, Vol 23, N°1, Pp. 39-46.
- Rudnik, E. (2008). 10-Compostable Polymer Materials: Definitions, Structures, and Methods of Preparation. *Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics*. 189 (2) 211
- Sedesol (2012). Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en zonas Urbano-Marginadas. México.
- SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2009). El medio ambiente en México. Resumen de Informe. En línea. http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/Documents/sniarn_2010/pdf/en_resumen_2009.pdf



SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2010). Bitácora de la Cuenca del Valle de México. http://www.semarnat.gob.mx/temas/ordenamientoecologico/Documents/bitacora_cuenca_valle_mexico/diagnostico_final%20marzo_6.pdf.

SEMARNAT, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2011). Acuerdo por el que se expiden los criterios y normas de producción y consumo sustentable de los productos plásticos, http://www.sedema.df.gob.mx/sedema/images/archivos/sedema/leyes-reglamentos/acuerdos/acuerdo_G_productosplasticos.pdf. Consulta: julio de 2011.

SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2012). Informe http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Cap7_residuos.pdf

SMA (2008). Agenda Ambiental de la Ciudad de México, Programa Sectorial del Medio Ambiente 2007 – 2012. Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal.

SOBSE, Secretaría de Obras y Servicios. (2004). Cierre de la Etapa V del relleno sanitario Bordo Poniente. Informe Preventivo. México D.F. pp. 61.

Schrader B., (1995), Infrared and Raman Spectroscopy, VCH, New York, 1995, p.2 y ss.

Skoog D. A., Holler F. J., Nieman T. A., (2001), Principios de análisis instrumental. Quinta edición. McGrawHill.

Scott J. S. and Smith P. G., (1981), Dictionary of Waste and Water Treatment, Butterworths, 1981.

Stevenson L. H. and Wyman B., (1991). The Facts on File Dictionary of Environmental Science, Facts on File.

Ojeda, T., Freitas, A., Birck, K., Dalmolin, E., Jacques, R., Bento, F., Camargo, F. (2011), Degradability of linear polyolefins under natural weathering. Polymer Degradation and Stability. 703 (4) 707

Terra, fundación. (2003), Perspectiva Ambiental. Compostaje <http://www.ecotierra.org>.

Thornton I., (1995), Metals in the Global Environment-Facts and Misconceptions, ICME, Ottawa.

Tuomela M., (2002), Degradation of lignin and other ¹⁴C-labelled compounds in compost and soil with an emphasis on white-rot fungi, Academic dissertation in microbiology. Helsinki.

Yashchuk O., Portillo F.S., Hermida E. B., (2012). Degradation of polyethylene film samples containing oxo-degradable additives. Procedian Materials Science 1. Pp. 439-445.