



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

BIODEGRADABILIDAD DE AGROPLÁSTICOS UTILIZADOS EN LA AGRICULTURA
PROTEGIDA EN EL CAMPO MEXICANO

TESIS

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

PRESENTA:
DELGADO LÓPEZ CHRISTIAN AXEL

TUTOR PRINCIPAL
DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ, FI-UNAM

COMITÉ TUTOR
DRA. IRMA C. GAVILÁN GARCÍA, FQ-UNAM
DRA. MARÍA TERESA ORTA LEDESMA, II-UNAM
M. en E. PATRICIA ISABEL ROMERO MARES, IIMAS-UNAM
DRA. ANA ELISA SILVA MARTÍNEZ, FI-UNAM

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Gavilán García Irma Cruz

Secretario: Dra. Orta Ledesma María Teresa

Vocal: Dra. Silva Martínez Ana Elisa

1^{er}. suplente: M. en E. Romero Mares Patricia I.

2^{do}. suplente: Dra. Fernández Villagómez Georgina

Lugar donde se realizó la tesis: Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, CDMX

TUTOR DE TESIS:

Dra. Fernández Villagómez Georgina

FIRMA

AGRADECIMIENTOS ACADÉMICOS

Principalmente quiero agradecer el apoyo constante que me brindó la Dra. Irma Gavilán, por creer en mí y ayudarme a sacar adelante el presente trabajo, sin su apoyo y palabras de aliento sin duda habría sido más difícil. También agradecer a mi tutora, la Dra. Georgina Fernández por creer en el trabajo que se propuso y por facilitar los medios materiales necesarios para arrancar el proyecto.

Especiales agradecimientos a diversos miembros del Instituto de Ingeniería (Dr. Alberto Noyola y Mta. Margarita Cisneros) por permitirme realizar el análisis por cromatografía de gases en sus instalaciones. Al Dr. Simón González por proporcionar material indispensable para desarrollar el trabajo experimental. A la Dra. Teresa Orta por su ayuda con las determinaciones de COT de las muestras antes y después del proceso al que fueron sometidas.

Gracias al Dr. Alfonso Durán y a la Mta. Landy Ramírez por permitirme realizar las determinaciones de nitrógeno total utilizando el equipo Kjeldahl de su laboratorio.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

Principalmente a Dios, porque siempre me bendice y nunca me ha dejado solo en los momentos más difíciles que he pasado, incluyendo mi vida académica donde siempre me pone en alto.

A mis padres, que siempre están para mí en las buenas y en las malas, porque me apoyan sin dudarlos y porque siempre han estado a lo largo de mi vida, trabajando y sacrificando tanto para que yo salga adelante. Siempre podrán estar tranquilos porque todos sus sacrificios y enseñanzas dan buenos frutos, los amo.

A mis hermanos, porque sin dudarlos estuvieron para mí en todo momento y porque siempre forman parte importante en mi vida. Me dan esa alegría y ganas de vivir que solo ellos pueden contagiar con su amor y ocurrencia.

A la persona más maravillosa que he encontrado en este mundo, Rubén. Eres la persona más noble, gentil, sensible, sencilla, brillante y hermosa que Dios me ha dado en la vida para ser feliz, un muy buen ejemplo de persona. Gracias por apoyarme en todo lo que puedes, por no abandonar nuestro pacto en los momentos más difíciles que hemos pasado, gracias por estar para mí y demostrarme lo mucho que importo y que valgo, por ser la única persona que me da la alegría suficiente para disfrutar la vida a pesar de lo tumultuosa y dura que puede llegar a ponerse. A ti te doy el resto de mis días, le das a mi vida el equilibrio que necesitaba y contigo siento paz, tranquilidad, amor, plenitud y alegría y contigo quiero compartir mis triunfos y fracasos, eres luz en mi vida.



ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. Planteamiento del problema.....	7
1.2. Objetivos.....	9
1.2.1. Objetivo general.	9
1.2.2. Objetivos particulares.....	9
1.2.3. Alcances y limitaciones.....	9
1.3. Hipótesis.....	9
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y JURÍDICO.	10
2.1. Marco Teórico.....	10
2.1.1. Antecedentes (agricultura protegida).....	10
2.1.2. Antecedentes sobre los plásticos (Polietileno, LDPE y PLA).	12
2.2. Agroplásticos de uso en México.	19
2.3. Tipo de aplicaciones de agroplásticos.	20
2.3.1. Agroplásticos a base de Polietileno de Baja Densidad (LDPE).....	23
2.3.2. Otros tipos de plásticos usados en plásticos agrícolas.	25
2.4. Plásticos biodegradables y agroplásticos biodegradables.	25
2.4.1. Biodegradación y tipos de biodegradación.....	28
2.4.2. Propiedades de los plásticos degradables.	31
2.4.3. Aplicaciones de los plásticos degradables.....	32
2.5. Relleno sanitario y condiciones a simular.....	33
2.5.1. Residuos de manejo especial.....	34
2.5.2. Digestión Anaerobia.....	34
2.5.3. Producción de biogás.....	36
2.6. Marco Jurídico.....	37
2.6.1. Artículos Constitucionales.	37
2.6.2. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR, 2018).....	38
2.6.3. Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (RLGPGIR, 2014).	38
2.6.4. Normas Oficiales Mexicanas (NOM´s), ASTM e ISO.	39



CAPITULO 3. METODOLOGÍA	42
3.1. Etapas de la metodología	42
3.2. Adaptación de la norma ASTM D5526-12	43
3.3. Proveedores de plásticos agrícolas comerciales (material convencional y biodegradable)	45
3.4. Adquisición de agroplásticos (convencional y biodegradables)	46
3.5. Determinación del peso molecular de las muestras agrícolas biodegradables	48
3.6. Obtención de la fracción orgánica y del inóculo anaerobio	49
3.7. Molienda de fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU)	50
3.8. Caracterización de la FORSU e inóculo anaerobio	51
3.9. Diseño estadístico experimental	53
3.10. Pruebas presuntivas	55
3.11. Arranque de sistema	57
3.11.1. Preparación de reactores adaptando las proporciones de la norma ASTM D5526-12 (FO+inóculo+Agroplástico)	57
3.11.2. Instalación del sistema y de captura de biogás	59
3.12. Operación del sistema anaerobio	62
3.12.1. Experimentación y lectura diaria de volumen	62
3.12.2. Análisis de la composición de biogás una vez iniciado el proceso	63
3.13. Paro del proceso anaerobio	64
3.13.1. Desmonte del sistema	64
3.13.2. Remoción del material de prueba y comparación con su estado inicial	65
3.14. Cálculo del porcentaje de biodegradación de las muestras agroplásticas puestas a prueba de acuerdo con la norma ASTM D5526-12	65
3.14.1. Cuantificación de la producción de CH₄ y CO₂ por los reactores	65
3.14.2. Determinación del carbono total teórico o carbono inicial del material de análisis	66
3.14.3. Identificación del material de prueba biodegradable de manera anaerobia y estimación del %BD de dicho material	67
3.14.4. Balance de masa de carbono	68
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y SU ANÁLISIS	70



4.1. Determinación del peso molecular de las muestras agrícolas biodegradables 70

4.2. Caracterización de FORSU e inóculo anaerobio..... 71

4.2. Pruebas presuntivas 73

4.3. Diseño estadístico experimental 79

4.4. Comparación visual y física del material de prueba inicial y después del proceso de biodegradación..... 84

4.5. Cálculo del %BD de las muestras agroplásticas puestas a prueba de acuerdo a la norma ASTM D5526-12, carbono teórico y balance de masa de C86

CONCLUSIONES..... 94

ANEXO FOTOGRÁFICO Y DE PROGRAMACIÓN..... 96

REFERENCIAS 103

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y JURÍDICO

Figura 2. 1. Agroplásticos desechados en campos del Valle de San Quintín, Baja California Norte. Fuente: (López y SEMARNAT, 2012). 12

Figura 2. 2. Cadena polimérica a partir de monómeros. Fuente: (Treviño, 2016)..... 12

Figura 2. 3. Estructura del ácido poliláctico (PLA). Fuente: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/08/poliacido-lactico-pla.html> 16

Figura 2. 4. PLA para elaborar plásticos biodegradables de uso agrícola. Fuente: (BASF, 2013). 17

Figura 2. 5. Plástico acolchado. Fuente: (López y SEMARNAT, 2012). 21

Figura 2. 6. Microtúnel y macrotúnel respectivamente. Fuente: (López y SEMARNAT, 2012). 21

Figura 2. 7. Malla. Fuente: (Gómez & Arellano, 2014)..... 21

Figura 2. 8. Cinta de riego por goteo. Fuente: (López & SEMARNAT, 2012)..... 22

Figura 2. 9. Invernadero y plástico para invernadero. Fuente: (Gómez & Arellano, 2014). 22

Figura 2. 10. Bolsas de cultivo y rafia, respectivamente. Fuente: (Gómez y Arellano, 2014)..... 23

Figura 2. 11. Biodegradación aerobia y anaerobia de plásticos. Fuente: (Vázquez et. al., 2014)..... 31

Figura 2. 12. Etapas del proceso de digestión anaerobia. Fuente: (Friedrich, 2014)..... 35

Figura 2. 13. Fases del proceso de descomposición de residuos orgánicos en un relleno sanitario. Adaptado de: (Camargo y Vélez, 2009)..... 36

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

Figura 3. 1. Metodología general del trabajo de tesis. Fuente: Elaboración propia..... 42

Figura 3. 2. Producción acumulada de biogás (300 días) para 1 kg de FORSU pre-tratada más inóculo anaerobio mesofílico sin material de prueba (blanco) y con celulosa (control positivo). Fuente: (ASTM International, 2012)..... 44



Figura 3. 3. Muestras disponibles de agroplásticos convencionales: a) con paso de luz UV, b) con paso de luz del 30% y c) con paso de luz del 50%..... 47

Figura 3. 4. Muestra seleccionada de agroplástico opaco 47

Figura 3. 5. Agroplásticos biodegradables adquiridas: a) y b) Agroplástico a base de materiales del proveedor 1, c) y d)) Agroplástico del proveedor 2 48

Figura 3. 6. FORSU recolectada y almacenada 50

Figura 3. 7. . Fracción de la muestra de inóculo anaerobio obtenido..... 50

Figura 3. 8. Fracción orgánica luego de la molienda 51

Figura 3. 9. Determinaciones analíticas para la caracterización: a) y b) DQO; c), d) y e) Nitrógeno total por Kjeldhal; f) y g) STT, STV y STF; h) % Humedad; i) Disoluciones. 52

Figura 3. 10. Esquema de diseño experimental en “Parcelas divididas”. Fuente: Elaboración propia 54

Figura 3. 11. Bolsas de plástico biodegradable utilizadas para simular el plástico agrícola biodegradable en las pruebas presuntivas 55

Figura 3. 12. Especificaciones del tiempo de biodegradación del producto..... 56

Figura 3. 13. Sistema con policarbonato adaptado para fijar los matraces..... 57

Figura 3. 14. Doce reactores preparados con la mezcla de FO+inóculo+agroplásticos en las proporciones adaptadas de la norma ASTM D5526-12 58

Figura 3. 15. Reactores con agroplástico convencional (izquierda) y biodegradable (derecha) 58

Figura 3. 16. Esquema de diseño del sistema 60

Figura 3. 17. Baño María donde se instalaron los reactores para las pruebas de biodegradación de muestras agroplásticas..... 60

Figura 3. 18. Punzocat acondicionado para tomar la muestras de biogás 61

Figura 3. 19. Sistema experimental armado 62

Figura 3. 20. Sistema experimental armado (lateral izquierdo y lateral derecho respectivamente) 62

Figura 3. 21. Estabilización y arranque del sistema experimental..... 63

Figura 3. 22. Cromatógrafo de gases donde se analizó la composición del biogás 64

Figura 3. 23. Balance de masa del carbono en el proceso de biodegradación. 69

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Figura 4. 1. Volumen inicial de reactores R1:PACONV y R2:PACONV 74

Figura 4. 2. Volumen inicial de reactores R3:PABIO y R3:PABIO 74

Figura 4. 3. Volumen a la 7° semana de experimentación de reactores con agroplástico convencional 75

Figura 4. 4. Volumen a la 7° semana de experimentación de reactores con bolsas de plástico biodegradable 75

Figura 4. 5. Antes (foto superior) y después (foto inferior) del material de prueba luego del proceso de biodegradación: a) celulosa o aserrín (S1), b) agroplástico convencional (S2), c) agroplástico biodegradable proveedor 1 (S3) y d) agroplástico biodegradable proveedor 2 (S4)..... 84

Figura 4. 6. Material de prueba (fila=rep. 1-3): columna a) agroplástico convencional, b) agroplástico biodegradable proveedor 1 y c) agroplástico biodegradable proveedor 2 85

ÍNDICE DE TABLAS



CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y JURÍDICO

Tabla 2. 1 Tipos de plásticos, usos, aplicaciones y estructura. 14

Tabla 2. 2. Tipos de agroplásticos generados en México..... 19

Tabla 2. 3. Estudio de la generación de agroplásticos por CIQA (2008-2010). 20

Tabla 2. 4. Tipos de agroplásticos de polietileno utilizados en agricultura protegida..... 23

Tabla 2. 5. Tipos de aditivos para plásticos..... 24

Tabla 2. 6. Bioplásticos representativos y sus propiedades..... 33

Tabla 2. 7. Porcentaje de los componentes del gas producido en un relleno sanitario. 37

Tabla 2. 8. Métodos de prueba estandarizados para plásticos biodegradables..... 40

Tabla 2. 9. Cribado de métodos de prueba estandarizados para plásticos biodegradables en procesos anaerobios y aerobio. 41

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

Tabla 3. 1. Proveedores seleccionados para la adquisición del material..... 45

Tabla 3. 2. Caracterización de inóculo anaerobio y FORSU de acuerdo a la norma ASTM D5526-12 51

Tabla 3. 3. Sustratos aplicados como tratamiento a la mezcla (FO+inóculo+sustrato) 59

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Tabla 4. 1. Resultados obtenidos de la determinación del peso molecular de la muestra S4 realizada por el CIQA..... 70

Tabla 4. 2. Resultados obtenidos de la caracterización del inóculo anaerobio y de la FORSU..... 72

Tabla 4. 3. Valores de DQO y SVT/STT comparando la presente investigación 72

Tabla 4. 4. Volumen de biogás producido semanalmente para cada reactor hasta la semana 10 de experimentación 76

Tabla 4. 5. Volumen acumulado de biogás producido para cada reactor hasta la semana 10 de experimentación 76

Tabla 4. 6. Volumen acumulado semanalmente de cada muestra agroplástica (sustrato)..... 79

Tabla 4. 7. ANOVA del modelo estadístico experimental por “Parcelas Divididas” aplicado 80

Tabla 4. 8. Análisis estadístico mediante prueba de SNK para la interacción sustrato:tiempo del modelo por parcelas divididas 82

Tabla 4. 9. Producción total acumulada de biogás, metano y dióxido de carbono por reactor 86

Tabla 4. 10. Balance de masa (g) de los reactores sometidos al proceso anaerobio de biodegradación..... 90

Tabla 4. 11. Balance de carbono durante proceso anaerobio de biodegradación y cálculo del %BD 90

Tabla 4. 12. Valores de %BD para diversos trabajos con materiales plásticos biodegradables en reactores anaerobios simulando condiciones de relleno sanitario 92



ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4. 1. Volumen de biogás producido semanalmente para cada reactor hasta la 7ª semana	77
Gráfico 4. 2. Volumen acumulado de biogás producido para cada reactor hasta la 7ª semana	77
Gráfico 4. 3. Volumen de biogás producido semanalmente para cada reactor hasta la 10ª semana	78
Gráfico 4. 4. Volumen acumulado de biogás producido para cada reactor hasta la 10ª semana	78
Gráfico 4. 5. Volumen promedio acumulado de biogás producido por cada sustrato (celulosa o agroplástico) a través del tiempo.....	80
Gráfico 4. 6. Volumen promedio de las repeticiones de cada sustrato aplicado a través del tiempo	81
Gráfico 4. 7. Volumen total acumulado de biogás de cada reactor.....	86
Gráfico 4. 8. Producción total de metano (CH ₄) de cada reactor	87
Gráfico 4. 9. Producción total de dióxido de carbono (CO ₂) de cada reactor.	88
Gráfico 4. 10. Comparación de la producción total de CH ₄ y CO ₂	88



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema.

La *agroplasticultura* está identificada como una estrategia de adaptación al cambio climático en la agricultura, por lo que existen programas públicos institucionales que apoyan las técnicas productivas con agroplásticos (SAGARPA U. F., 2015). Las principales ventajas del uso de agroplásticos son: ahorro de agua, incremento en la producción total, protección de contingencias meteorológicas, además de un control de plagas, enfermedades y malezas, sin embargo, los residuos generados son abandonados a la intemperie en los campos de cultivo y barrancas, desechados a cielo abierto en tiraderos clandestinos y en el mejor de los casos en rellenos sanitarios (Gómez y Arellano, 2014).

La Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2013 clasifica como residuos de manejo especial a aquellos generados por las actividades pesqueras, agrícolas, silvícolas, forestales, avícolas, ganaderas, incluyendo los residuos de los insumos utilizados en esas actividades. El listado de residuos de manejo especial de esta norma sujetos a plan de manejo, en su Anexo Normativo, inciso dos, establece que se consideran residuos de manejo especial “Los residuos agroplásticos generados por las actividades intensivas, agrícolas, silvícolas y forestales” (DOF, 2011).

Gómez y Arellano, en su publicación del 2014, mencionan que el abandono de agroplásticos en el campo y su acumulación producirá también la contaminación de los suelos agrícolas y un impacto paisajístico y visual. Todo esto contribuye a aumentar la mala imagen que tiene el plástico como “agresor” del ambiente, haciendo evidente la urgente necesidad de desarrollar tecnologías para el manejo y mejor aún su incorporación al medio. Anteriormente se ha propuesto el reciclaje de los agroplásticos y existen empresas que lo realizan, sin embargo debe considerarse el ciclo de vida y de reciclaje de un plástico, llegará un momento en el que no podrá ser reciclado y deberá ser desechado.

Muy particularmente, los plásticos agrícolas se queman fácilmente, pero de forma incompleta, en un escenario de quema a cielo abierto. La combustión incompleta puede dar lugar a la liberación de materia en partículas como monóxido de carbono y dióxido de azufre, así como muchos otros contaminantes del aire. Además, subproductos peligrosos pueden estar presentes en la ceniza residual y las emisiones en el aire en forma de metales pesados, dioxinas y furanos. Las emisiones de mayor preocupación durante la quema al aire libre de los plásticos agrícolas son, probablemente, las dioxinas y los furanos, que se forman sobre todo



en los casos de las temperaturas de combustión bajas, tales como los asociados con quema a cielo abierto. Las dioxinas y los furanos son un problema para la salud, incluso en muy pequeñas cantidades, y se asocian con alteraciones endocrinas, enfermedades del corazón y discapacidades cognitivas y motoras, además de ser un carcinógeno humano conocido (Sonnevera International Corporation, 2011) citado por (Briassoulis, 2013).

Los seres humanos pueden estar expuestos a las dioxinas directamente por la inhalación o a través de la piel, o por medio de plantas o carne, ya que se concentran en la grasa animal. Esto sugiere que la quema de plásticos agrícolas y la generación de dioxinas asociada, es especialmente preocupante, ya que esta práctica ocurre en o cerca de las tierras agrícolas activas. Además, la mayor parte de la ingesta de dioxinas por los seres humanos proviene de fuentes alimenticias, las emisiones de dioxinas provenientes de la quema de plásticos agrícolas tienen el potencial de afectar a la población cuando aterrizan en cultivos y se concentran en los cuerpos de los animales de granja. Es característico que la quema de 4,536 kg de plástico agrícola tiene el potencial de contaminar 75,000 kg de suelo expuesto a las dioxinas, con base en Directrices de Calidad de Suelo Canadiense (Sonnevera International Corporation, 2011) citado por (Briassoulis, 2013).

Otro grupo de contaminantes de interés emitido por la quema de residuos plásticos agrícolas son los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP o PAH, siglas en inglés). Los HAP son considerados contaminantes que tienen un efecto potencial extendido sobre el medio ambiente (Mumtaz y George, 1995) (Sonnevera International Corporation, 2011) citado por (Briassoulis, 2013). Las consecuencias del abandono de los residuos plásticos agrícolas en los campos y rellenos son la contaminación estética y la degradación del paisaje de las regiones de belleza natural y zonas turísticas, las amenazas a los animales domésticos y salvajes, el bloqueo del flujo de agua a través de canales de agua o la contaminación del mar y la sobrecarga de rellenos sanitarios con un impacto ambiental y económico inmediato. Muchos de estos fragmentos de plástico degradados terminan en el mar, contaminando el agua de mar y amenazando a los organismos marinos (Briassoulis, 2013).



1.2. Objetivos.

1.2.1. Objetivo general.

Demostrar la biodegradabilidad de agroplásticos utilizados en la agricultura protegida en el campo mexicano adaptando la metodología de la Norma ASTM D5526-12.

1.2.2. Objetivos particulares.

- Recabar información relacionada con la biodegradación de plásticos así como de plásticos agrícolas, a nivel nacional e internacional.
- Determinar mediante un análisis estadístico qué agroplástico produce mayor cantidad de biogás entre el material biodegradable y el convencional, utilizando un sistema de reactores anaerobios.
- Analizar la composición del biogás producido por los reactores para la comprobación de la biodegradabilidad del material de manera anaerobia.
- Demostrar que los plásticos agrícolas biodegradables presentan mayor conversión de carbono orgánico a carbono gaseoso que los convencionales mediante el cálculo del porcentaje de biodegradación (%BD).
- Comprobar si las condiciones de relleno sanitario son óptimas para la biodegradación y un tratamiento adecuado para los materiales agroplásticos.

1.2.3. Alcances y limitaciones.

- Las muestras agroplásticas se analizaron en la institución Centro de Investigación en Química Aplicada para la determinación del peso molecular.
- Mediante la adaptación de las proporciones y la metodología experimental de la Norma ASTM D5526-12, las pruebas de biodegradabilidad se realizaron a nivel laboratorio en unidades experimentales de 1000 mL en matraces de vidrio sellados herméticamente para asegurar el ambiente anaerobio.
- Para las muestras biodegradables se utilizaron acolchados agroplásticos con ácido poliláctico en su composición y para las convencionales a base de polietileno de baja densidad, ambas se obtuvieron en el mercado.
- La conversión de carbono a fase gas se midió a través de biogás producido (carbono total como CH₄ y CO₂) mediante cromatografía de gases.

1.3. Hipótesis.

Mediante la adaptación del método experimental descrito en la Norma ASTM D5526-12, los resultados de la medición de biogás reflejarán que la biodegradación de los plásticos biodegradables se lleva a cabo de manera más completa y eficiente en comparación con los plásticos convencionales (comúnmente utilizados en la agricultura protegida).



CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y JURÍDICO.

2.1. Marco Teórico.

2.1.1. Antecedentes (agricultura protegida).

La agricultura en México ha venido incorporando nuevas técnicas de riego y de cultivo con el fin de aumentar la producción e insertarse en nuevos esquemas de cultivo. Una de estas tecnologías incluye la utilización de plásticos en diferentes formas, y en los últimos años su uso ha tenido un crecimiento sorprendente de más del 20% anual. La agricultura protegida es aquella que se realiza bajo estructuras de protección que ayudan a ejercer determinado grado de control sobre los diversos factores del ambiente, permitiendo con ello minimizar los impactos que las condiciones climáticas adversas y las plagas ocasionan en los cultivos (SAGARPA, 2012).

Benavides, en 1998, escribió que la aplicación de materiales plásticos en las actividades agrícolas a partir de los años 40's y 50's inició una revolución que modificó profundamente el curso de la producción tecnificada de frutas, hortalizas y plantas ornamentales. En los años siguientes se lograron notables mejoras tecnológicas que ampliaron la durabilidad y rango de aplicación de los materiales plásticos. En la actualidad se manejan con técnicas de agroplasticultura más de 300,000 hectáreas de cultivos de alto retorno económico en todo el mundo.

La utilización de los plásticos en la agricultura se inicia en los años 60 cuando se sustituyen, debido a su elevado costo, los invernaderos de cristal y los ensilados de acero u hormigón por éste material. Con el tiempo y ante la necesidad de resaltar competitivos en el sector, se impulsa la utilización de plásticos en la agricultura, permitiendo convertir tierras aparentemente improductivas en explotaciones agrícolas altamente rentables (Blaquéz, 2003).

Gómez y Arellano reportaron en 2014 que en México la superficie ocupada de agricultura protegida es de 20,000 Ha. En cambio, al sur de Italia se reportó una producción de 350, 000 toneladas tan solo en la provincia de BAT (Barletta-Andria-Trani) regulada por el programa "Agricultural Waste Valorisation for a Competitive and Sustainable Regional Development (AWARD)", el cual registró el uso de materiales agroplásticos como acolchados, mangueras de irrigación, contenedores, bolsas de cultivo y redes (Vox et al., 2016). El plástico ha sustituido al cristal en los invernaderos; las ventajas principales de su uso son: aumentar las temporadas de cultivo, mayor rendimiento, calidad superior de las cosechas, menor tiempo de



producción, mejor control de plagas, reducción en el empleo de agroquímicos y optimización del consumo de agua.

Un sistema de agroplasticultura bien diseñado y manejado conlleva ventajas inmediatas como producción precoz, aumento en el rendimiento, calidad, uso eficiente del agua, de fertilizantes y disminución en la aplicación de plaguicidas. Todas las ventajas anteriores deben balancear favorablemente a corto y largo plazo el mayor costo de inversión inicial que implica el uso de agroplásticos. Por ello estos sistemas productivos requieren un manejo y un control mucho más intensivo que los sistemas tradicionales (Benavides, 1998).

Los sistemas de cultivo protegido utilizados en la agricultura son aquellos donde durante todo el ciclo productivo de la planta en parte del mismo cultivo se actúa sobre el microclima que rodea la planta, con la intención de incidir sobre la producción consiguiendo un aumento de los rendimientos y/o acortando su ciclo productivo, adelantando la cosecha para una mejor posición de los productos en el mercado. Algunos plásticos agrícolas que protegen los cultivos son: el acolchado, los túneles y microtúneles, plásticos de invernadero, malla sombra, malla granizo, bolsas de cultivo, rafia, cintas de riego por goteo, etc. (Blaquéz, 2003).

Las mayores restricciones sobre la productividad de las plantas son impuestas por temperaturas adversas, deficiencia o exceso de humedad o radiación solar, lluvia o vientos intensos, granizo, competencia con malezas, presencia de plagas o enfermedades, deficiencias o desbalances en los nutrientes del suelo y del CO₂. Las películas plásticas de diferentes tipos, composición y diseño estructural disminuyen o eliminan estas restricciones ambientales (Benavides, 1998).

Esto ha permitido un aumento en la productividad y una mejora en los sistemas de cultivo, sin embargo ha creado el problema de residuos sólidos derivados del uso de estos plásticos (*figura 2.1.*). Una práctica común ha sido quemarlos a cielo abierto o enterrarlos una vez que cumplen su ciclo de productividad y aplicación. Su quema indiscriminada presenta un inconveniente con los aditivos que acompañan a estos plásticos y que, su combustión sin control, generan serios problemas de contaminación atmosférica (Gómez y Arellano, 2014).



Figura 2. 1. Agroplásticos desechados en campos del Valle de San Quintín, Baja California Norte. Fuente: (López y SEMARNAT, 2012).

2.1.2. Antecedentes sobre los plásticos (Polietileno, LDPE y PLA).

Los plásticos son sustancias químicas sintéticas denominadas polímeros, de estructura macromolecular que puede ser moldeada mediante calor o presión y cuyo componente principal es el carbono. Estos polímeros son grandes agrupaciones de monómeros unidos mediante un proceso químico llamado polimerización. Los plásticos proporcionan el balance necesario de propiedades que no pueden lograrse con otros materiales por ejemplo: color, poco peso, tacto agradable y resistencia a la degradación ambiental y biológica (Kiener, 2010).

La unión de estos monómeros forma cadenas largas de alto peso molecular (*figura 2.2.*), el cual oscila entre 10, 000 y 10^7 g/mol, además de darle propiedades específicas consecuencia de ser cadenas largas. Existen polímeros naturales (como las proteínas, carbohidratos, ácidos nucleicos y celulosa) y los sintéticos (polietilenos, polipropileno, acrílico, etc). La diferencia entre un polímero y un plástico se debe a que el primero es un tipo de molécula, mientras que el segundo es un tipo de material, es decir, los plásticos están constituidos por polímeros. (Chávez, 2014).

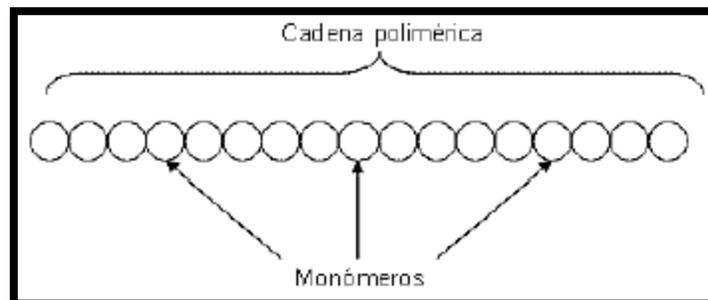


Figura 2. 2. Cadena polimérica a partir de monómeros. Fuente: (Treviño, 2016).



Polietileno y polietileno de baja densidad (LDPE): Muchos de los materiales plásticos usados en la vida cotidiana son fabricados de polietileno, que es un polímero sintético constituido por monómeros de etileno ($-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$) que se estructura de forma lineal. Se conoce comercialmente como LDPE por sus siglas en inglés (polietileno de baja densidad) y HDPE (polietileno de alta densidad). La forma lineal de las cadenas de HDPE, permite que éstas tengan un mejor acomodo y se compacten dándole una mejor calidad y resistencia; en cambio el polietileno de baja densidad se forma de cadenas principales constituidas de cadenas secundarias que impiden un acomodo compacto, lo que disminuye la densidad, la rigidez y la resistencia (Chávez, 2014). Vázquez y otros (2014), afirman que en México los plásticos constituyen el 12.88% de los residuos producidos.

La mala disposición de los productos fabricados de plástico obstruyen alcantarillado y drenaje, lo que lleva a inundaciones durante las temporadas de lluvias, provocando que familias enteras se queden sin hogares, y algunas veces, las vidas de seres humanos. Los materiales de plástico que llegan al alcantarillado continúan moviéndose hasta llegar a grandes cuerpos de agua como ríos, lagos y océanos. Una vez en los océanos, las bolsas y los productos plásticos asfixian y matan animales. En el Gran Parche de Basura del Pacífico, una región en el Océano Pacífico donde las corrientes se unen y forman un remolino de basura, hay cerca de tres millones y medio de toneladas de residuos plásticos donde predominan mayoritariamente las bolsas de plástico (Norlander, 2010).

Briassoulis menciona en su artículo publicado el 2013 en Waste Management and Research, que las películas de plástico convencionales son principalmente a base de polietileno (PE), pero también hay algunas de policloruro de vinilo (PVC), así como películas hechas de polímeros especiales, como el ácido poliláctico (PLA). El polietileno es el material principal de las películas de plásticos agrícolas no biodegradables y es usado por la mayoría de los agricultores por su accesibilidad, transparencia, durabilidad, fuerza, flexibilidad y fácil manejo. En general, la mayoría de los agroplásticos son de polietileno de baja densidad, que en varias aplicaciones, puede contener los copolímeros etilvinilacetato (EVA) o etilbutilacetato (EBA), sin embargo en la actualidad se han desarrollado plásticos agrícolas de diferentes aplicaciones con ácido poliláctico en su composición, lo que hace que sean biodegradables sin necesidad de tener un aditivo que catalice la biodegradación.



Los consumidores utilizan plásticos para sus diferentes intenciones (tabla 2.1.) y después los desechan, terminando en vertederos, tapando alcantarillas o matando animales. Debido a que los plásticos toman tanto tiempo en descomponerse el deterioro ambiental va en aumento. Plásticos de un solo uso se utilizan para muchos fines, lo que lleva a una gran cantidad de residuos plásticos sin ningún lugar donde desecharlos (Treviño, 2016).

Tabla 2. 1 Tipos de plásticos, usos, aplicaciones y estructura.

TERMOPLÁSTICOS			APLICACIONES	POLÍMERO
Polietileno Tereftalato	PET		Botellas, envasado de productos alimenticios, refuerzos neumáticos de coches.	$-O-CH_2-CH_2-O-C(=O)-C_6H_4-C(=O)-$
Polietileno de alta densidad	PEAD		Botellas para productos alimenticios y detergentes, contenedores, juguetes, bolsas, embalajes y film, láminas y tuberías.	$-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-$
Policloruro de Vinilo	PVC		Marcos de ventanas, tuberías rígidas, revestimientos para suelos, botellas, cables aislantes, tarjetas de crédito, productos de uso sanitario.	$-CH_2-\underset{\text{Cl}}{\text{CH}}-CH_2-\underset{\text{Cl}}{\text{CH}}-$
Polietileno de baja densidad	PEBD		Film adhesivo, bolsas, recubrimientos de contenedores flexibles, tuberías para riego.	$-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-$
Polipropileno	PP		Envases para productos alimenticios, cajas, tapones, piezas de automóviles, alfombras y componentes eléctricos.	$-CH_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-CH_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-$
Poliestireno	PS		Botellas, vasos de yogures, recubrimientos.	$-CH_2-\underset{\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}}-CH_2-\underset{\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}}-$

Fuente: (Treviño, 2016).



El polietileno ha sido utilizado y diversificado en la industria por sus propiedades ópticas, mecánicas, contra la degradación y la oxidación, además del costo de manufactura (Roé-Sosa, y otros, 2015). Sin embargo, de acuerdo con Briassoulis (2013), las propiedades de las películas agroplásticas a base de LDPE se suelen modificar por aditivos especiales para controlar el crecimiento de los cultivos, la temperatura del suelo y las pérdidas de agua, las malezas y los insectos, para ofrecer estabilización ultravioleta (UV), incorporar comportamientos anti-goteo y anti-niebla, opacidad infrarroja (IR), bloqueo UV y también se han desarrollado películas ultra térmicas.

En el caso de algunos plásticos, aditivos son añadidos para proporcionarles la propiedad de biodegradabilidad como es el caso de “ENVIROCARE” que son sustancias químicas que se pueden agregar a los polímeros termoplásticos convencionales para convertirlos en artículos plásticos de uso agrícola. El objetivo de ellos es que sus propiedades físicas y mecánicas se afecten rápidamente una vez que su tiempo de vida útil termine (Bonora y De Corte, 2003).

La concentración de los aditivos en las formulaciones de plásticos se expresa en peso referida a 100 gramos de polímero o *phr* (partes por 100 de resina). Los aditivos deben cumplir con algunas características para que sean eficaces, de modo que se consigan los objetivos de cambio y mejoramiento en el polímero (Beltrán y Marcilla, 2012):

- Miscibilidad entre las moléculas del aditivo y el polímero.
- No debe ser volátil a las condiciones del proceso, es decir, tensión de vapor baja a altas temperaturas.
- Sin tendencia a agregarse. Esto evitará el depósito del aditivo en forma de una capa fina superficial.
- No debe exudar durante su vida en servicio, se perdería su eficacia por su eliminación.
- No debe ser tóxico ni perjudicial para el personal que lo manipule, ni para el usuario.



Ácido Poliláctico (PLA): La síntesis del PLA se comenzó a estudiar en 1932, para los años 70's se utilizaban copolímeros derivados del ácido láctico en el campo médico para fabricar matrices degradables de liberación lenta de medicamentos. Se le denomina ácido poliláctico por su síntesis química a partir de ácido láctico, llevada a cabo por fermentación de carbohidratos proporcionando estereoselectividad. La separación del ácido láctico se realiza por métodos convencionales por precipitación como sal de calcio con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y posterior disolución con H_2SO_4 , produciendo 1 kg de yeso por cada kg de ácido láctico. Mediante el uso de ácido láctico de alta pureza y la eliminación azeotrópica del agua formada, se obtiene PLA de alto peso molecular. El uso de disolventes como el éter difenílico es desventajoso en comparación con los procesos sin disolventes (Mecking, 2004).

De acuerdo con Vázquez (2014) y Mecking (2004), el ácido poliláctico (PLA) es un poliéster alifático termoplástico derivado de recursos renovables, de productos tales como almidón de maíz (en Estados Unidos), tapioca (raíces, o almidón principalmente en Asia) o caña de azúcar (en el resto de mundo). Tiene características de biodegradabilidad, de barrera y compostabilidad debido a su estructura (figura 2.3.), esto le permite ser amigable en el tema de los plásticos agrícolas; además es uno de los pocos plásticos biobasados/biodegradables.

Sus propiedades son similares a las del PET aunque con menor resistencia a la temperatura, el proceso más común parte de la producción de ácido láctico y otros compuestos básicos a partir de la fermentación del almidón de las plantas, para después transformarlo y obtener los monómeros que darán origen al plástico (PLA) con propiedades equivalentes a los obtenidos a partir del petróleo (Vázquez et. al., 2014). Su fórmula química es $(\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_2)_n$.

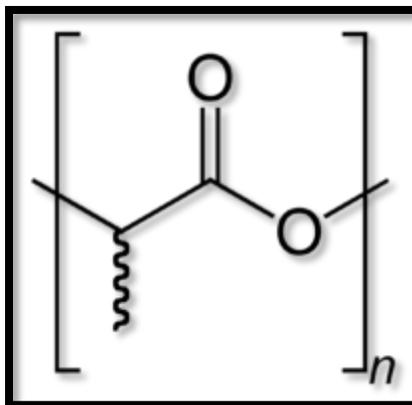


Figura 2. 3. Estructura del ácido poliláctico (PLA). Fuente: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/08/poliacido-lactico-pla.html>



El PLA es un termoplástico rígido transparente con una temperatura de transición vítrea de alrededor de 60 °C y un rango de fusión de 170 a 180 °C. Mediante la incorporación dirigida de meso-lactida, la estereorregularidad puede reducirse para obtener un material más suave. La viscosidad del material en estado fundido permite el moldeo por inyección, hilado por fusión, fundición de películas y termoformado. Tiene aplicaciones de fibras para prendas, dando mayor confort de uso y una mejor estabilidad dimensional que el PET o el algodón. CargillDow puso en marcha una planta de PLA con una capacidad anual de 140000 Ton en abril de 2002 en Blair, Nebraska, su materia es el almidón de maíz, que se hidroliza a glucosa. Mitsui vende PLA en Japón con el nombre comercial de LACEA (Mecking, 2004).

La empresa BASF tiene diversos plásticos biodegradables, una de las aplicaciones es de tipo agrícola. Junto al ácido poliláctico (PLA), otros compuestos también pueden mezclarse para lograr un perfil de características específicas para ésta aplicación. Un alto contenido de Ecoflex® (copolímero que contiene aproximadamente proporciones iguales de ácido adípico y ácido tereftálico) es especialmente adecuado para la producción de productos de película flexible. Las características mecánicas, como la rigidez o la resistencia a la perforación, pueden variarse y ajustarse específicamente. Los productos Ecoflex® de BASF son mezclados con ácido poliláctico para fabricar otro producto de la empresa, Ecovio® (figura 2.4.). La mezcla de Ecoflex® Batch C Black, Ecovio® F Film, Ecovio® F Blend y ácido poliláctico (integrado a su formulación) es usada para fabricar películas y artículos agroplásticos que evitan la penetración de la luz a través del acolchado eliminando el desarrollo de malezas (BASF, 2013).

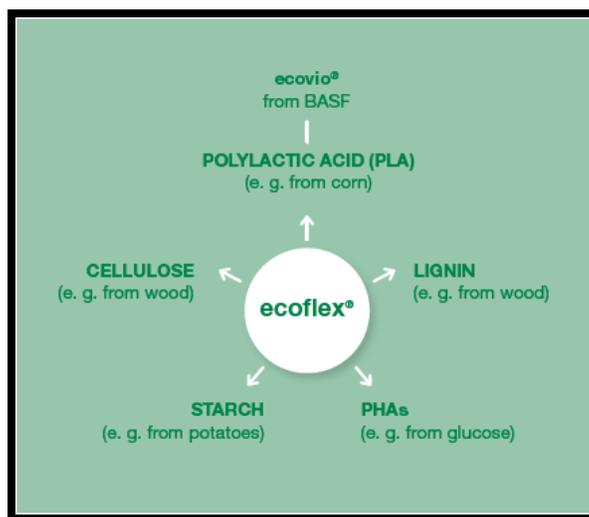


Figura 2. 4. PLA para elaborar plásticos biodegradables de uso agrícola. Fuente: (BASF, 2013).



La empresa Herman Meyer tiene disponible productos biodegradables como es el caso de Ökolys®, que es un agrotexil (plástico agrícola) basado en dos polímeros. Un polímero es biodegradable y el segundo es compostable. La investigación determinó la composición de los polímeros en su mezcla; Ökolys® es un producto eficiente, sostenible y orgánico que da altas posibilidades de reducir el crecimiento de malezas en los cultivos agrícolas. Es especialmente para proyectos de jardinería, agricultura y paisajismo (MEYER, 2016).

Ökolys está compuesto de biofibras (PLA) y fibras de cáñamo por lo que es un agroplástico biodegradable y compostable (MEYER, 2016):

- La desintegración comienza lo más pronto posible después de 3 años. (Cumple EN 14834 / ISO 13934-1).
- Hecho de materias primas renovables.
- Libre de contaminantes, herbicidas
- Sin pesticidas para el control de malezas.
- Las malas hierbas son eficiente y ecológicamente degradadas.
- Protege contra daños por erosión.
- Protege el suelo de la deshidratación.
- Proporciona a las raíces de las plantas un microclima óptimo.
- Es permeable al agua y al aire estimulando el crecimiento de las plantas.



2.2. Agroplásticos de uso en México.

Los plásticos agrícolas utilizados en la agricultura protegida son los materiales tipo película de invernadero, malla sombra y antigranizo, acolchados, macrotúnel, microtúnel, rafias, cinta de riego por goteo y bolsas. Para el año 2006, se calculaba que a nivel nacional existían más de 200,000 hectáreas con uso de técnicas relacionadas que implican al plástico como insumo (López y SEMARNAT, 2012).

De acuerdo con datos de SAGARPA U. F. (2015), actualmente se calcula que a nivel nacional existen más de 21 millones de hectáreas destinadas a las actividades agrícolas. En más del 70% de dicha superficie dedicada a las labores agrícolas, se emplean técnicas que hacen uso de materiales plásticos.

Los cambios en el estilo de vida, especialmente en los patrones de uso y consumo, han llevado a un incremento continuo en la producción de estos materiales. En 2010 se reportó la producción de 265 millones de toneladas de plástico a nivel mundial, 2% de éste volumen fue de uso agrícola (Vox et. al., 2016). Para el 2012 se estimó una producción mundial de 241 millones de toneladas de plásticos, y se estimaba que superara los 300 millones de toneladas para 2015 (Vázquez et. al., 2014).

Gómez y Arellano publicaron en 2014 un análisis que reporta que en el año 2013 México generó un aproximado de 280 mil toneladas de agroplásticos y actualmente existen 13 empresas encargadas de la disposición y reciclaje del material, entre todas estas apenas reciclan 28,000 toneladas, es decir, sólo el 10% del total de residuos. El resto acaba en tiraderos o se quema.

Algunos de los plásticos de mayor uso que son desechados en México por la agricultura protegida se presentan en la *tabla 2.2.*, así mismo se presentan las cantidades aproximadas anuales:

Tabla 2. 2. Tipos de agroplásticos generados en México.

Material	Toneladas
Plástico invernadero, túnel, macro túnel y acolchado	180,000
Plásticos importados	65,000
Tubo bananero	20,000
Mallas	8,000
Charolas hortícolas	4,000
Envases vacíos	3,000
TOTAL DE DESECHOS	280,000

Fuente: (Gómez y Arellano, 2014).



La Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), con el apoyo del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), realizó un diagnóstico en once estados en torno a la generación de residuos de agroplásticos se presenta en la *tabla 2.3.* (López y SEMARNAT, 2012):

Tabla 2. 3. Estudio de la generación de agroplásticos por CIQA (2008-2010).

Estado	Superficie con Agricultura Protegida (ha)	Residuos plásticos generados/año (Ton)
Jalisco	12,034	5,155.6
Baja California	34,200	13,108.4
Baja California Sur	10,570	4,434.2
Guanajuato	805.5	2,091.43
Estado de México	2,765	3,066.9
Sinaloa	31,480	10,513.6
Chiapas	1,713.36	3,604.35
Michoacán	7,217.39	4,541.02
Puebla	491.65	582.39
Sonora	2,233.35	1,135.66
Zacatecas	1,992.85	1,424.08
TOTAL	94,933.6	49,657.63

Fuente: (López y SEMARNAT, 2012).

2.3. Tipo de aplicaciones de agroplásticos.

Los agroplásticos por su tipo de aplicación y usos en la agricultura protegida se nombran como acolchados, plásticos para invernadero, túneles (microtúneles y macrotúneles), mallas (sombra y antigranizo), cinta de riego por goteo, rafias, etc. como menciona López y SEMARNAT (2012).

El plástico para *acolchado* de suelo (*figura 2.5.*) es uno de los materiales que en mayor volumen se desechan en México y el que mayor degradación presenta al terminar su ciclo de cultivo (Gómez y Arellano, 2014). Blaquéz (2003), describe el *acolchado* como una práctica que consiste en cubrir total o parcialmente el terreno con una lámina de plástico, sus beneficios son ahorro de agua, cosechas más mayores y en menor tiempo, mejor aspecto comercial, ya que se mejoran las condiciones de los suelos de cultivo, la disminución de malas hierbas y un mejor aprovechamiento del agua de riego. Se usa en cultivos como el algodón o la fresa, entre otros.



Figura 2. 5. Plástico acolchado. Fuente: (López y SEMARNAT, 2012).

Otro agropástico descrito por Blaquéz en 2003 son los *túneles* (figura 2.6.), que consisten en soportes semicirculares, cubiertos de láminas de plástico flexible de polietileno y que por su ligereza y flexibilidad se adaptan perfectamente. Con ellos se aumenta la precocidad de los cultivos (ciclos más cortos) y la puesta en el mercado de producto a un mejor precio; son muy utilizados en el cultivo de la fresa.



Figura 2. 6. Microtúnel y macrotúnel respectivamente. Fuente: (López y SEMARNAT, 2012).

De acuerdo con Gómez y Arellano, 2014, las mallas sombra y antigranizo (figura 2.7.) tienen una larga vida, por lo que la frecuencia de desecho es mucho menor que los demás plásticos; además de considerar a la cinta de riego por goteo (figura 2.8.) y al acolchado como los desechos que mas contaminan pues pueden contener residuos agroquímicos impregnados.



Figura 2. 7. Malla. Fuente: (Gómez & Arellano, 2014).



Figura 2. 8. Cinta de riego por goteo. Fuente: (López & SEMARNAT, 2012).

Los invernaderos son estructuras permanentes (*figura 2.9.*), cubiertas principalmente de plástico, aunque existen de otros materiales como el vidrio, que permiten modificar las condiciones climáticas que tiene el lugar donde se desarrolla el cultivo, además, los invernaderos protegen a las plantas de condiciones meteorológicas como el viento, lluvia, granizo y heladas, permitiendo al agricultor obtener cosechas en zonas y épocas donde es imposible que prospere dicho cultivo. El plástico de invernadero permite la entrada de radiación solar e impide la salida de la radiación emitida por el suelo, con lo que se consigue el mantenimiento de temperaturas más altas en su interior (efecto invernadero). Los materiales utilizados en la construcción de invernaderos es muy variado, tanto en sus estructuras que pueden ser metálicas, de aluminio o acero galvanizado, madera, como en los materiales de cubierta utilizados. Entre las cubiertas, las más utilizadas son las de plástico: láminas de polietileno, acetato de etilo y vinilo (EVA) y de policloruro de vinilo (PVC) (Blaquéz, 2003).



Figura 2. 9. Invernadero y plástico para invernadero. Fuente: (Gómez & Arellano, 2014).

A continuación se muestran imágenes de agroplásticos como rafias y bolsas de cultivo (figura 2.10.):



Figura 2. 10. Bolsas de cultivo y rafia, respectivamente. Fuente: (Gómez y Arellano, 2014).

2.3.1. Agroplásticos a base de Polietileno de Baja Densidad (LDPE).

La mayoría de los plásticos utilizados en invernaderos son de polietileno de baja densidad, debido fundamentalmente a su bajo precio en comparación con otros materiales plásticos (Briassoulis, 2013).

El polietileno de los agroplásticos puede ser normal, sin aditivos, que se obtiene por polimerización a temperatura y presiones altas, así como de larga duración y térmicos como se muestra en la *tabla 2.4.* (Blaquéz, 2003):

Tabla 2. 4. Tipos de agroplásticos de polietileno utilizados en agricultura protegida.

Tipo de material	Espesor (μ)
Polietileno normal	100
Polietileno de larga duración	180
Polietileno térmico de larga duración	200

Fuente: (Blaquéz, 2003).

Los plásticos de polietileno tienen diversos beneficios, en nuestro caso el uso sería como protección de cultivos. Beltrán y Marcilla (2012), enuncia diversas características del polietileno, material del que están hechos los agroplásticos (LDPE), enseguida se enuncian las características:

- Comportamiento térmico de la cubierta frente a la radiación solar
- Envejecimiento del material utilizado como cubierta, determinado por sus propiedades físicas, el peso, espesor, resistencia y duración
- Formación de condensación
- Presencia de aditivos cuyos objetivos pueden ser diversos, como son conseguir films de larga duración y films térmicos



CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y JURÍDICO

Los aditivos son los materiales que se incluyen en la formulación de los polímeros para modificar y mejorar sus propiedades físicas, mecánicas y de proceso. En general, se consideran aditivos aquellos materiales que van dispersos en una matriz polimérica, sin afectar a su estructura molecular. Por tanto, quedan excluidas sustancias tales como catalizadores, reticulantes, etc. (Wypych, 2004).

Los aditivos químicos son usados en pequeñas cantidades en la estructura polimérica de los plásticos agrícolas, dirigido a impartir propiedades específicas a diferentes películas y productos plásticos, dependiendo de su aplicación. Un plástico puede tener más del 15% de su peso en aditivos y tener arriba de 15 diferentes aditivos. Algunas de las familias de aditivos comúnmente usadas son antideslizantes y antiestáticos, antioxidantes, absorbedores UV, estabilizadores de luz, modificadores de tensión superficial y aditivos que bloquean IR, pigmentadores, fotoselectivos y otros rellenos. Estos aditivos son moléculas químicas complejas con diferentes propiedades, algunas de ellas actúan sinérgicamente (Briassoulis, 2013).

Los aditivos se clasifican según su función y no en relación con su constitución química (*tabla 2.5.*). Ciertas mejoras en una determinada propiedad pueden dar lugar a la inhibición de otras; por tanto, lo que determina la elección final de uno o varios aditivos es el comportamiento en su conjunto (Beltrán y Marcilla, 2012).

Tabla 2. 5. Tipos de aditivos para plásticos.

Función del aditivo	Tipo de aditivo	Ejemplos
Que facilitan el procesado	Estabilizantes y lubricantes.	Ácido esteárico, ceras, estearatos
Que modifican las propiedades mecánicas	Plastificantes, cargas reforzantes y modificadores de impacto.	Diiso-nonil ftalato, Trifenilfosfato
Que disminuyen costos en las formulaciones	Cargas, diluyentes y extendedores.	Carbonato de calcio, cerámica
Modificadores de propiedades superficiales	Agentes antiestáticos, antideslizamiento y antidesgaste y promotores de adhesión.	Fenoles estéricamente impedidos, aminas aromáticas
Modificadores de propiedades ópticas	Pigmentos y colorantes. Agentes de nucleación.	Óxido de titanio, negro de humo, óxidos de hierro y cromatos
Contra el envejecimiento	Estabilizantes contra luz UV y fungicidas.	Benzotriazoles, acrilonitrilos sustituidos, 4-alcóxibenzofenonas
Otros	Agentes espumantes y retardantes de llama.	Amidas, cloruros o bromuros

Fuente: (Beltrán y Marcilla, 2012).



2.3.2. Otros tipos de plásticos usados en plásticos agrícolas.

Otros materiales utilizados como cubiertas para invernadero son las láminas de copolímero de acetato de etilo y vinilo (EVA) que se utilizan en climas fríos, planchas de policarbonatos que debido a su elevado coste y a su bajo nivel de información sobre el comportamiento agronómico de este material, no tienen aún un gran desarrollo. Para el acolchado de suelos el material más utilizado es el polietileno lineal que se fabrica a menores temperaturas y presión que el polietileno normal y presenta una mayor resistencia mecánica y capacidad de alargamiento. El plástico utilizado en el cultivo del algodón es un film transparente, de 12 a 20 mm de espesor, mientras que en el acolchado de la fresa se utiliza polietileno negro opaco. En el recubrimiento de pequeños túneles suelen emplearse polietilenos normales, térmicos y polietilenos coextrusionados con etil vinil acetato (EVA) o policloruro de vinilo (PVC) (Blaquéz, 2003).

2.4. Plásticos biodegradables y agroplásticos biodegradables.

Los plásticos son un tipo de materiales de gran utilidad y versatilidad que gracias a sus propiedades físicas y químicas son usados para el desarrollo de actividades como la agricultura protegida; sin embargo, cuando estos materiales se convierten en desperdicio, esas mismas propiedades los convierten en un problema ambiental complejo como menciona Jongbloed, Puentes y Albarracín (2009).

Los plásticos biodegradables brindan propiedades únicas en aplicaciones específicas (como sería el uso de los agroplásticos en la agricultura protegida) y puede ofrecer ciertas ventajas adicionales durante el uso y la gestión de residuos. Similar a otros plásticos, los plásticos biodegradables son adecuados para varias opciones de recuperación cuando la vida útil de dichos productos llega a su fin. Los plásticos biodegradables pueden ser compostados y/o digeridos anaeróbicamente, adicionalmente a la recuperación de estos materiales mediante el reciclaje y a la recuperación de energía. La gestión de todos los plásticos, incluidos los plásticos biodegradables, debería ser apoyada y promovida (PlasticsEurope & Association of Plastics Manufactures, 2017).

El término "*bioplásticos*" describe dos conceptos diferentes, uno es "*plásticos biodegradables*" que se refiere a la especificidad del plástico al final de su vida útil; el otro es "*plásticos bio-basados*", es decir, plásticos elaborados a partir de una fuente de materia prima renovable. Es importante comprender que los plásticos con base biológica no son biodegradables y que los plásticos biodegradables no son necesariamente bio-basados, sino que también pueden ser basados en fósiles



(poliésteres biodegradables). Tanto los plásticos biodegradables como los no biodegradables deben disponerse adecuadamente para no terminar como basura describe Lindner en su artículo sobre estos plásticos en la revista *PlasticsEurope* en 2016.

De acuerdo con Vázquez et. al. (2014), actualmente el 65% de los bioplásticos se utiliza en envases y productos de vida corta, aunque ha aumentado su empleo en medicina, agricultura, fabricación de juguetes, electrónicos, herramientas y autopartes. Aunque se estimó que la participación de los bioplásticos en el mercado fue menor al 1% en el 2010, este sector presenta un crecimiento vigoroso, con tasas anuales del 30%. Se espera que la producción y consumo siga creciendo, especialmente en el área de los materiales biobasados no biodegradables usados en aplicaciones de uso general. Este fenómeno permitiría, a través de economías de escala, bajar costos y ser más competitivos en el mercado.

Debido a la dificultad para recuperar el polietileno convencional después de su uso, se han desarrollado y comercializado las películas agroplásticas biodegradables. Estas son películas generalmente bio-basadas que, luego de su uso, pueden ser enterrados en el suelo de los cultivos que protegen para ser descompuestas por microorganismos. La biodegradación no debe dejar sustancias tóxicas en el suelo u otros subproductos indeseables, y debería ser lo suficientemente rápida como para no generar acumulación durante períodos de cultivo consecutivos explica en su artículo Briassoulis, en 2013.

Aunque existían desde hace varias décadas, los plásticos biodegradables han despertado el interés durante los últimos veinte años como una opción para reducir la permanencia de los residuos plásticos a través de su bioasimilación, especialmente en el caso de los productos de vida útil corta, como en el caso de los plásticos agrícolas que pueden jugar un buen papel en los cultivos con periodos de maduración promedio (Vázquez et. al., 2014).

La incorporación a un agroplástico de un aditivo adecuado, combinaciones de estabilizadores que regulen su durabilidad o la combinación adecuada de ácido poliláctico con otros copolímeros, permite que se pueda controlar y modelar el tiempo de vida de su exposición a la interperie y las condiciones ambientales a las que sucede su degradación. La selección adecuada de aditivos y estabilizadores induce la degradación del plástico en dos etapas, la primera por oxidación térmica durante su exposición a la interperie, una vez activada la degradación por luz y calor



los catalizadores se encargan de acelerar el proceso hasta que el agroplástico sea totalmente degradado (Bonora y De Corte, 2003).

El trabajo de Bonhomme (2003) que habla sobre el proceso de biodegradación del polietileno, Barclay (2006) con sus investigaciones sobre los aditivos oxo-biodegradables que hacen referencia a la exposición a luz UV antes de la biodegradación, Mennle et al. (2004) con aditivos para termoplásticos y Roy (2005 y 2006) con sus dos trabajos sobre el efecto del estearato de cobalto en las películas de polietileno de baja densidad que es un catalizador de la biodegradación luego de la exposición UV son trabajos que explican como la reducción del peso molecular ayuda a tener una mejor respuesta en la biodegradación. Vogt y Kleppe (2009), realizaron investigaciones y trabajos sobre la degradación oxidativa después de la exposición de poliolefinas oxo-biodegradables a una fuente de luz.

Existen investigaciones similares donde se trabajó con películas de polietileno de baja densidad con características diferentes a los plásticos agrícolas (aditivos que le dan características de resistencia diferentes a las películas utilizadas en otras aplicaciones), sin embargo se sometieron al pre-tratamiento de exposición a luz UV, donde se obtuvieron resultados concluyentes que demostraban que 7 días de exposición UV en la cámara es suficiente para obtener películas de polietileno con un % ER de al menos 5 % para el 75 % de las probetas evaluadas (Chávez, 2014).

Bonora y De Corte (2003), trabajaron con películas agroplásticas biodegradables con aditivo *Envirocare* en su composición y polietileno. Utilizaron diferentes películas agrícolas de PE de baja densidad y fueron expuestas a diversos tratamientos (térmicos, exposición a luz UV, intemperismo, exposición natural). Se simularon diversos escenarios para aplicar estos tratamientos a las diferentes películas de PE de baja densidad: exposición de películas a 50 °C, aplicación de crackeo, introducción de los agroplásticos biodegradables a un sistema acelerado de intemperismo UV y la exposición a un sistema abierto de los agroplásticos biodegradables en contacto con el suelo. Se concluyó que se requiere de diversos parámetros y tratamientos para una mejor biodegradación.

Briassoulis, en su artículo de 2013, explica que las películas de polietileno que contienen como aditivos pro-oxidantes especiales se comercializan como degradables para diversas aplicaciones, incluso el acolchado degradable. Estas películas se degradan en fragmentos muy pequeños bajo radiación solar (UV) y/o calor y está probado que la degradación de estos fragmentos de agroplástico (o una



buena parte de estos fragmentos) pueden ser asimilados por los microorganismos contenidos en el suelo agrícola. El tema de biodegradación de agroplásticos es aún controversial debido a que no todos estos plásticos han tenido éxito cumpliendo con las especificaciones de biodegradabilidad de cualquier prueba estándar para la biodegradación, además se pregunta sobre la posible contaminación irreversible del suelo agrícola, sin embargo no hay suficientes estudios referentes a ello.

2.4.1. Biodegradación y tipos de biodegradación.

Clasificaremos la degradación en biodegradación, termodegradación, oxodegradación y fotodegradación aunque para fines de este proyecto, el término que se usó es “biodegradación”.

La *termodegradación* es el tipo de degradación que ocurre por la presencia del calor, lo que causa un deterioro molecular de los polímeros. Los componentes de la cadena polimérica comienzan a separarse y a reaccionar entre sí. Las reacciones químicas que se producen conllevan a cambios físicos y químicos de las propiedades originales. La degradación térmica generalmente involucra cambios en el peso molecular y su distribución, reducción de la ductilidad, fragilización, cambios en el color, fracturas y reducción general de la mayoría de las propiedades deseadas (Olayan et. al., 1996) citado por (Treviño, 2016).

La *fotodegradación* sucede cuando los plásticos sufren un envejecimiento que lleva asociado una merma en sus propiedades cuando son sometidos durante largos períodos de tiempo a la radiación luminosa. Este envejecimiento se atribuye a una reacción de fotooxidación térmica en cadena producida por la radiación luminosa de mayor energía correspondiente a una longitud de onda comprendida entre 290 y 350 nanómetros, en la que se generan grupos carbonilo. Estos grupos son los que desencadenan las reacciones degradativas del plástico (Ammala et. al., 2011) citado por (Treviño, 2016).

El término *oxobiodegradación* se utiliza para describir el proceso de degradación de polímeros en dos etapas. La primera etapa involucra la reacción del oxígeno atmosférico con el polímero. Los aditivos pro-oxidantes en el polímero aceleran la oxidación de la cadena de carbono del polímero bajo condiciones fototérmicas, resultando en la formación de pequeños fragmentos de moléculas, esta etapa de la oxobiodegradación es un proceso abiótico. La incorporación del oxígeno a la cadena polimérica resulta en la formación de grupos funcionales como por ejemplo ácidos



carboxílicos, ésteres, así como aldehídos y alcoholes. El hidrocarburo polimérico cambia su comportamiento de hidrófobo a hidrófilo, por lo que permite que el polímero fragmentado absorba agua. La segunda etapa es la biodegradación de los productos oxidativos por microorganismos (bacterias, fungi y algas) que consume los fragmentos de la cadena de carbono, formando, dependiendo de las condiciones del proceso, CO₂, CH₄, H₂O y biomasa. La primera etapa de la oxo-biodegradación, la degradación oxidativa, puede ser acelerada mediante el uso de luz ultravioleta (UV) o por el uso de calor. La oxidación abiótica inicial es una etapa importante del proceso ya que determina la velocidad de todo el proceso (Ammala et al., 2011; Treviño, 2016; Roé-Sosa et al., 2015).

Biodegradación o degradación biótica es la degradación química de materiales (que en el caso de estudio serán agroplásticos) provocada por la acción de microorganismos naturales tales como bacterias, hongos y algas. El proceso de biodegradación produce dióxido de carbono, metano, agua, minerales y nueva biomasa. Si hay oxígeno presente durante la degradación biótica, la degradación es *aeróbica* y se produce dióxido de carbono. Si no hay oxígeno disponible, la degradación biótica es *anaerobia* y se produce metano en lugar de dióxido de carbono. En algunas circunstancias, se producen ambos gases. La *biodegradabilidad* de los plásticos depende de las materias primas, la composición química y estructura del producto final, además del entorno al que estará expuesto y donde se espera que el plástico se descomponga (Briassoulis, 2013).

La *biodegradación* es el proceso en el cual sustancias orgánicas son transformadas por microorganismos. Como se mencionó anteriormente, los materiales orgánicos pueden ser degradados aeróbicamente (presencia de oxígeno), o anaeróbicamente (sin oxígeno). Los polímeros son biodegradados de manera aerobia en el suelo y en composta, de forma anaerobia en rellenos sanitarios y sedimentos. Pero también puede realizarse en condiciones de degradación mixtas (aerobio-anaerobio). Durante la biodegradación aeróbica se produce CO₂ y agua, mientras que en la biodegradación anaerobia CH₄, CO₂ 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 (Amer et al., 2008; Álvarez, 2014; Roé-Sosa et al., 2015).



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 et. al., 2011) citado por (Álvarez, 2014), los cuales son degradados por los microorganismos para formar dióxido de carbono y agua como productos finales.

PlasticsEurope, afirma que un plástico es biodegradable cuando su degradación es causada por la acción de microorganismos como hongos y bacterias. El material es convertido en agua, óxido de carbono y/o metano, y nueva biomasa (PlasticsEurope, 2017). En cambio, la organización European Bioplastics define a los bioplásticos como plásticos que son bio-basados, biodegradables, o que reúnen ambas características; esta definición ha sido retomada en el anteproyecto de norma mexicana PROY-NMX-E-260-CNCP-2013 por la Industria del plástico que establece lo siguiente (SEGOB, 2014):

Bioplástico: plástico que en su constitución total proviene de:

- Materias primas de origen renovable y es biodegradable
- Materias primas de origen renovable y no es biodegradable
- Materias primas de origen petroquímico y es biodegradable

El concepto de degradación, es una modificación irreversible de las propiedades iniciales causada por la ruptura de los enlaces químicos de las macromoléculas que degradan o desintegran un material polimérico; independientemente del mecanismo de tal ruptura (PlasticsEurope & Association of Plastics Manufactures, 2017). Un "*plástico degradable*" es un material diseñado para sufrir un gran cambio en su estructura química bajo condiciones ambientales específicas y la pérdida resultante de las propiedades del material se puede medir mediante métodos de prueba estandarizados.

Cuando la degradación es causada por la actividad biológica, especialmente por la acción de enzimas, se llama *biodegradación*. Un material se denomina *biodegradable* si el proceso de biodegradación es suficiente y la materia orgánica es convertida en dióxido de carbono (aerobio) o metano (anaerobio), en agua y biomasa. Un material es compostable cuando es biodegradable bajo condiciones de compostaje. Todos estos conceptos están referidos al glosario de términos y definiciones de PlasticsEurope & Association of Plastics Manufactures (2017).

A continuación, la *figura 2.9.* ejemplifica la biodegradación anaerobio y aerobia:

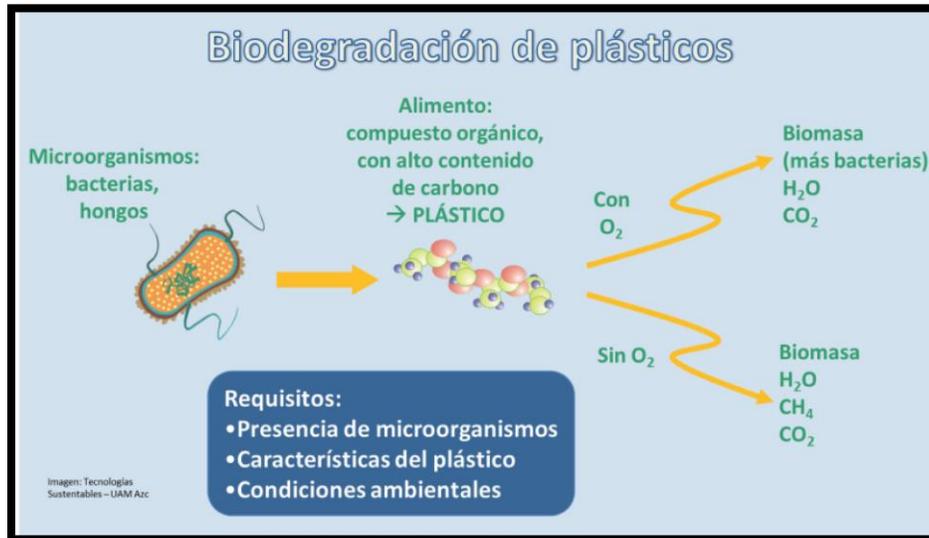


Figura 2. 11. Biodegradación aerobia y anaerobia de plásticos. Fuente: (Vázquez et. al., 2014).

2.4.2. Propiedades de los plásticos degradables.

Lindner (2016), propone que el uso de los plásticos biodegradables está directamente relacionada con su funcionalidad y no con la materia prima base del plástico. Es importante usarlos en aplicaciones donde pueden ser recuperados y procesados después de su uso como una bolsa de plástico compostable, que puede usarse en áreas donde ya se cuenta con la recolección separada de residuos orgánicos o como es el caso de los agroplásticos que una vez terminado su ciclo de vida pueden incorporarse al suelo. Se espera que los plásticos biodegradables certificados que están diseñados para ser recuperados mediante reciclaje orgánico sean tratados en digestores anaeróbicos (que producen biogás) o en plantas de compostaje. En este estudio, se simularán las condiciones de relleno sanitario a condiciones anóxicas, es decir, como la de un digestor anaerobio.

La característica de degradación es iniciada en el momento de la extrusión del material, a través de la incorporación de una pequeña cantidad de un aditivo prooxidante. Tal aditivo funciona a través de la descomposición de las ligaduras carbono-carbono en el plástico, lo que lleva a una disminución del peso molecular y, al final, una pérdida de resistencia y otras propiedades. Son utilizados estabilizantes para garantizar una vida útil suficientemente larga para cada aplicación específica (Plásticos Degradables S.A. de C.V., 2010) citado por (Treviño, 2016).



2.4.3. Aplicaciones de los plásticos degradables

La mayoría de los plásticos biodegradables comerciales actualmente son polímeros de base biológica y/o origen fósil. Los plásticos biodegradables se desarrollan para aplicaciones específicas que ofrecen ciertas ventajas adicionales durante su uso y recuperación. Algunos usos se enuncian a continuación (PlasticsEurope & Association of Plastics Manufactures, 2017):

- Como bolsas de basura para la recolección de desperdicios de alimentos, que se puede compostar junto con su contenido biodegradable. Esto simplifica y hace que la recolección de alimentos sea independiente. El desperdicio es más efectivo proporcionando una solución higiénica y la facilidad de manejo para su recuperación.
- Un uso importante para este estudio es en la *agricultura*, donde pueden emplearse como películas de acolchado, que pueden biodegradarse en el suelo mientras funciona como un acondicionador del suelo y protección de cultivo, dejando biomasa disponible.
- Las películas de acolchado al crecimiento de las plantas al minimizar la pérdida de agua y el uso de fertilizantes, plaguicidas y también tienen un efecto positivo en el control de malezas.
- El uso de películas de acolchado biodegradables elimina la necesidad de su remoción y por lo tanto, se evita el daño a las plantas. Después de su uso, se puede volver a arar en el suelo donde se biodegradan.

Vázquez y et. al., describen en su trabajo de 2014 que los bioplásticos no son algo nuevo; fueron usados por Henry Ford en la fabricación del automóvil modelo T y se han empleado ampliamente en aplicaciones médicas. Lo novedoso es el interés que han despertado como una opción de mitigación del impacto ambiental provocado por los plásticos convencionales a los suelos agrícolas, además de los plásticos comunes para otros usos. Actualmente el 65% de los bioplásticos se utiliza en envases y productos de vida corta, aunque ha aumentado su empleo en medicina, agricultura, fabricación de juguetes, aparatos electrónicos, herramientas y autopartes.

A continuación se presenta en la *tabla 2.6*. Algunos plásticos biodegradables y bio-basados y sus propiedades como menciona Vázquez et. al., en su artículo de 2014:



Tabla 2. 6. Bioplásticos representativos y sus propiedades.

Bioplásticos representativos y sus propiedades				
Bioplásticos	Biobasado	Biodegradable	Propiedades	Observaciones
Ácido poliláctico (PLA)	✓	✓	<ul style="list-style-type: none"> • Similares a las del PET, aunque con menor resistencia a la temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> • Generalmente se fabrica a partir de maíz • Uno de los bioplásticos más usados
Bio-polietileno (BIO-PE)	✓	✗	<ul style="list-style-type: none"> • Idénticas a las del polietileno convencional 	<ul style="list-style-type: none"> • Generalmente se fabrica a partir de la caña de azúcar, con bioetanol como producto intermedio
Policaprolactonas (PCL)	✗	✓	<ul style="list-style-type: none"> • Resistente al agua, aceites, solventes y cloros 	<ul style="list-style-type: none"> • Se emplea en la fabricación de poliuretanos
Polihidroxiclcanoatos (PHA)	✓	✓	<ul style="list-style-type: none"> • Dependientes del polímero específico • Muy sensibles a las condiciones de procesamiento- 	<ul style="list-style-type: none"> • Se extraen de las células de plantas y microorganismos • Su costo es hasta diez veces mayor al de los plásticos convencionales

Elaboración: Tecnologías Sustentables – UAM Azc

Fuente: (Vázquez et al., 2014).

2.5. Relleno sanitario y condiciones a simular

El relleno sanitario es una técnica de disposición final de los residuos sólidos en el suelo que utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en un área lo más estrecha posible, cubriéndola con capas de tierra diariamente y compactándola para reducir su volumen. Además, prevé los problemas que puedan causar los líquidos y gases producidos por efecto de la descomposición de la materia orgánica (Santos y Colmenares, 2007) citado por (Treviño, 2016).

Los rellenos sanitarios cuentan con entradas y salidas de materia, si se considera como un reactor biológico. En las entradas se tienen residuos sólidos urbanos y agua, y en las salidas se tiene el biogás producido y los lixiviados. Los residuos, especialmente los orgánicos, al ser compactados liberan agua y líquidos orgánicos, contenidos en su interior, que escurren hacia la base de la celda, los cuales son en parte lentamente recuperados por la basura al cesar la presión de la maquinaria. Por otra parte, la descomposición biológica rápidamente comienza actuar en un relleno sanitario, produciendo cambios en la materia orgánica, primero de sólidos a líquido y luego de líquido a gas, pero es la fase de licuefacción la que ayuda a incrementar el contenido de líquido en el relleno, y a la vez su potencial contaminante. Una vez saturada el agua, ya sea subterránea o superficial, que se infiltre en el relleno, lixiviará a través de los desechos arrastrando consigo sólidos en suspensión, la humedad intrínseca y compuestos orgánicos en solución. Esta mezcla heterogénea, de un elevado potencial contaminante, es lo que se denomina lixiviados o líquidos percolados (Santos y Colmenares, 2007) citado por (Treviño, 2016).



Las temperaturas máximas que se reportan en la literatura para rellenos sanitarios están entre 40-60°C, además se encontró que en condiciones termofílicas se acelera la biodegradación anaerobia (Esposito et. al., 2012; Hanson, 2010).

2.5.1. Residuos de manejo especial

Los plásticos agrícolas son clasificados según la NOM-161-SEMARNAT-2013 como residuos de manejo especial ya que son resultado de prácticas agrícolas como lo indica dicha norma. En su plan de manejo, Gómez y Arellano (2014) menciona que estos residuos generados son abandonados a la intemperie en los campos de cultivo y barrancas, desechados a cielo abierto en tiraderos clandestinos y en el mejor de los casos en rellenos sanitarios.

2.5.2. Digestión Anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso biológico que se lleva a cabo en etapas relacionadas entre sí. En cada una participan microorganismos específicos que utilizan los productos de la etapa anterior y que a su vez producen elementos necesarios para las siguientes. Las etapas que se han identificado en la degradación anaerobia son hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Fernández, 2008).

La digestión anaerobia es una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno que da lugar a una mezcla de gases conocida como "biogás" y a una suspensión acuosa o "lodo" que contiene los componentes difíciles de degradar y los minerales inicialmente presentes en la biomasa. El producto principal de este proceso es una mezcla gaseosa de metano (50 a 70%) y dióxido de carbono (30 a 50%), con pequeñas proporciones de otros componentes (nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno), cuya composición depende tanto de la materia prima como del proceso en sí (Fernández et al., 2010; Burke, 2011; Angelidaki et al., 1993).

El proceso de digestión anaerobia se divide en 4 etapas (*figura 2.12*): hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Castañeda et al., 2007).

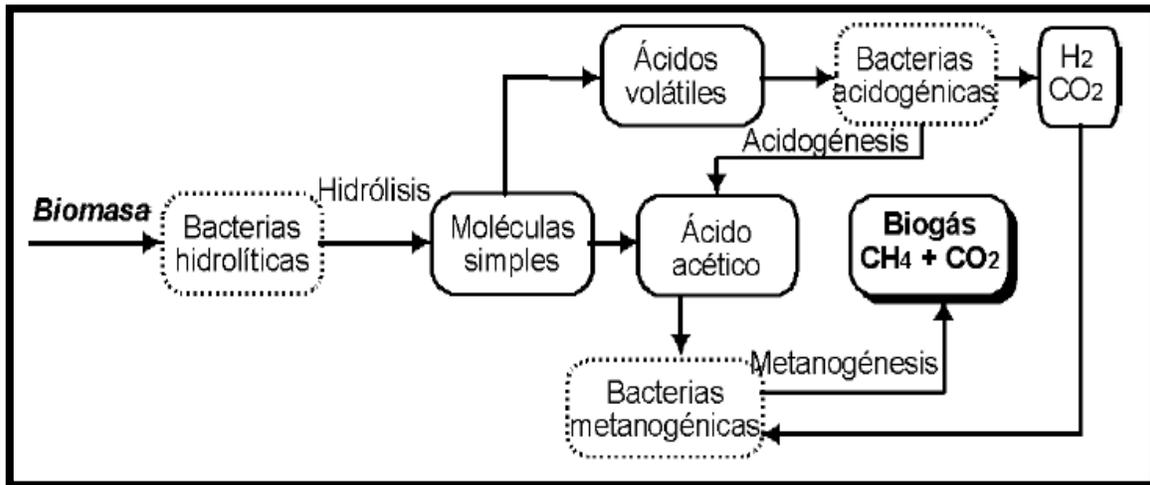


Figura 2. 12. Etapas del proceso de digestión anaerobia. Fuente: (Friedrich, 2014).

Durante la “*hidrólisis*”, la materia orgánica polimérica no puede ser utilizada directamente por los microorganismos, por lo tanto el primer paso de la digestión anaerobia de los RSO es la hidrólisis de compuestos de alto peso molecular (proteínas, polisacáridos y lípidos) en materia orgánica sencilla (aminoácidos, ácidos grasos, azúcares). La hidrólisis de los RSO es llevada a cabo por bacterias hidrolíticas. En la “*acidogénesis*” los materiales orgánicos simples son convertidos a Ácidos Grasos Volátiles (AGV), alcoholes, cetonas, aldehídos, agua, acetato, dióxido de carbono e hidrogeno por acción de las bacterias acidogénicas, ocasionando que disminuya el pH por debajo de 6.8. Los productos resultantes de la acidogénesis son convertidos durante la “*acetogénesis*” en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. Esta conversión procede de la acción de las bacterias acetogénicas obligadas a producir hidrógeno. Finalmente en la “*metanogénesis*”, las bacterias metanogénicas aumentan los valores de pH a 7.4, a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente. Aquí, los sustratos como el acetato, hidrógeno y dióxido de carbono son transformados a metano y agua (Castañeda et al., 2007).

2.5.3. Producción de biogás.

Por lo general, los componentes principales del biogás son el metano (CH_4) y el dióxido de carbono (CO_2), en proporciones aproximadamente iguales, constituyendo normalmente más del 97% del mismo. Ambos gases son incoloros e inodoros, por lo que son otros gases, como el ácido sulfhídrico y el amoníaco los que le otorgan el olor característico al biogás y permiten su detección por medio del olfato. El gas metano se produce en los rellenos en concentraciones dentro del rango de combustión, lo que confiere al biogás ciertas características de peligrosidad por riesgos de incendio o explosión y por lo mismo, la necesidad de mantener un control sobre él (Ambientaling Wordpress, 2010).

La cantidad de gas producido es muy variable, aunque generalmente oscila alrededor de los 350 L/kg de sólidos degradables en condiciones de relleno sanitario, con un contenido en metano del 70% (Sandoval et al., 2007). El biogás producido mediante la digestión de los residuos orgánicos es utilizado directamente como combustible para automóviles o para la producción de electricidad (Burke, 2011). En los últimos años el proceso de digestión anaerobia se ha presentado como una de las principales opciones para el manejo sustentable de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) gracias a su alta recuperación de energía y su limitado impacto al ambiente (Mata-Álvarez et al., 2000). El proceso de descomposición de residuos orgánicos resulta complejo y ocurre en cinco etapas de acuerdo con las condiciones del medio (*figura 2.11.*), determinadas por la temperatura, la presencia de oxígeno, las características del residuo y la edad del relleno sanitario (Camargo y Vélez, 2009):

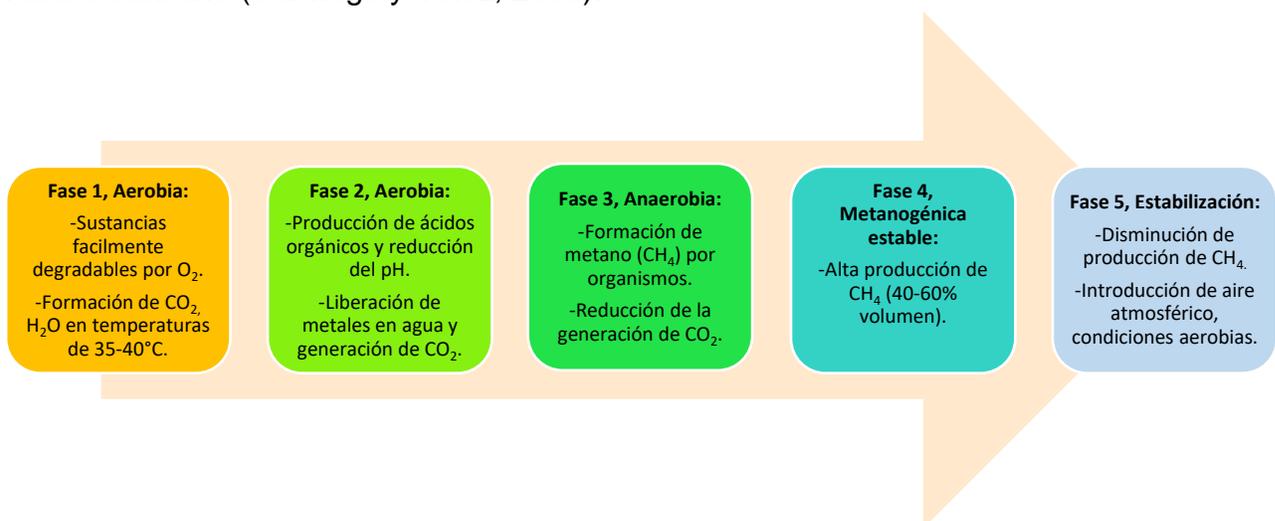


Figura 2. 13. Fases del proceso de descomposición de residuos orgánicos en un relleno sanitario. Adaptado de: (Camargo y Vélez, 2009).



Los gases producidos dentro de un relleno sanitario se dividen en gases principales y gases traza (*figura 2.12.*). Los gases principales resultan de la descomposición de la materia orgánica, mientras que los gases traza son el producto de la vaporización de compuestos presentes en los residuos sólidos. Algunos de los gases traza pueden ser tóxicos y pueden presentar un riesgo para la salud pública (Tchobanoglous et al., 1993) citado por (Chávez, 2014):

Tabla 2. 7. Porcentaje de los componentes del gas producido en un relleno sanitario.

Componente	Porcentaje (base volumen seco)
Metano	45-60
Dióxido de carbono	40-60
Nitrógeno	2.0-5.0
Oxígeno	0.1-1.0
Sulfuros, disulfuros, mercaptanos, etc.	0-1.0
Amoníaco	0.1-1.0
Hidrógeno	0-0.2
Monóxido de carbono	0-0.2
Constituyentes traza	0.01-0.6

Fuente: (Chávez, 2014; adaptado de Tchobanoglous et al., 1993).

2.6. Marco Jurídico.

Como la generación de residuos afecta directamente a la población que vive cerca del punto donde son producidos y depositados, esto conlleva a que las autoridades deben mantener y regular mediante leyes y reglamentos, condiciones de seguridad y de protección, dependiendo de qué circunstancias se encuentre la población tanto en los ámbitos económico social e incluso temporal, ya que si la sociedad evoluciona, estas normas deben ser reformadas, esta actividad es exclusiva del poder legislativo, mismo que está encargado de crear, derogar o abrogar esas normas las cuales tienen un carácter que es obligatorio (Vázquez, 2004).

2.6.1. Artículos Constitucionales.

El *Artículo 4º Constitucional* habla sobre el derecho a un medio ambiente adecuado, además del derecho de protección a la salud, en su párrafo sexto: “Toda persona tiene derecho a un medio ambiente adecuado para su desarrollo y bienestar”.



El *Artículo 25° Constitucional* trata del derecho al desarrollo sustentable: “Bajo criterios de equidad social y productividad se apoyará e impulsará a las empresas de los sectores social y privado de la economía, sujetándolos a las modalidades que dicte el interés público y al uso, en beneficio general, de los recursos productivos, cuidando su conservación y el medio ambiente.”

El *Artículo 115° Constitucional* en su apartado III, inciso C menciona: Los Municipios tendrán a su cargo las funciones y servicios públicos siguientes: c) Limpia, recolección, traslado, tratamiento y disposición final de residuos”.

2.6.2. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR, 2018).

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) se basa en el reconocimiento de la generación de residuos en el hogar y en todas las actividades productivas y sociales, por lo cual establece pautas de conducta para reducir su generación, fomentar su reutilización, reciclado y co-procesamiento, así como para lograr su manejo seguro y ambientalmente adecuado a lo largo de su ciclo de vida integral, en todo tipo de fuentes y en todo el país, aplicando la responsabilidad común, pero diferenciada, de todos los sectores en el logro de sus objetivos, de manera acorde a lo previsto en el capítulo 20 de la Agenda 21 de las Naciones Unidas en la materia (DOF, 2018).

2.6.3. Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (RLGPGIR, 2014).

El reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (RLGPGIR), en sus artículos 11 y 12; establece los criterios básicos que las normas oficiales mexicanas tienen que seguir, cuando estén sujetas a planes de manejo para residuos sólidos urbanos y de manejo especial, con el fin de determinar el plan de manejo más apropiado y la elaboración de listados de los residuos sujetos a estos planes, según las características de los desechos y sus mecanismos de control. A partir de su entrada en vigor el 30 de diciembre de 2006, todos los generadores de residuos, incluyendo los ya registrados ante la autoridad competente, tienen que reportar dicha generación y determinar a cuál de las categorías de generadores establecidas en estos ordenamientos pertenecen (grandes, pequeños o microgeneradores) (DOF, 2014).



2.6.4. Normas Oficiales Mexicanas (NOM's), ASTM e ISO.

Los plásticos biodegradables son materiales que se biodegradan sólo en entornos específicos, por lo que existen estándares para evaluar su biodegradación en composta, suelo, ambientes marinos, rellenos sanitarios y procesos de degradación anaerobia (sin oxígeno). Es difícil definir cuánto tardaría la biodegradación en condiciones reales debido a las propiedades de cada plástico, en cambio, se compara qué tanto se degradan estos materiales en comparación a otros que generalmente se consideran muy biodegradables, como la celulosa. Las pruebas de biodegradabilidad varían en complejidad y requerimientos técnicos, pero es común que se prolonguen durante varios meses (Vázquez et al., 2014).

Con respecto a las Normas Oficiales Mexicanas se tienen las siguientes:

- NOM-161-SEMARNAT-2011. Clasifica como *residuos de manejo especial* a aquellos generados por las actividades pesqueras, agrícolas, silvícolas, forestales, avícolas, ganaderas, incluyendo los residuos de los insumos utilizados en esas actividades: “Los residuos agroplásticos generados por las actividades intensivas, agrícolas, silvícolas y forestales” (DOF, 2011).

Hablando de los métodos de prueba estandarizados, se cuenta con las normas ASTM y normas Europeas como las ISO y las EN. La *tabla 2.7.* muestra las normas vigentes en cuanto a pruebas de biodegradabilidad de materiales plásticos, que para este proyecto solo utilizaremos la primer ASTM:



Tabla 2. 8. Métodos de prueba estandarizados para plásticos biodegradables.

Métodos de prueba estandarizados para plásticos biodegradables	
(ASTM International, 2012)	Método de prueba para la determinación de la biodegradación de materiales plásticos en condiciones aceleradas de relleno sanitario.
(ASTM D5338-11, 2011)	Método de prueba para la determinación de la biodegradación aerobia de materiales plásticos en condiciones de composteo controlado, incorporando temperaturas termofílicas.
(ASTM D5511-12, 2012)	Método de prueba para la determinación de la biodegradación anaerobia de materiales plásticos en condiciones de digestión anaerobia con alto contenido de sólidos.
(ASTM D5988-12, 2012)	Método de prueba para la determinación de la biodegradación aerobia en el suelo.
(ASTM D7475-11, 2011)	Método de prueba para la determinación de la biodegradación aerobia y anaerobia de materiales plásticos en condiciones de relleno mediante pruebas aceleradas de biorreactor.
(ASTM D6400-04, 2004)	Especificaciones estándar para plásticos compostables.
(ASTM D6002-96, 1996)	(Nueva aprobación 2002) Guía estándar para la evaluación de la compostabilidad de materiales plásticos degradables.
(ISO 13975:2012, 2012)	Determinación de la biodegradación anaerobia total de materiales plásticos en sistemas controlados de digestión de lodos-Método por medición de producción de biogás.
(ISO 14855-1:2012, 2012)	Determinación de la biodegradabilidad aerobia total de materiales plásticos en condiciones de composteo controlado- Método por análisis de la generación de dióxido de carbono. Parte 1: Método general.
(ISO 15985:2004, 2004)	Determinación de la biodegradación anaerobia total y desintegración en condiciones de digestión anaerobia con alto contenido de sólidos – Método por análisis del biogás liberado.
(ISO 17556:2012, 2012)	Determinación de la biodegradabilidad aerobia total de materiales plásticos en suelo mediante la medición de la demanda de oxígeno en un respirómetro o la masa generada de dióxido de carbono.
(UNE-EN ISO 14852:2005, 2005)	Determinación de la biodegradabilidad aeróbica final de los materiales plásticos en medio acuoso. Método según el análisis de dióxido de carbono generado (ISO 14852:1999).
(ISO 14853:2005, 2005)	Determinación de la biodegradación anaerobia total de materiales plásticos en sistemas acuosos – Método por medición de la producción de biogás.
(UNE 13432:2001/AC, 2001)	Determinación de la biodegradabilidad de los envases plásticos bajo condiciones de composteo y requisitos para poder certificar que es compostable.
(UNE-EN ISO 14851:2005, 2005)	Determinación de la biodegradabilidad aeróbica final de los materiales plásticos en medio acuoso. Método según la medición de la demanda de oxígeno en un respirómetro cerrado (ISO 14851:1999)

Fuente: Elaboración propia bajo la búsqueda de diversas normas.



Se realizó un cribado de normas y métodos estandarizados (*tabla 2.8.*) relacionados con el proceso anaerobio que se trabajará, y así puntualizar las diversas metodologías y condiciones con las que se puede trabajar la biodegradación de plásticos, considerando la adaptación a estos métodos pues no existe uno específicamente para agroplásticos biodegradables.

Tabla 2. 9. Cribado de métodos de prueba estandarizados para plásticos biodegradables en procesos anaerobios y aerobio.

Métodos de prueba estandarizados para plásticos biodegradables	
(ASTM D5526-11, 2011)	Método de prueba para la determinación de la biodegradación de materiales plásticos en condiciones aceleradas de relleno sanitario.
(ASTM D5338-11, 2011)	Método de prueba para la determinación de la biodegradación aerobia de materiales plásticos en condiciones de composteo controlado, incorporando temperaturas termofílicas.
(ASTM D5511-12, 2012)	Método de prueba para la determinación de la biodegradación anaerobia de materiales plásticos en condiciones de digestión anaerobia con alto contenido de sólidos.
(ASTM D5988-12, 2012)	Método de prueba para la determinación de la biodegradación aerobia en el suelo.
(ASTM D7475-11, 2011)	Método de prueba para la determinación de la biodegradación aerobia y anaerobia de materiales plásticos en condiciones de relleno mediante pruebas aceleradas de biorreactor.
(ASTM D6002-96, 1996)	(Nueva aprobación 2002) Guía estándar para la evaluación de la compostabilidad de materiales plásticos degradables.
(ISO 15985:2004, 2004)	Determinación de la biodegradación anaerobia total y desintegración en condiciones de digestión anaerobia con alto contenido de sólidos – Método por análisis del biogás liberado.
(ISO 17556:2012, 2012)	Determinación de la biodegradabilidad aerobia total de materiales plásticos en suelo mediante la medición de la demanda de oxígeno en un respirómetro o la masa generada de dióxido de carbono.

Fuente: Elaboración propia bajo la búsqueda de diversas normas

CAPITULO 3. METODOLOGÍA

3.1. Etapas de la metodología

En la *figura 3.1.* se resumen de manera esquemática las etapas del desarrollo del trabajo desde la revisión bibliográfica hasta la obtención de resultados.

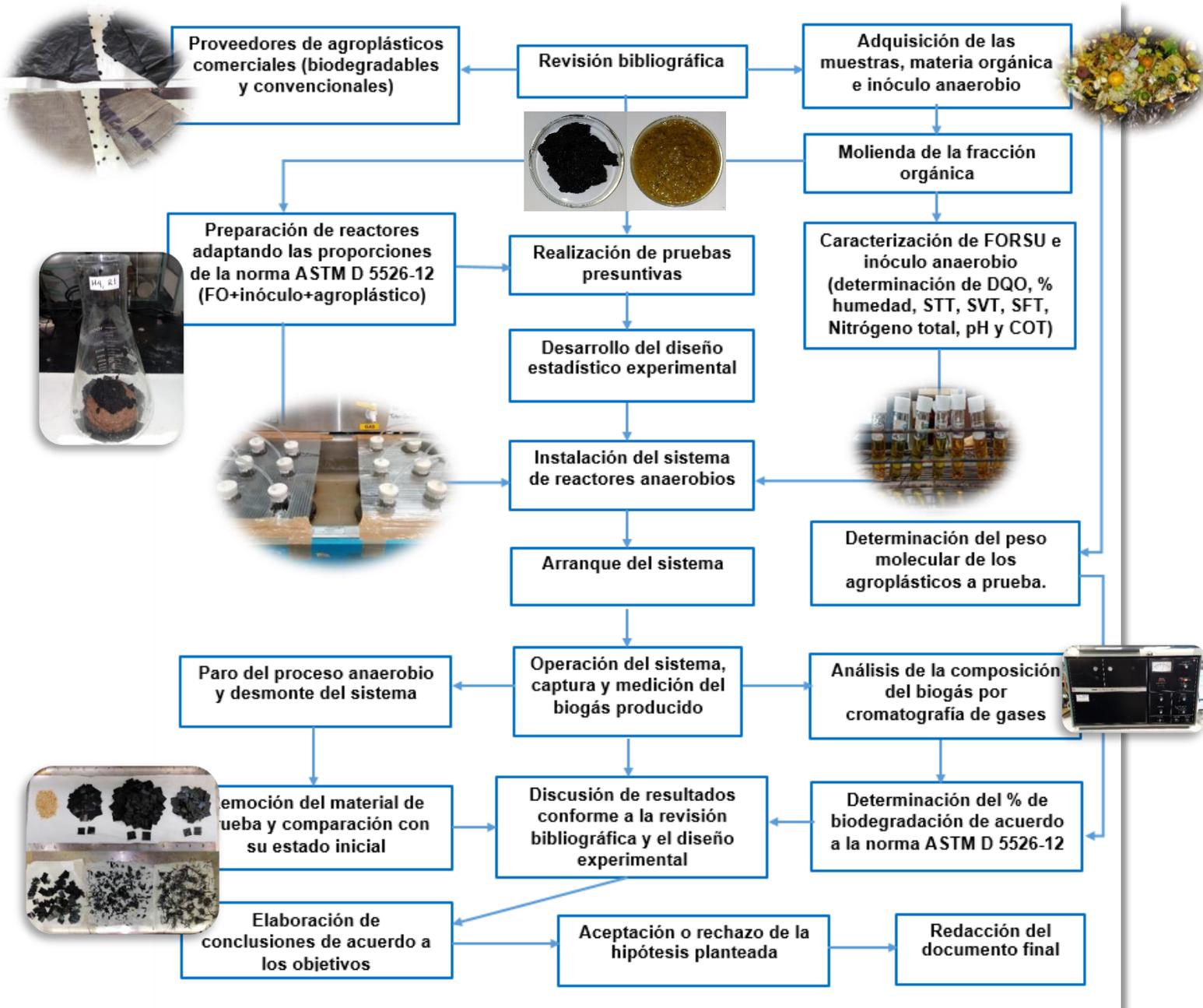


Figura 3. 1. Metodología general del trabajo de tesis. Fuente: Elaboración propia



3.2. Adaptación de la norma ASTM D5526-12

El método descrito en la norma trata establece la determinación del grado y velocidad de biodegradación anaerobia de materiales plásticos en un ambiente de relleno sanitario acelerado. Los materiales de prueba son mezclados con residuos sólidos urbanos pre-tratados y expuestos a un inóculo derivado de digestores anaerobios. La descomposición anaerobia ocurre en condiciones secas (más de 30 % de sólidos totales), dentro de reactores por lotes y sin mezclado. Por otro lado, debido a que no hay una norma específica para evaluar los plásticos agrícolas biodegradables, se decidió adaptar la norma ASTM D5526-12, la que permitió cumplir el objetivo.

La metodología está diseñada para calcular un porcentaje de conversión de carbono en la muestra, a carbono en forma gaseosa bajo condiciones que se asemejan a las presentes en un relleno sanitario y aunque pueden no simular todas estas condiciones (especialmente en aquellos biológicamente inactivos), más bien se imitan las de los rellenos en los cuales el gas generado es recuperado o hasta promovido mediante inoculación de lodos, recirculación de lixiviados, control de humedad y temperatura.

La metodología se adaptó de la norma ASTM D5526-12 de la siguiente manera:

1. Seleccionar y analizar un material plástico agrícola de prueba (convencional y biodegradable).
2. Obtener una fracción orgánica de RSU y un inóculo anaerobio proveniente de un digestor anaerobio.
3. Exponer el material de prueba a un proceso anaerobio por lotes y sin agitación. El contenido de sólidos debe ser mayor a 30 %. Se trabajó a una temperatura de 55°C para simular las condiciones de relleno sanitario según las temperaturas reportadas en rellenos de acuerdo con la literatura.
4. Medir el volumen del biogás y el carbono total (en forma de CO₂ y CH₄) en el biogás como función del tiempo.
5. Remover el material de prueba para su comparación visual y física con el material de prueba antes de entrar al reactor y posterior reporte.
6. Evaluar el porcentaje de biodegradabilidad del material de prueba (agroplástico biodegradable o convencional) a las condiciones establecidas en el experimento.

El porcentaje de biodegradabilidad se obtuvo determinando el porcentaje de conversión de carbono del material de prueba a carbono en fase gaseosa, sin incluir la cantidad de carbono del material de prueba que se convierte en biomasa y que por lo tanto no es metabolizado a CO₂ y CH₄.

Los resultados que se obtienen en este tipo de pruebas se muestran en la *figura 3.2.*, en donde se muestran los resultados preliminares para un contenido de materia seca de 40 % y una temperatura de 35°C. Las curvas representan la producción de biogás en litros para 1 kg de residuo sólido urbano pre-tratado más 10 % de inóculo mesofílico sin material de prueba (blanco) y con 60 g de celulosa (control positivo).

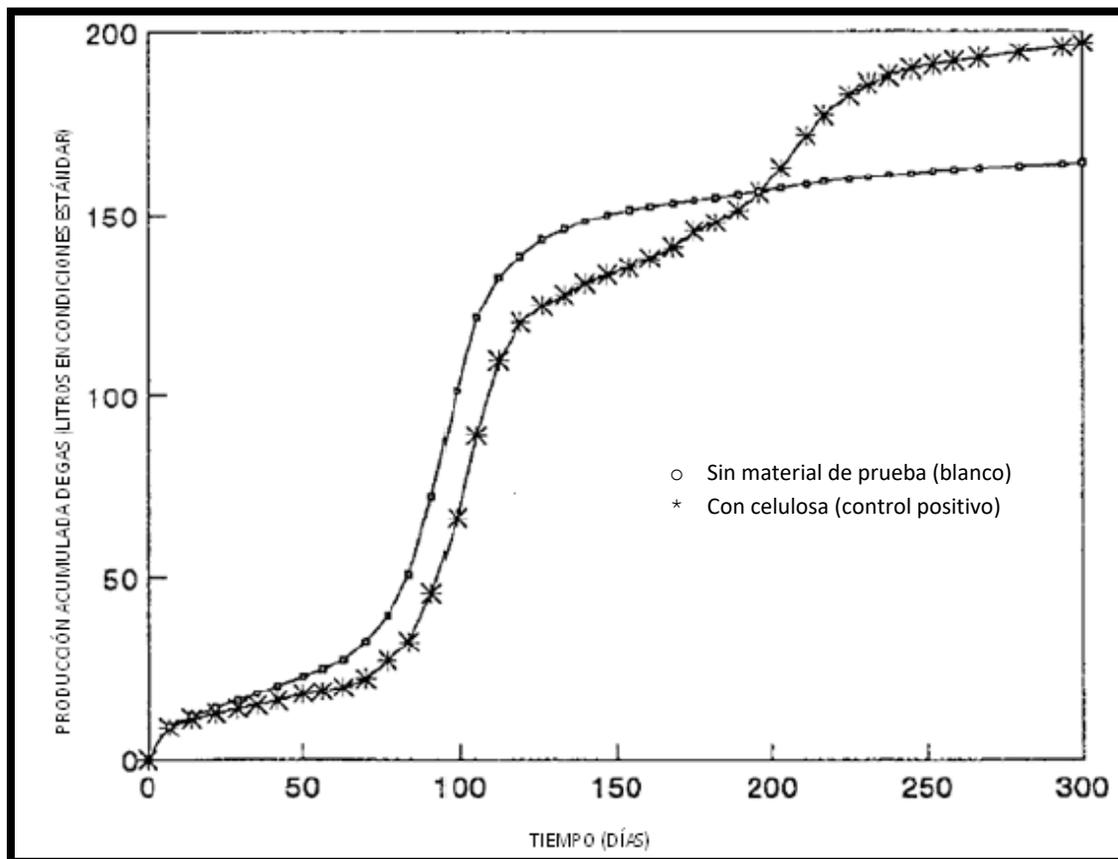


Figura 3. 2. Producción acumulada de biogás (300 días) para 1 kg de FORSU pre-tratada más inóculo anaerobio mesofílico sin material de prueba (blanco) y con celulosa (control positivo). Fuente: (ASTM International, 2012)



3.3. Proveedores de plásticos agrícolas comerciales (material convencional y biodegradable)

Los plásticos agrícolas biodegradables utilizados en el campo Mexicano, en su mayoría son importados de países europeos por lo que su obtención comercial se torna un tanto difícil para el público en general. Algunos usuarios de plásticos agrícolas los reciclan para utilizar éste polímero en otras aplicaciones; no podrían ser utilizados nuevamente en el campo pues pierden propiedades importantes para proteger los cultivos y hablando de los plásticos agrícolas biodegradables es aún más difícil identificar los lugares en donde se emplean debido a su alto costo (Gómez y Arellano, 2014).

Existen diversos proveedores de agroplásticos, sin embargo únicamente se analizaron los que tenían las características requeridas para el experimento (material biodegradable) y de acuerdo a la facilidad de adquisición. Por razones de confidencialidad de las empresas se enumeraron los proveedores analizados y en la tabla 3.1 se describe la composición del material y lugar de distribución:

Tabla 3. 1. Proveedores seleccionados para la adquisición del material

Proveedor	Composición del agroplástico biodegradable	Distribución
1	Polímeros biodegradables y compostables con ácido poliláctico y diversos aditivos en su composición	Europa, América, Asia
2	De diferentes aplicaciones en la agricultura (acolchados, mallas, macetas, rafia, bolsas, etc.) a base de material biodegradable como ácido poliláctico y materiales compostables en menor proporción	Europa
3	Películas de acolchado a base de biopolímeros no especificados biodegradables y oxo-degradables	Europa
4	Películas de acolchado biodegradable a base de PBD y aditivos pro-degradantes en su formulación	Europa

Fuente: Elaboración a partir de proveedores.

El proveedor 1 tiene una amplia gama de plásticos biodegradables, que de acuerdo con la información disponible tiene aplicaciones de tipo agrícola. Una de las muestras que se obtuvo, está compuesta a partir de productos del mismo proveedor. Entre ellos están aditivos que dan propiedades físicas y mecánicas al producto, y materiales compostables y biodegradables como el ácido poliláctico. Este acolchado es usado para evitar la penetración de la luz a los cultivos eliminando el desarrollo de malezas.



El proveedor 2 cuenta con una gran variedad de agroplásticos biodegradables, de entre ellos se eligió y obtuvo un agrotexil basado en dos polímeros, un polímero es biodegradable (PLA) y el segundo es compostable. Es un producto eficiente, sostenible y orgánico. Generalmente se coloca como cualquier acolchado y permite controlar el microclima para el suelo, mejora y protege el crecimiento de las plantas estimulado la tasa de supervivencia de la nueva siembra y evita el crecimiento de malezas. La descomposición del agrotexil biodegradable depende de diferentes factores ambientales como la radiación solar, la temperatura, el agua y el oxígeno comenzando a la mayor brevedad después de 3 años.

El siguiente proveedor (número 3) tiene disponibilidad de dos plásticos biodegradables, uno es biodegradable (etiquetado como lámina de biopolímero totalmente biodegradable) y el otro es oxodegradable (etiquetado como oxo-biodegradable: Para mejores resultados, se diseña para cada cultivo, zona de exposición y fecha de aplicación, con el fin de ajustar la vida del acolchado a las necesidades del cultivo). Finalmente, el proveedor 4 cuenta con una película etiquetada como “plástico lineal negro biodegradable para acolchar no perforado”. No fue posible adquirir ninguno de los productos de estos dos proveedores, además de que la muestra oxo-degradable no cuenta con las características requeridas.

3.4. Adquisición de agroplásticos (convencional y biodegradables)

La adquisición del agroplástico convencional se llevó a cabo mediante el contacto de la Asociación de Recicladores de Plásticos Agrícolas Mexicanos (ARPAM) derivado de la investigación y diseño de un planta recicladora de estos materiales realizada para ellos. Por otro lado, se colectaron diversas muestras de agroplásticos de diferentes características y aplicaciones (a base de PEBD, material principal de los agroplásticos no biodegradables).

De las muestras agroplásticos tradicionales disponibles (*figura 3.3.*), se eligió la película opaca de acolchado que impide el paso de luz UV (*figura 3.4.*), de color negro comúnmente usado en los cultivos mexicanos (Gómez y Arellano, 2014).

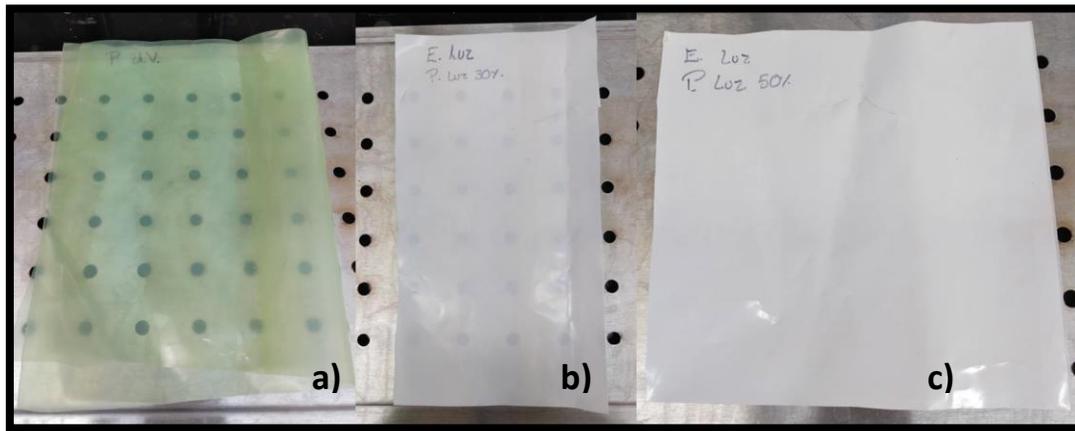


Figura 3. 3. Muestras disponibles de agroplásticos convencionales: a) con paso de luz UV, b) con paso de luz del 30% y c) con paso de luz del 50%



Figura 3. 4. Muestra seleccionada de agroplástico opaco

Las películas agrícolas biodegradables se adquirieron del mercado europeo. La muestra del proveedor 1 (figura 3.5-a y b) se compone de diversos de sus productos, entre ellos están aditivos que dan propiedades físicas y mecánicas, materiales biodegradables y compostables (ácido poliláctico). La segunda muestra biodegradable es del proveedor 2 (figura 3.5-c y d), la cual está fabricada solo con material biodegradable y en una menor proporción de material compostable (ácido poliláctico al 95% e hilo de caña al 5%).

De igual manera, se tienen proveedores mexicanos de plásticos biodegradables (bolsas y otras aplicaciones) y proveedores de acolchado convencional pero no específicamente de agroplásticos biodegradables.



Figura 3. 5. Agropásticos biodegradables adquiridas: a) y b) Agropástico a base de materiales del proveedor 1, c) y d)) Agropástico del proveedor 2

3.5. Determinación del peso molecular de las muestras agrícolas biodegradables

Las muestras obtenidas se comercializan en el mercado como biodegradables y, de acuerdo con Ammala (2011), deben contar con un peso molecular por debajo de 5000 g/mol. La investigación de Roe-Sosa (2015) sugiere que el peso molecular debe ser de alrededor de 6000 g/mol para que ocurra la biodegradación de películas termo-oxidativas.

Por otro lado, se envió una muestra de S4 (muestra previa y posterior al proceso) al Centro de Investigaciones en Química Aplicada (CIQA- Saltillo, Coahuila) para la determinación del peso molecular con el fin de confirmar una disminución en el



tamaño de la cadena polimérica por medio de éste parámetro. Ésta consideración se hizo tomando en cuenta que, de las muestras agroplásticas biodegradables, únicamente la muestra S4 tuvo un comportamiento afín al proceso de biodegradación anaerobio (producción de CH₄ y CO₂).

Las muestras se prepararon pesando 10 mg y disolviéndolas en 10 mL de tetrahidrofurano, posteriormente la solución se pasó por filtros de teflón (0.45 μ) para eliminar el material insoluble. Las soluciones de las muestras fueron inyectadas a un Cromatógrafo de Permeación en Gel marca Agilent modelo PL GPC-220 bajo condiciones de 30 ° C y 100 μL de inyección en 2 columnas lineales con detectores de índice de refracción.

La curva de calibración fue construida con base en 10 estándares de poliestireno (PS), cuyos pesos moleculares varían desde 1,950 hasta 3,250,000 los cuales fueron preparados bajo las mismas condiciones que las muestras. La determinación de los diferentes promedios de peso molecular fue con base en la curva de calibración universal a estándares de poliestireno (PS).

3.6. Obtención de la fracción orgánica y del inóculo anaerobio

La fracción orgánica se obtuvo mediante la acumulación de residuos orgánicos de la unidad de departamentos Villa Olímpica, ubicada sobre Insurgentes Sur en el 3493 en CDMX, estos residuos se separan en contenedores independientes.

La muestra se recolectó un día destinado al acopio de residuos orgánicos el día 18 de agosto del 2018 y no se consideró el método de separación de la NMX-AA-022-1985 ni el método del cuarteo de la norma oficial mexicana NMX-AA-15-1985 debido a que la norma específica en sus objetivos y campos de aplicación que: “Para aquellos residuos sólidos de características homogéneas, no se requiere seguir el procedimiento descrito en esta norma” (DOF, 1992). Los residuos orgánicos mantenían homogeneidad dentro de la muestra obtenida y el plástico agrícola tiene características que lo diferencian adecuadamente del resto de los residuos orgánicos por lo que no fue necesario el procedimiento.

Posteriormente se obtuvieron 3 kg de residuos orgánicos para la instalación de los 12 reactores y su caracterización de acuerdo a la norma ASTM D5526-12. La FORSU se almacenó en la cámara fría del Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (LISA) en el Posgrado de Ingeniería Ambiental, en bolsas selladas herméticamente (*figura 3.6.*).



Figura 3. 6. FORSU recolectada y almacenada

El inóculo anaerobio (*figura 3.7.*) fue proporcionado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, este tiene procedencia de un reactor UASB de la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa cervecera Grupo Modelo. Se centrifugó y colecto en un recipiente de 5L, el cual se almacenó en la cámara fría del LISA.



Figura 3. 7. . Fracción de la muestra de inóculo anaerobio obtenido

3.7. Molienda de fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU)

Con base en la literatura, se encontró que a menor tamaño de partícula, mejora la biodegradación de los residuos, debido al aumento del área superficial (Mostafa, 2002). Para asegurar la homogeneidad del tamaño de partícula de la FORSU, se utilizó una licuadora de uso doméstico (*figura 3.8*).



Figura 3. 8. Fracción orgánica luego de la molienda

3.8. Caracterización de la FORSU e inóculo anaerobio

Una vez realizada la molienda y trituración de la fracción orgánica se realizó la caracterización en términos de humedad, sólidos totales (STT), sólidos volátiles (STV), sólidos fijos (STF), DQO, nitrógeno total y pH de acuerdo con las normas NMX-AA-016-1984, APHA-AWWA-WEF 2540-B (2005), APHA-AWWA-WEF 2540-E (2005), APHA-AWWA-WEF 5220-D, NMX-AA-24-1984 y NMX-AA-025-1984, respectivamente (*tabla 3.2.*). Además se determinó el carbono orgánico total (COT):

Tabla 3. 2. Caracterización de inóculo anaerobio y FORSU de acuerdo a la norma ASTM D5526-12

Determinación de acuerdo a ASTM D5526-12	Método analítico	Técnica
% Humedad	NMX-AA-016-1984	Gravimetría. Por diferencia de masas.
Sólidos totales (STT)	APHA-AWWA-WEF 2540-B	Gravimetría. Masa de sólidos secados de 103-105°C.
Sólidos volátiles (STV)	APHA-AWWA-WEF 2540-E	Gravimetría. Masa de sólidos incinerados a 550°C.
Sólidos fijos (STF)	APHA-AWWA-WEF 2540-E	Gravimetría. Masa de sólidos incinerados a 550°C.
Demanda química de oxígeno (DQO)	APHA-AWWA-WEF 5220-D	Método colorimétrico. Digestión a 150°C y lectura a 600 nm.
Nitrógeno total	NMX-AA-024-1984	Titulación por retroceso. Digestión ácida, neutralización y titulación con H ₂ SO ₄ 0.02N.
pH	NMX-AA-025-1984	Potenciométrico.
Carbono Orgánico Total (COT)	Combustión – Oxidación catalítica Detector de infrarrojo no dispersivo	

Fuente: Elaboración propia

Para la caracterización de la FORSU y el inóculo, se realizaron disoluciones en agua destilada de acuerdo con la norma ASTM D5526-12, exceptuando las pruebas de N₂ total para la que se utilizó muestra semi-sólida (figura 3.9). Las determinaciones indican el contenido de nutrientes de la FORSU y el potencial para biodegradar durante el proceso anaerobio.

La determinación de Carbono Orgánico Total (COT) se realizó con el fin de estimar el porcentaje de carbono en las muestras de FORSU y de inóculo anaerobio. Las mediciones se llevaron a cabo antes y después del proceso de biodegradación utilizando un analizador de Carbono y Nitrógeno marca SHIMADZU modelo SSM-5000 con módulo de muestras sólidas en el LIA del Instituto de Ingeniería de la UNAM.



Figura 3. 9. Determinaciones analíticas para la caracterización: a) y b) DQO; c), d) y e) Nitrógeno total por Kjeldhal; f) y g) STT, STV y STF; h) % Humedad; i) Disoluciones.



3.9. Diseño estadístico experimental

Para el diseño estadístico experimental se tomaron en cuenta los factores involucrados dentro de la experimentación, se definió la unidad experimental, el tratamiento y la cantidad de repeticiones, así como el modelo estadístico del experimento.

De acuerdo a la metodología de la norma ASTM D5526-12, se fijaron los parámetros diversos. La temperatura se colocó a 55°C. Debido a que las proporciones utilizadas de FORSU (la cual nombraremos *fracción orgánica* o *FO* para simplificar el nombre), inóculo y plástico agrícola convencional o biodegradable) están determinadas por la normatividad, se consideró de la siguiente manera:

- Factor: Plástico Agrícola (tradicional/biodegradable o sustrato (Fijo 4 niveles).
- Variable de respuesta: Volumen producido de biogás medido a través del tiempo durante diez semanas, luego de una semana del inicio de la experimentación (estabilización del sistema).
- Parcela pequeña o u.e. pequeña: Reactor (FO+INÓCULO+S) a tiempo t_k ($t_1, t_2, t_3, t_4, \dots, t_{10}$). Tratamiento de parcela pequeña: tiempo, el cual se esperó diera un efecto a la variable de respuesta y afectara los valores medidos.
- Parcela grande o u.e. grande: Reactor (FO+INÓCULO). Tratamiento de parcela grande: sustrato (4 niveles), considerando que la composición del plástico, según su tipo, es la que daría un efecto a la variable de respuesta y afectaría los valores medidos, se consideró que el tratamiento fue colocar un tipo diferente de plástico (agropástico convencional o biodegradable) a la unidad experimental de la parcela grande.
- Para cada factor, se realizaron 3 repeticiones, debido a que la celulosa se ocupó como blanco positivo, cuenta como un nivel más para el factor plástico, dando así 12 reactores experimentales.

• Modelo:
$$y_{ijk} = \mu + S_i + R_{j(i)} + T_k + (ST)_{ik} + \varepsilon_{ijk}$$

$i = 1, 2, 3, 4$

$j = 1, 2, 3$ (reactores con el mismo sustrato).

$K = 1, \dots, 10$ (semanas).

Donde:

- y_{ijk} = Variable de respuesta (volumen de biogás producido), j -ésima observación del i -ésimo tratamiento en el k -ésimo tiempo.

- μ = media general
- S_i = efecto del tipo de plástico (sustrato), tratamiento de parcela grande ($i= 1, 2, 3, 4$).
- $R_{j(i)}$ = error del reactor j -ésimo (aleatorio) anidado en i -ésimo tratamiento (tipo de agroplástico).
- T_k = efecto del tiempo k ($1, 2, \dots, 10$), tratamiento de parcela pequeña.
- $(ST)_{ik}$ = efecto de la interacción entre el sustrato x tiempo.
- ε_{ijk} = error asociado a la ijk -ésima observación.

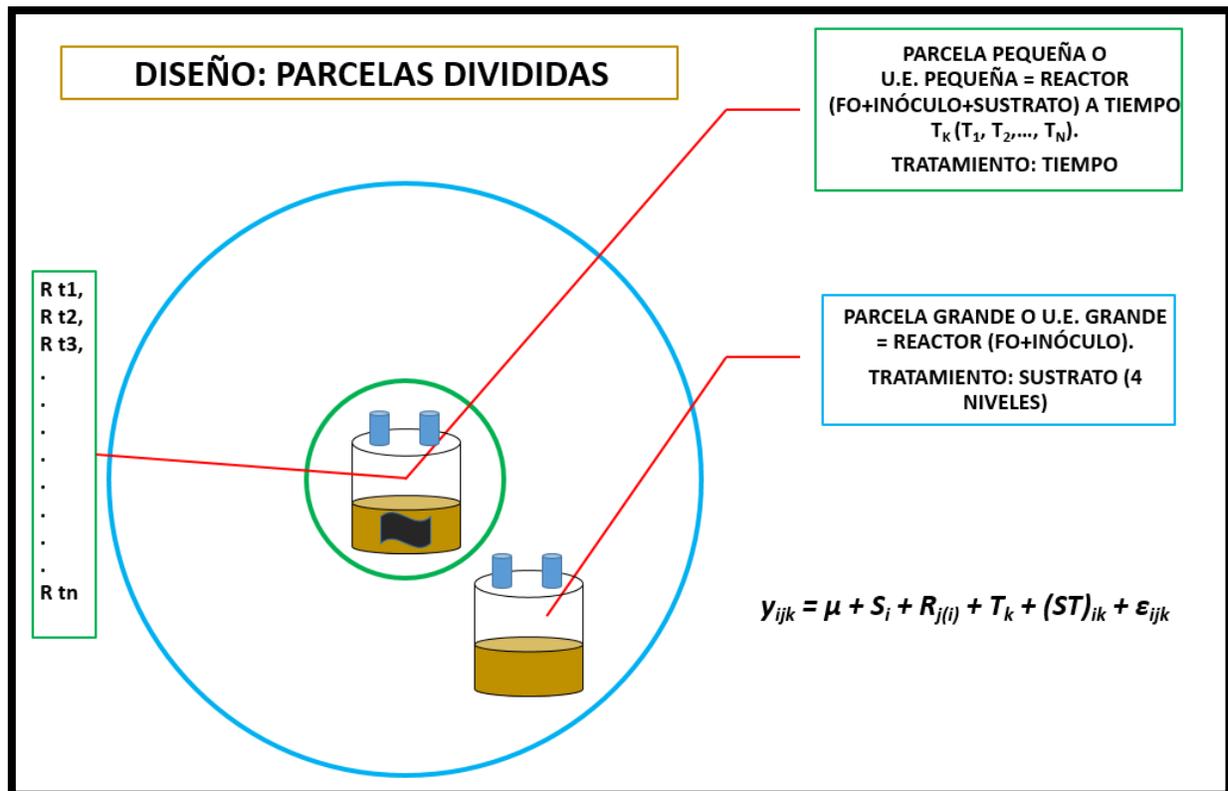


Figura 3. 10. Esquema de diseño experimental en "Parcelas divididas". Fuente: Elaboración propia

3.10. Pruebas presuntivas

Antes de realizar la experimentación definitiva, se realizaron pruebas presuntivas de biodegradación usando plásticos agrícolas tradicionales y otro tipo de plástico biodegradable (bolsas de basura biodegradables) como sustituto del material agrícola biodegradable. Estas pruebas ayudaron a optimizar el proceso de biodegradación que se llevó a cabo de manera formal el semestre posterior y dieron una comparación cualitativa del comportamiento del sistema, además se lograron identificar las deficiencias del sistema y del material y con ello se pudo anticipar y realizar el experimento definitivo de forma adecuada.

Estas pruebas se efectuaron utilizando el plástico agrícola convencional con paso de luz UV del 30% y bolsas de plástico biodegradable (biobolsas en *figura 3.11.*).



Figura 3. 11. Bolsas de plástico biodegradable utilizadas para simular el plástico agrícola biodegradable en las pruebas presuntivas

Las bolsas de plástico biodegradable están etiquetadas como un biopolímero fabricado a base de plantas o recursos renovables. De acuerdo con la información del producto, tienen un tiempo de biodegradación de 90 a 240 días, es decir, se estima que su biodegradación comienza a partir del tercer mes (*figura 3.12.*).

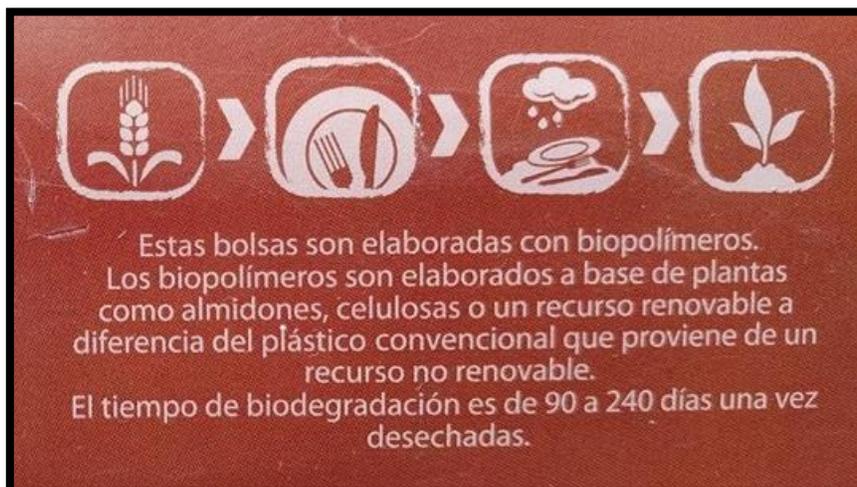


Figura 3. 12. Especificaciones del tiempo de biodegradación del producto

Para cada reactor de prueba se realizó una mezcla de 100 g de FO, 156.6 g de inóculo en peso húmedo y 3 g de polietileno de acuerdo con la norma ASTM D5526-98. Por otro lado, se prepararon 4 reactores, dos contenían muestras del plástico agrícola convencional y los otros dos contenían las bolsas de plástico biodegradable simulando ser el agroplástico biodegradable. Una vez preparada la mezcla para las pruebas presuntivas, se colocó dentro de los reactores, se sellaron herméticamente y se introdujeron dentro del baño María a 55°C.

Inicialmente se trabajó para las pruebas presuntivas con el sistema descubierto, sin embargo, luego de 2 semanas se adaptó una lámina de policarbonato gruesa con perforaciones donde se fijaron los reactores por la boca del matraz, que funcionó de manera efectiva para dos dificultades del sistema: una era la evaporación continua y rápida del agua del baño María, el cual se podía solucionar agregando suficiente agua, lo que aumentaría su duración; esa opción causaba la segunda problemática, que era la elevación de los reactores, movimiento y desacomodo, lo que ocasionaría un desajuste del sistema y la variación de temperatura al agregar agua. En la *figura 3.13.* se muestra como resultó el sistema luego de la adaptación del policarbonato.



Figura 3. 13. Sistema con policarbonato adaptado para fijar los matraces

3.11. Arranque de sistema

3.11.1. Preparación de reactores adaptando las proporciones de la norma ASTM D5526-12 (FO+inóculo+Agroplástico)

Posteriormente se prepararon 12 reactores de 1000 mL (*figura 3.14.*). Para cada reactor se realizó una mezcla de 100 g de FO, 106 g de inóculo anaerobio en peso seco y 6 g de muestra agroplástica con las proporciones correspondientes para la ejecución a escala laboratorio adaptando las cantidades de la norma ASTM D5526-12 (ASTM International, 2012). Los plásticos se cortaron en trozos cuadrados de 1.5x1.5 cm aproximadamente como ejemplifica la *figura 3.15.*



Figura 3. 14. Doce reactores preparados con la mezcla de FO+inóculo+agropásticos en las proporciones adaptadas de la norma ASTM D5526-12



Figura 3. 15. Reactores con agropástico convencional (izquierda) y biodegradable (derecha)

Las repeticiones se formularon con la mezcla FO+inóculo+sustrato y nombraron como se indica en la *tabla 3.3.* con base en el diseño estadístico experimental, parcelas divididas, descrito anteriormente.



Tabla 3. 3. Sustratos aplicados como tratamiento a la mezcla (FO+inóculo+sustrato)

Repeticiones	Sustrato
3	S1: Celulosa (blanco positivo)
3	S2: Agroplástico convencional (PEBD)
3	S3: Agroplástico Biodegradable (Proveedor 1)
3	S4: Agroplástico Biodegradable (Proveedor 2)

Fuente: Elaboración propia

Una vez preparada la mezcla para las pruebas, se colocó dentro de los reactores, se sellaron herméticamente y se introdujeron dentro del baño María a 55°C, como se realizó para las pruebas presuntivas.

Los reactores con celulosa fueron la base de comparación para definir cualitativamente el resto de los reactores (con muestras plásticas). Dicha comparación reflejaría el efecto del sustrato biodegradable para demostrar si hay biodegradación en los agropásticos (convencional o biodegradable). La comparación entre los reactores con la fracción orgánica, inóculo y agropástico (convencional o biodegradable) indicaría el efecto del tipo de plástico agrícola en la biodegradación.

3.11.2. Instalación del sistema y de captura de biogás

Para la producción y captura del biogás se implementó el método de la probeta invertida que funciona mediante el desplazamiento del volumen de agua dentro de la probeta luego de iniciar el arranque del sistema e inicio de la producción de biogás. La producción de biogás fue la causa del desplazamiento del agua dentro de la probeta, esto permitiría medir la cantidad de biogás producido. En la figura 3.16. se observa el esquema del sistema que se ideó para su construcción posterior:

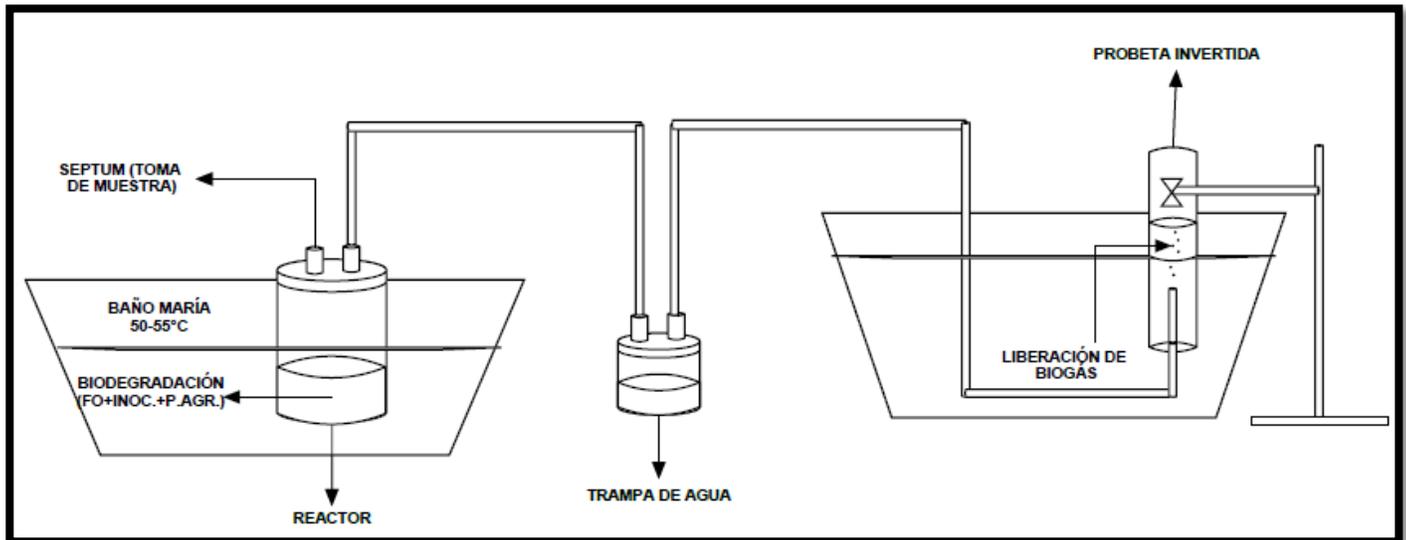


Figura 3. 16. Esquema de diseño del sistema

Para construir el sistema se utilizó un baño María marca THELCO 186 (figura 3. 17.) solicitado en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería, el cual cuenta con un regulador y una resistencia que enciende al detectar el cambio de temperatura, manteniendo el sistema a un valor deseado. Considerando las temperaturas alcanzadas en los rellenos sanitarios (Esposito et al., 2012; Hanson, 2010), se ajustó el baño María a 55°C para simular la condición de relleno y se usó un termómetro digital marca Fluke modelo 51 para monitorear la estabilidad de la temperatura.



Figura 3. 17. Baño María donde se instalaron los reactores para las pruebas de biodegradación de muestras agrolásticas.

Para la instalación de los reactores se utilizaron matraces de 1000 mL. Dentro del reactor se colocó la mezcla de fracción orgánica+inóculo+plástico agrícola (tradicional y biodegradable de 1.5 x 1.5 cm aproximadamente). Cada reactor se cerró con corchos de caucho del número 6 y se sellaron herméticamente con silicón de alta seguridad. A cada corcho se le realizaron dos perforaciones, en una de ellas se acondicionó un punzocat (catéter con tapón en la parte opuesta de la aguja) inyectando la jeringa al corcho y dejándola dentro del reactor, quedando fuera la parte con tapa. Ésta última se fijó al corcho y selló con silicón de alta seguridad para así realizar la toma de muestra de biogás a través del aditamento (*figura 3.18*).

En la otra perforación se conectó con una manguera un matraz de 500 mL y que funcionó como una trampa de agua (sellada herméticamente de igual manera que el reactor) que a su vez, por medio de otra manguera acoplada a una probeta de 250 mL invertida y sumergida en una tina con agua, la probeta está sujeta a un soporte universal con una pinza de tres dedos (*figura 3.19* y *figura 3.20*.)



Figura 3. 18. Punzocat acondicionado para tomar la muestras de biogás

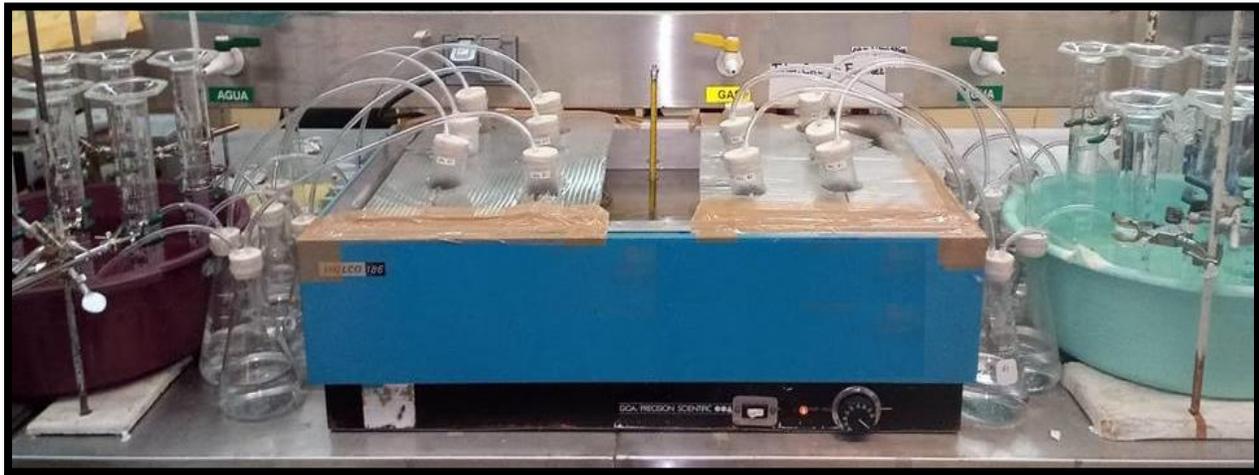


Figura 3. 19. Sistema experimental armado



Figura 3. 20. Sistema experimental armado (lateral izquierdo y lateral derecho respectivamente)

3.12. Operación del sistema anaerobio

3.12.1. Experimentación y lectura diaria de volumen

Antes de introducir los reactores al baño se permitió que la temperatura dentro del reactor se estabilizara durante una hora con el fin de liberar la presión que se originaba por el incremento de temperatura del aire interior, por lo que se consideró la estabilización del sistema durante una semana y la toma de lectura luego de este tiempo de estabilización.

La cantidad de gas se cuantificó diariamente mediante la técnica de desplazamiento de volumen. Al inicio de la experimentación, la probeta invertida tenía cierta cantidad de agua, conforme se fue produciendo biogás dentro de los reactores, éste desplazó dicho volumen de agua que se logró medir en la probeta. Las trampas de agua se purgaron cada que fue necesario.

El baño María se cubrió con una película plástica desmontable para monitorear el nivel de agua dentro y evitar pérdidas por evaporación (*figura 3.21.*). La fecha de arranque inició el 20 de agosto del 2018 y las lecturas de volumen de biogás producido se tomaron diariamente a las 16:00 h y se anotaron en una bitácora para su posterior tratamiento de acuerdo al diseño estadístico.



Figura 3. 21. Estabilización y arranque del sistema experimental

3.12.2. Análisis de la composición de biogás una vez iniciado el proceso

Para determinar la proporción de metano y dióxido de carbono, de cada reactor se tomó una muestra de biogás con una jeringa de insulina de 1 mL purgando las 3 primeras succiones y considerando sólo la cuarta. Las jeringas se etiquetaron correspondiendo a un número de reactor para ser utilizadas para el mismo en la siguiente toma. Cada jeringa con su respectiva muestra de biogás se clavó en un corcho para evitar pérdidas y se trasladaron al Área de Instrumental del LIA del Instituto de Ingeniería en una pequeña hielera.

Posteriormente para la determinación de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) las muestras se llevaron a analizar por cromatografía de gases en un equipo Fisher modelo 1200 (figura 3.22.) en el Área de Instrumental del LIA del Instituto de Ingeniería. Se utilizó como gas de arrastre He a $\pm 150^\circ\text{C}$ y 40 psi.



Figura 3. 22. Cromatógrafo de gases donde se analizó la composición del biogás

La curva patrón se construyó inyectando diferentes volúmenes de gas, de 0.1 mL a 1 mL (con aumentos de 0.1 mL). Posteriormente se inyectaron 500 μL dentro del cromatógrafo de gases y se obtuvo la relación entre área obtenida y el número de moles de cada componente del biogás usando la ecuación de la curva patrón. La inyección de biogás se realizó durante un periodo de 63 días a las 15:00 hrs.

3.13. Paro del proceso anaerobio

3.13.1. Desmante del sistema

El proceso se detuvo el 9 de noviembre del 2018. Asimismo, se apagó el baño María y se dejó enfriar, posteriormente se desmontaron las probetas invertidas, los soportes universales y las tinas de agua. Las trampas de agua se destaparon y se les retiró el contenido; toda agua que tuvo contacto con el biogás y el biogás se trató con solución alcalina (agua jabonosa) por ser parte de los residuos producidos por el experimento. Una vez fríos, se retiraron los matraces del baño María, se lavó el equipo y el material.



3.13.2. Remoción del material de prueba y comparación con su estado inicial

A continuación se destapó cada reactor sellado y se retiró el sobrenadante colocándolo en una charola amplia para la remoción del material de prueba. Con unas pinzas se retiraron los pedazos de plástico agrícola que resultaron visibles y se colocaron en un colador convencional donde se lavaron con agua; se pusieron a secar a temperatura ambiente sobre toallas absorbentes y se guardaron en bolsas plásticas herméticas etiquetadas con el tipo de muestra agroplástica correspondiente para su comparación y análisis.

El sobrenadante se guardó en un bidón de plástico independiente el cual se etiquetó para su disposición posterior por parte del LISA. El sobrenadante de 4 reactores se guardó, es decir, una repetición de cada muestra para analizar su aspecto y reportarlo como evidencia.

3.14. Cálculo del porcentaje de biodegradación de las muestras agroplásticas puestas a prueba de acuerdo con la norma ASTM D5526-12

Siguiendo y adaptando la metodología utilizada en la norma ASTM D 5526-12 (ASTM International, 2012), se calculó la biodegradación de plásticos agrícolas de acolchado biodegradables, convencionales y un control positivo (celulosa) simulando condiciones de relleno sanitario acelerado a nivel laboratorio. Para calcular el porcentaje de biodegradación (%BD) se realizó lo siguiente:

- Cuantificación de la producción de CH_4 y CO_2 por los reactores.
- Determinación del carbono total teórico o carbono inicial del material de análisis (sustratos agroplásticos, FORSU e inóculo anaerobio).
- Identificación del material de prueba biodegradable de manera anaerobia y estimación del %BD de dicho material.

3.14.1. Cuantificación de la producción de CH_4 y CO_2 por los reactores

La cuantificación de CH_4 y CO_2 se realizó diariamente durante el proceso de biodegradación y se detuvo una vez que la producción de metano fue incuantificable por el cromatógrafo de gases para los reactores que lo produjeron. Como ya se ha mencionado, se inyectaron 500 μL de muestra de biogás, el equipo reporta la producción de cada componente en mol producido mediante un software que evalúa la curva y estima el equivalente en mol por inyección. Ese dato solo corresponde a la cantidad del componente en el volumen inyectado por lo que debe convertirse al equivalente del volumen del reactor a las condiciones experimentales.



3.14.2. Determinación del carbono total teórico o carbono inicial del material de análisis

Usando el carbono total en la muestra de ensayo (celulosa, agroplástico convencional y biodegradables), se calculó la máxima producción teórica de gas (dióxido de carbono más metano) procedente de la biodegradación anaeróbica del espécimen de ensayo.

Para estimar el *carbono teórico total o carbono inicial* en los materiales de prueba se usaron los resultados obtenidos de la determinación de COT para el caso del inóculo anaerobio y FORSU que proporcionó el porcentaje de carbono en la muestra. Para el caso de los sustratos (celulosa, agroplástico convencional y biodegradables), fue necesario conocer sobre su peso molecular o fórmula química, porcentaje del material biodegradable en la composición de la muestra completa y porcentaje de carbono en cada uno de estos. La ecuación utilizada fue la siguiente:

$$C_T = \%MB_m \%C_m * M_m \quad (\text{Ec. 3.1.})$$

Donde:

C_T = Carbono teórico total o carbono inicial en el material de análisis (FORSU, inóculo, celulosa, agroplástico convencional y biodegradables) que puede ser transformado a carbono gaseoso por el proceso de biodegradación, g.

$\%MB_m$ = Porcentaje de material biodegradable en la composición del sustrato a prueba (muestra agroplástica y aserrín), %.

$\%C_m$ = Porcentaje de carbono en el sustrato o material biodegradable a prueba, %.

M_m = Masa agregada de material a prueba (sustrato), g.

Es importante tener en cuenta que el material utilizado como control positivo fue aserrín, que no es completamente celulosa. El aserrín contiene un 50% de celulosa en su composición de acuerdo con la literatura y tomando en cuenta su fórmula química $(C_6H_{10}O_5)_n$ se sabe que la celulosa es 44.44% carbono. Partiendo de estas dos premisas y considerando la cantidad de muestra de aserrín agregada en cada reactor, se calcula la cantidad de carbono teórica contenida en el material de prueba "aserrín" (carbono inicial del control positivo). Para la muestra S4 (agroplástico biodegradable del proveedor 2), se conoce que su composición es 95% ácido



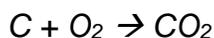
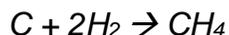
poliláctico. De ella se sabe que su fórmula química es $(C_3H_4O_2)_n$, entonces se determinó que es 50% carbono. De la misma manera, considerando la cantidad de éste material agregada a los reactores se calculó el carbono inicial aportado por el sustrato de prueba biodegradable S4.

En los casos de las muestras S2 y S3, no fue posible determinar el porcentaje de material biodegradable de prueba en su composición (LDPE para S2 y ácido poliláctico para S3). Los proveedores de estos materiales tienen políticas de privacidad al respecto de los componentes que agregan a sus productos al igual que las proporciones que utilizan por lo que el cálculo para estos dos materiales no se consideró.

3.14.3. Identificación del material de prueba biodegradable de manera anaerobia y estimación del %BD de dicho material

Para considerar a los materiales de prueba como biodegradables de manera anaerobia debe existir una producción de biogás (mezcla de CH_4 , CO_2 y otros gases en menor proporción) a partir del proceso experimental al que fueron expuestos. Para los materiales de prueba (sustratos) que no tuvieron una producción cuantificable de ambos gases por medio del equipo de cromatografía, no se les consideró para el cálculo del %BD pues el proceso anaerobio no es adecuado para el material.

Basado en las siguientes transformaciones bioquímicas, se sabe que cada mol (12 g) de carbono orgánico de la muestra a prueba se puede convertir en 1 mol de CH_4 gaseoso o CO_2 , o ambos:



La producción en mol de cada componente del biogás, inyectada y cuantificada en el equipo, fue convertida mediante estequiometría en gramos de carbono para así determinar la materia transformada de carbono orgánico en el material de prueba a carbono en estado gaseoso. La suma de CH_4 y CO_2 gaseoso producido en gramos corresponde al carbono total producido.

Posteriormente, se calcula la cantidad de carbono gaseoso, determinando la producción promedio de carbono gaseoso (tres repeticiones) por biodegradación anaerobia de las muestras a prueba sustrayendo la producción promedio de



carbón gaseoso del control negativo (tres repeticiones) que contiene el agroplástico no biodegradable o convencional.

El porcentaje de biodegradación para cada tipo de agroplástico se obtiene dividiendo la producción promedio de carbón gaseoso del material de prueba por el promedio de la cantidad de carbón teórico total o inicial del compuesto de prueba (mezcla FORSU+inóculo+sustrato agroplástico) y multiplicándolo por 100.

$$\% \text{BD} = \frac{\text{media } C_g (\text{material de prueba}) - \text{media } C_g (\text{blanco})}{C_i} \times 100$$

Donde:

C_g = cantidad de carbón gaseoso producida o transformada en CH_4 y CO_2 (g),

C_i = carbón teórico calculado o cantidad de carbón inicial en los componentes de prueba agregados (FO+inóculo+material agroplástico de prueba, g).

3.14.4. Balance de masa de carbón

El balance de masa (*figura 3.23.*) se determinó cuantificando la cantidad de carbón inicial (C_i) y final (C_f) en los reactores. Para calcular el C_i fue necesario realizar un análisis de COT de la muestra de FO y lodo anaerobio para determinar el contenido de carbón en las muestras y considerar los gramos de material de prueba introducidos al reactor como sustrato (celulosa, agroplástico convencional y biodegradable). El C_f se calculó restando la cantidad de carbón que perdieron los reactores mediante la producción de CO_2 y CH_4 al C_i .

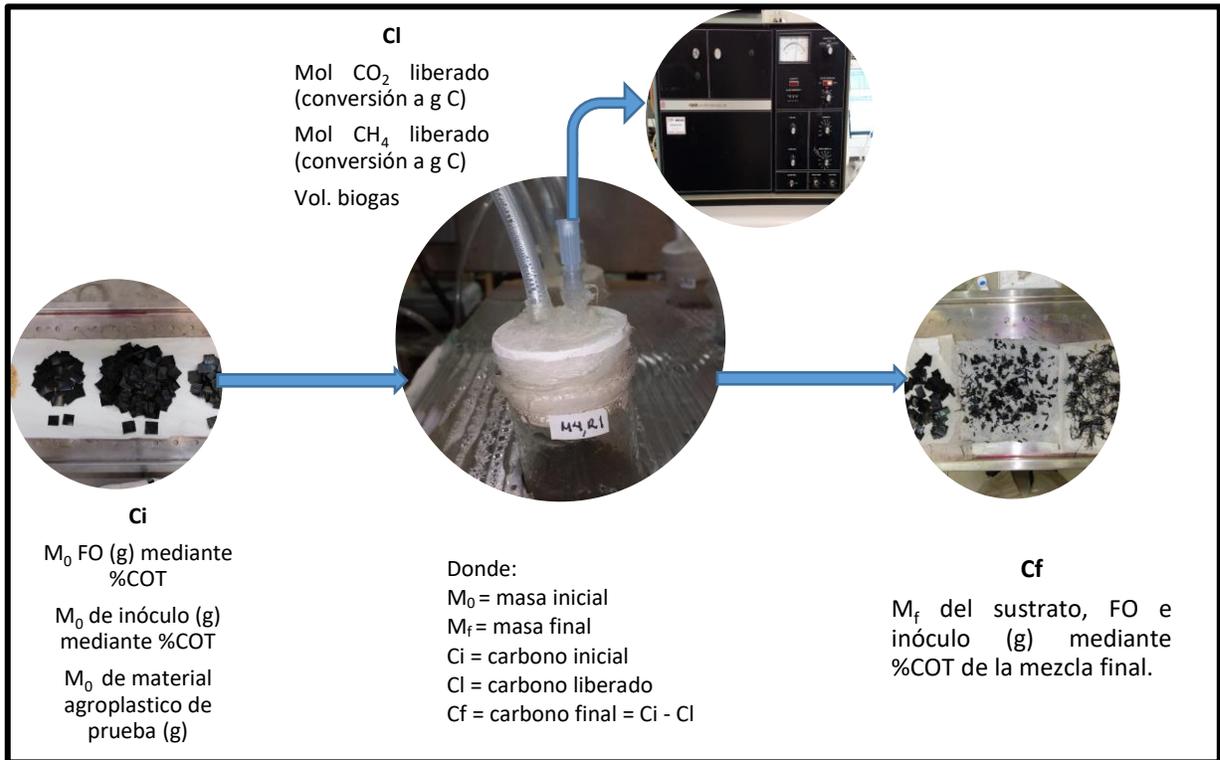


Figura 3. 23. Balance de masa del carbono en el proceso de biodegradación.



CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y SU ANÁLISIS

Los resultados y su análisis se presentan a continuación en el orden en el que se presenta el trabajo experimental dentro de la metodología.

4.1. Determinación del peso molecular de las muestras agrícolas biodegradables

La muestra enviada al Centro de Investigaciones en Química Aplicada (CIQA-Salttillo, Coahuila) fue del agroplástico biodegradable del proveedor 2 (S4) para la determinación de su peso molecular con el fin de confirmar una disminución en el tamaño de la cadena polimérica por medio de éste parámetro. Esta consideración se hizo tomando en cuenta que, de las muestras agroplásticas, únicamente la muestra S4 tuvo un comportamiento afín al proceso de biodegradación anaerobio (producción de CH₄ y CO₂).

Como resultado se encontraron pesos moleculares altos antes y bajos después del proceso de biodegradación como se muestra en la *tabla 4.1*.

Tabla 4. 1. Resultados obtenidos de la determinación del peso molecular de la muestra S4 realizada por el CIQA

Muestra	Mw	Mn	I.P.
Muestra agroplástica biodegradable 2 (S4); Clave: AGP-AI (antes del proceso de biodegradación)	150 262	36 346	4.13
	147 694	36 907	4
	148 978 ± 1.2%	36 626 ± 1.1%	4.06 ± 2.0
Muestra agroplástica biodegradable 2 (S4); Clave: AGP-AII (después del proceso de biodegradación)	7 466	3 657	2.04
	6 943	3 206	2.16
	7 204 ± 5.1%	3 431 ± 9.3%	2.10 ± 4.2

Fuente: (CIQA, 2019)

Donde:

Mw = Peso molecular en masa.

Mn = Peso molecular en número.

I.P. = Mw/Mn = Índice de Polidispersidad



Para ambas muestras se presenta el promedio (marcado con negritas) de las dos pruebas realizadas con base en la curva de calibración universal a estándares de poliestireno (PS) por el método de Cromatografía de Permeación en Gel (GPC). Los resultados obtenidos de peso molecular corresponden únicamente a la parte soluble de las muestras agrolásticas enviadas al CIQA.

Debido a que los polímeros de alta densidad no tienen un peso molecular único, como lo es el ácido poliláctico (contenido en el agrolástico S4), se utiliza el promedio de una distribución de diferentes pesos determinados. Como se muestra en la *tabla 4.1.*, éste promedio tiene un porcentaje de error asociado, al ser bajo indica que no existe una variabilidad alta entre los pesos moleculares obtenidos garantizando que el promedio de peso molecular es confiable. En consecuencia, se encontró que hay una disminución del peso molecular después del proceso de biodegradación para el sustrato biodegradable S4, tanto en el dato en peso como en número. A partir de lo anterior, se puede interpretar que, comparando con los resultados de %BD, la disminución del peso molecular luego de la prueba de biodegradabilidad es un indicador indirecto de la biodegradación del material.

Por otra parte, de acuerdo con la literatura (CIQA, 2019), el índice de polidispersidad (I.P.) es una medida que indica el grado de dispersión de un polímero, es decir, el grado de variación entre los pesos moleculares que representan a todo un polímero. Los índices de polidispersidad obtenidos son mayores a 1, lo que explica que existe gran dispersión en la distribución de los pesos moleculares en el polímero, es decir, hay partes de la muestra S4 que no representan el mismo peso molecular, lo que puede resultar ambiguo en cuanto a la disminución de éste parámetro. A pesar de esta situación, se puede decir que utilizando los valores promedio y considerando que solo una parte del polímero fue soluble, puede existir una pequeña disminución en el peso molecular ocasionada por el proceso anaerobio de biodegradación.

4.2. Caracterización de FORSU e inóculo anaerobio.

En la *tabla 4.2.* se reportan los resultados obtenidos respecto a la caracterización del inóculo anaerobio proveniente de la Cervecería Modelo S.A. de C.V. y de la fracción orgánica recolectada de la unidad Villa Olímpica en Tlalpan CDMX. De acuerdo a las pruebas solicitadas por la norma ASTM D5526-12, la fracción orgánica tiene un porcentaje de humedad de 74.7%, por lo que se puede considerar que está dentro del límite establecido de 30% de sólidos totales.



Tabla 4. 2. Resultados obtenidos de la caracterización del inóculo anaerobio y de la FORSU

Parámetro	FORSU (Unidad Hab. Villa Olímpica, CDMX)	Inóculo anaerobio (Cervecería Grupo Modelo S.A. de C.V.)
% Humedad	74.71	67.97
pH	5.06	8.44
STT (mg/L)	30091.25	6812.50
SVT (mg/L)	24485.50	3412.50
SFT (mg/L)	5605.75	3400.00
DQO (mg O ₂ /L)	285.50	308.42
N ₂ Total (%)	0.39	0.49
COT (%)	40.11	38.86
COT mezcla (%)		43.2

Fuente: Elaboración propia

Algunos autores consideran que en la producción de biogás a partir de FORSU, existe una relación entre la proporción de metano en el biogás y los sólidos volátiles de la FORSU, otros la relacionan con la DQO. Dichas investigaciones reportan valores de DQO con relaciones de SVT/STT como las que se presentan en la *tabla 4.3.*, comparando también los valores de la presente investigación:

Tabla 4. 3. Valores de DQO y SVT/STT comparando la presente investigación

REFERENCIA	DQO	SVT/STT
(Forster, 2005)	140 (g O ₂ /Kg)	0.43
(Alibardi y Cossu, 2015)	575 (g O ₂ /Kg)	0.92
(Treviño, 2016)	440 (mg O ₂ /L)	0.68
Presente investigación	285.5 (mg O ₂ /L)	0.81

Fuente: Elaboración mediante comparación de diversas fuentes

Para la presente investigación se tiene que aproximadamente el 81% de los STT corresponden a materia orgánica. De acuerdo con (Gerardi, 2003) y (Deublein y Steinhauser, 2011), el proceso anaerobio no demanda gran cantidad de nutrientes en comparación con el proceso aerobio, por lo que si existe o no una alta concentración de fósforo en la FORSU no representaría efectos negativos durante el proceso de digestión anaerobia al que fue sometido.



El porcentaje de nitrógeno total representa el 1.36% de la DQO respecto a la FORSU, mientras que en la investigación de Treviño (2016), se obtuvo un valor de 1.2%. La relación DQO/N del presente trabajo fue de 73 (285.5/3.9), mientras que Treviño (2016) tiene un valor de 84 (440/5.2). De acuerdo con Deublein y Steinhauser (2011) y (Schön, 2010), valores de DQO/N entre 800/5, 420/7 y 1500/7 son suficientes para obtener una adecuada producción de biogás. Considerando la relación de DQO/N de 285.5/3.9, se puede considerar que el valor fue bueno para una producción adecuada de biogás.

Para los resultados obtenidos de Carbono Orgánico Total (COT), se encontraron valores de 40.11 y 38.5 para la FORSU e inóculo respectivamente, antes del proceso de biodegradación. Después del proceso anaerobio de biodegradación, se calculó un valor promedio de 43.2, que corresponde a la mezcla de FORSU e inóculo. Considerando que este último dato corresponde a la mezcla, se puede decir que para las muestras analizadas inicialmente hubo una disminución del % COT que representa un consumo de carbono orgánico total efectuado mediante el proceso de biodegradación, sin embargo no se realizó un análisis que indique la disminución exacta de este parámetro en cada componente de la mezcla luego del proceso.

4.2. Pruebas presuntivas

Las pruebas presuntivas ayudaron a familiarizarse con la construcción del sistema, identificar sus deficiencias y mejorarlas, así como saber el comportamiento del mismo y tener contemplado el tiempo en el que inicia el proceso de biodegradación para hacerlo adecuadamente en las pruebas definitivas. Para las mediciones se tomó lectura semanalmente de la diferencia de volumen de la probeta durante 10 semanas.

Para los dos reactores con los plásticos agrícolas convencionales (R1: PACONV y R2: PACONV) se fijó un volumen inicial de 170 y 150 mL respectivamente, mientras que para los reactores con agroplásticos biodegradables (R3: PABIO y R4: PABIO) se fijó un volumen inicial de probeta de 170 y 150 mL respectivamente. En la *figura 4.1* y *figura 4.2* se muestra la evidencia de los volúmenes iniciales de los reactores antes de arrancar el sistema:



Figura 4. 1. Volumen inicial de reactores R1:PACONV y R2:PACONV

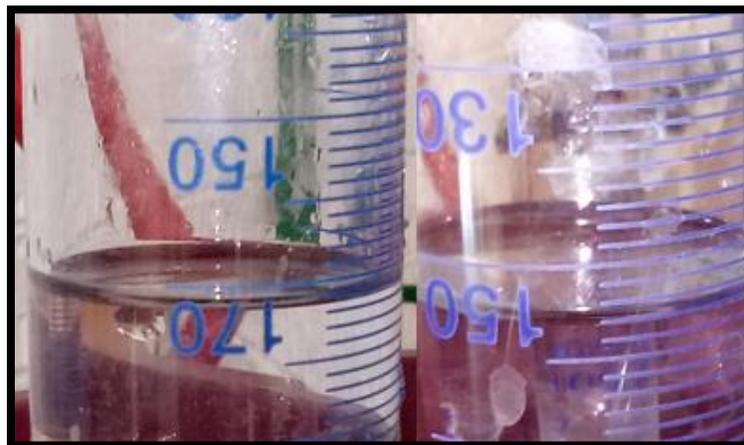


Figura 4. 2. Volumen inicial de reactores R3:PABIO y R3:PABIO

A la tercera semana de experimentación se empezaron a notar cambios en el volumen de los reactores. Los reactores con plásticos convencionales permanecieron estáticos en el volumen más tiempo, sin embargo, también produjeron biogás aunque tardaron más que los reactores con agroplásticos biodegradables. El proceso de los reactores se paró a la décima semana, sin embargo se tomaron mediciones a la séptima semana de experimentación pues se consideraron para presentar resultados. Posteriormente se identificó cada reactor con su volumen inicial y final para registrar el volumen de cada reactor a la semana 7, como se muestra en las figuras 4.3 y 4.4:

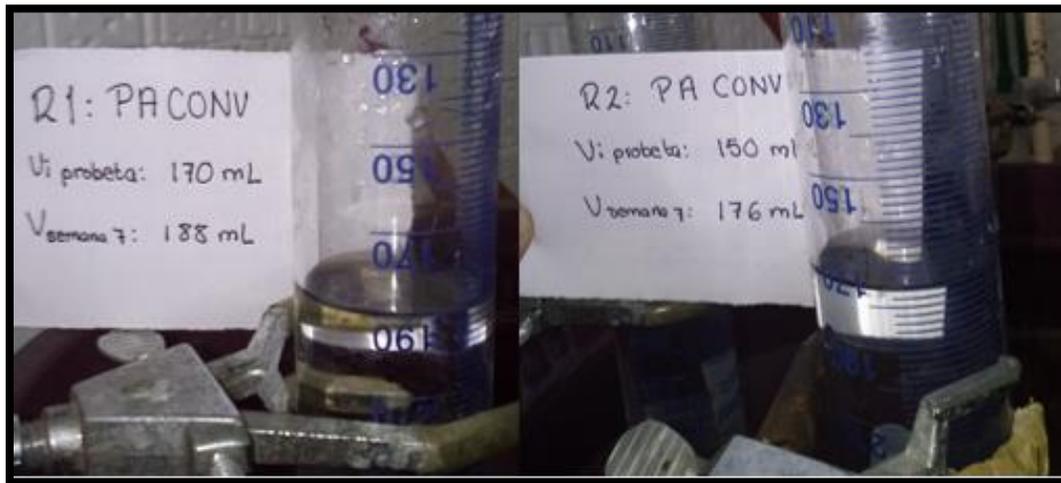


Figura 4. 3. Volumen a la 7° semana de experimentación de reactores con agroplástico convencional

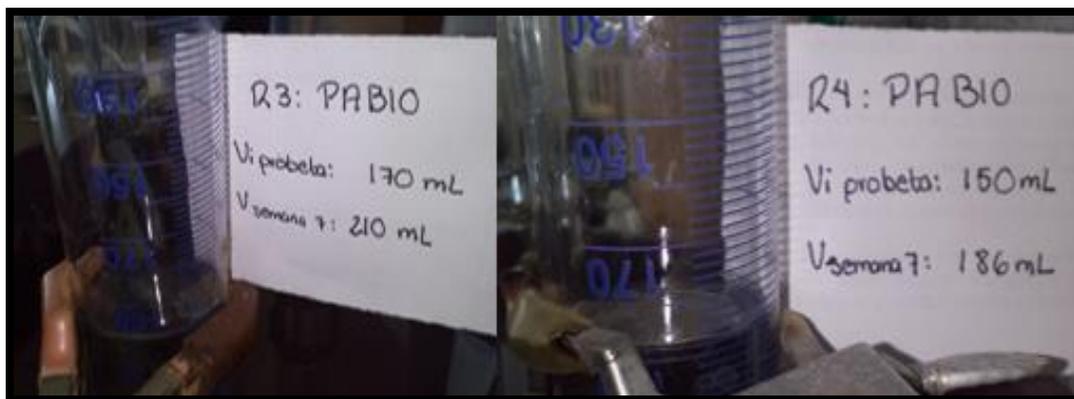


Figura 4. 4. Volumen a la 7° semana de experimentación de reactores con bolsas de plástico biodegradable

A continuación se muestran los resultados de las pruebas presuntivas de la producción de biogás en el sistema de dos reactores con agroplástico convencional y dos reactores con bolsas plásticas biodegradables (simulación del agroplástico biodegradable). En la *tabla 4.4.* se presentan los volúmenes de biogás producido semanalmente hasta la décima semana de experimentación para cada reactor, mientras que en la *tabla 4.5.* se reportan los datos acumulados de volumen por reactor:



Tabla 4. 4. Volumen de biogás producido semanalmente para cada reactor hasta la semana 10 de experimentación

SEMANA	V. DE BIOGÁS PRODUCIDO SEMANALMENTE (mL)			
	R1:PA CONV	R2:PA CONV	R3:PABIO	R4:PABIO
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	2	0	6	4
4	2	3	4	5
5	4	6	8	4
6	5	8	12	12
7	5	9	10	11
8	82	154	188	183
9	85	145	158	240
10	89	135	137	145
TOTAL	274	460	523	604

Tabla 4. 5. Volumen acumulado de biogás producido para cada reactor hasta la semana 10 de experimentación

SEMANA	VOL. ACUMULADO DE BIOGÁS PRODUCIDO (mL)			
	R1:PA CONV	R2:PA CONV	R3:PABIO	R4:PABIO
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	2	0	6	4
4	4	3	10	9
5	8	9	18	13
6	13	17	30	25
7	18	26	40	36
8	100	180	228	219
9	185	325	386	459
10	274	460	523	604

Para apreciar mejor el efecto de la producción de biogás durante el proceso de biodegradación sobre el plástico agrícola convencional y las bolsas plásticas biodegradables, se realizaron el *grafico 4.1.* y *gráfico 4.2.* que representan la experimentación hasta la semana 7 antes del aumento en la producción de biogás.

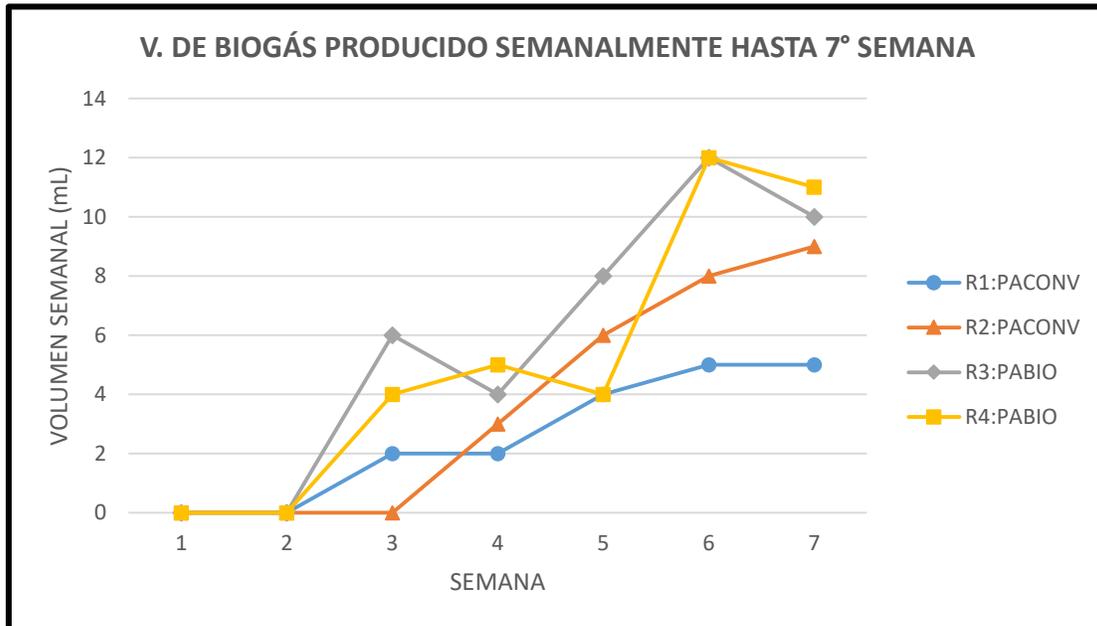


Gráfico 4. 1. Volumen de biogás producido semanalmente para cada reactor hasta la 7ª semana

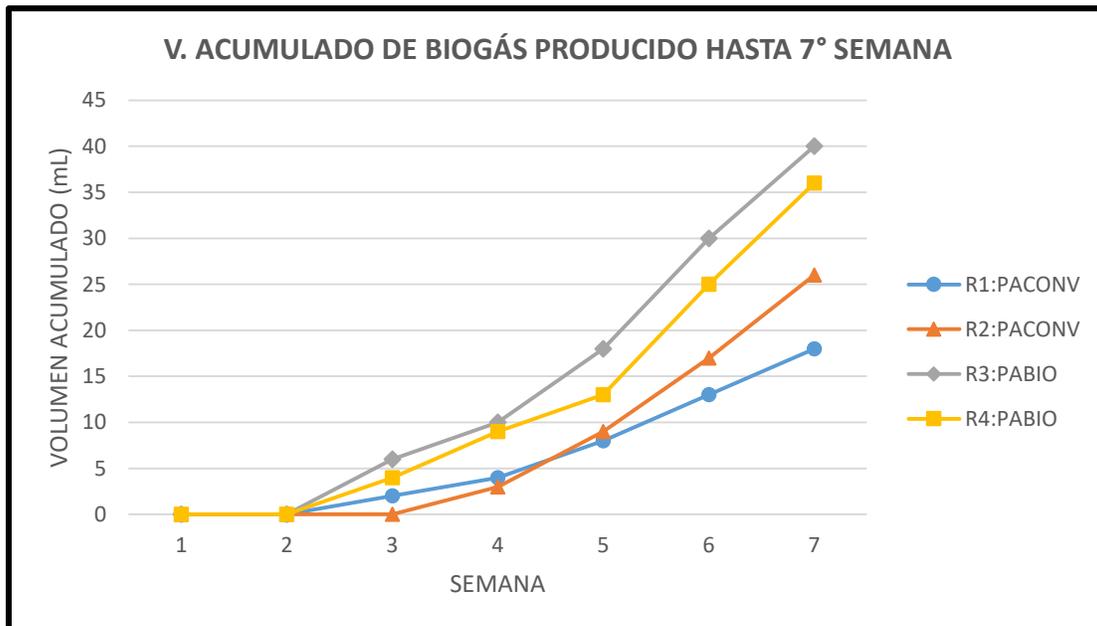


Gráfico 4. 2. Volumen acumulado de biogás producido para cada reactor hasta la 7ª semana

Para décima semana de experimentación se tienen el gráfico 4.3 y 4.4. donde se puede apreciar el comportamiento del sistema en la producción de biogás hasta la semana 10 de experimentación; aquí se detuvo el proceso para el reporte de resultados preliminares (Nota: la última semana no se reportó completa, se detuvo antes de concluirla):

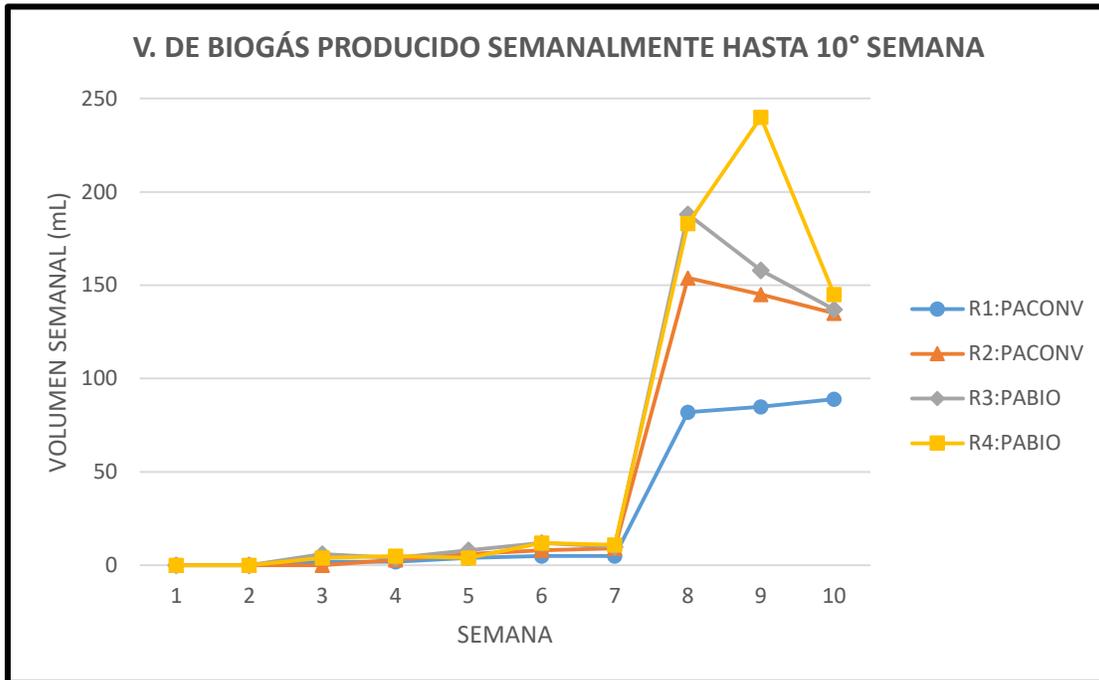


Gráfico 4. 3. Volumen de biogás producido semanalmente para cada reactor hasta la 10ª semana

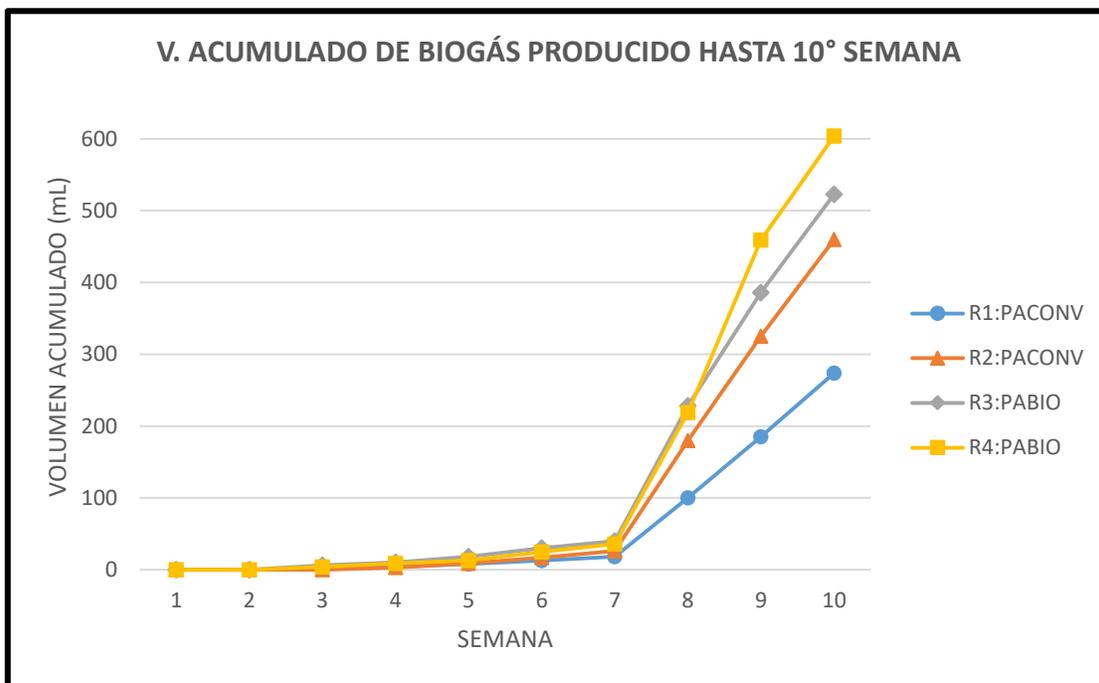


Gráfico 4. 4. Volumen acumulado de biogás producido para cada reactor hasta la 10ª semana



4.3. Diseño estadístico experimental

Los resultados de volumen de biogás producido durante la experimentación definitiva se desarrollan en éste subcapítulo para el diseño experimental planteado en la metodología.

De acuerdo con el modelo del diseño experimental construido, la variable de respuesta es el *volumen de biogás producido* por cada uno de los *tratamientos* aplicados al reactor (sustratos o muestras agroplásticas). Lo anterior, con el fin de determinar si el comportamiento en la producción de biogás a través del *tiempo* es mayor para los agroplásticos biodegradables que para los convencionales, comparándolos con un control positivo como sustrato. En la *tabla 4.6.* se reporta la producción de biogás acumulado semanalmente de las repeticiones de cada sustrato:

Tabla 4. 6. Volumen acumulado semanalmente de cada muestra agroplástica (sustrato)

Semana	S1			S2			S3			S4		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
1	641	517	558	464	410	462	597	606	534	640	521	523
2	1335	1109	1138	940	901	971	1303	1248	1114	1326	1055	1045
3	2171	1778	1823	1534	1479	1549	2146	1948	1789	2088	1675	1633
4	3104	2522	2566	2174	2095	2259	3070	2758	2563	2970	2381	2313
5	4281	3482	3547	3032	2941	3103	4285	3865	3555	4149	3358	3264
6	5414	4407	4482	3864	3724	3889	5385	4893	4474	5264	4287	4142
7	6722	5358	5489	4761	4588	4737	6565	5983	5556	6506	5320	5184
8	8136	6412	6608	5719	5530	5712	7847	7160	6757	7899	6430	6350
9	9632	7694	7795	6706	6602	6773	9235	8486	8109	9411	7690	7622
10	11672	9665	9609	8093	8246	8458	11166	10451	10048	11456	9632	9449

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en el *gráfico 4.5.* se muestra la producción promedio acumulada de biogás de cada sustrato agroplástico a través del tiempo (t_i) hasta la décima semana de experimentación:

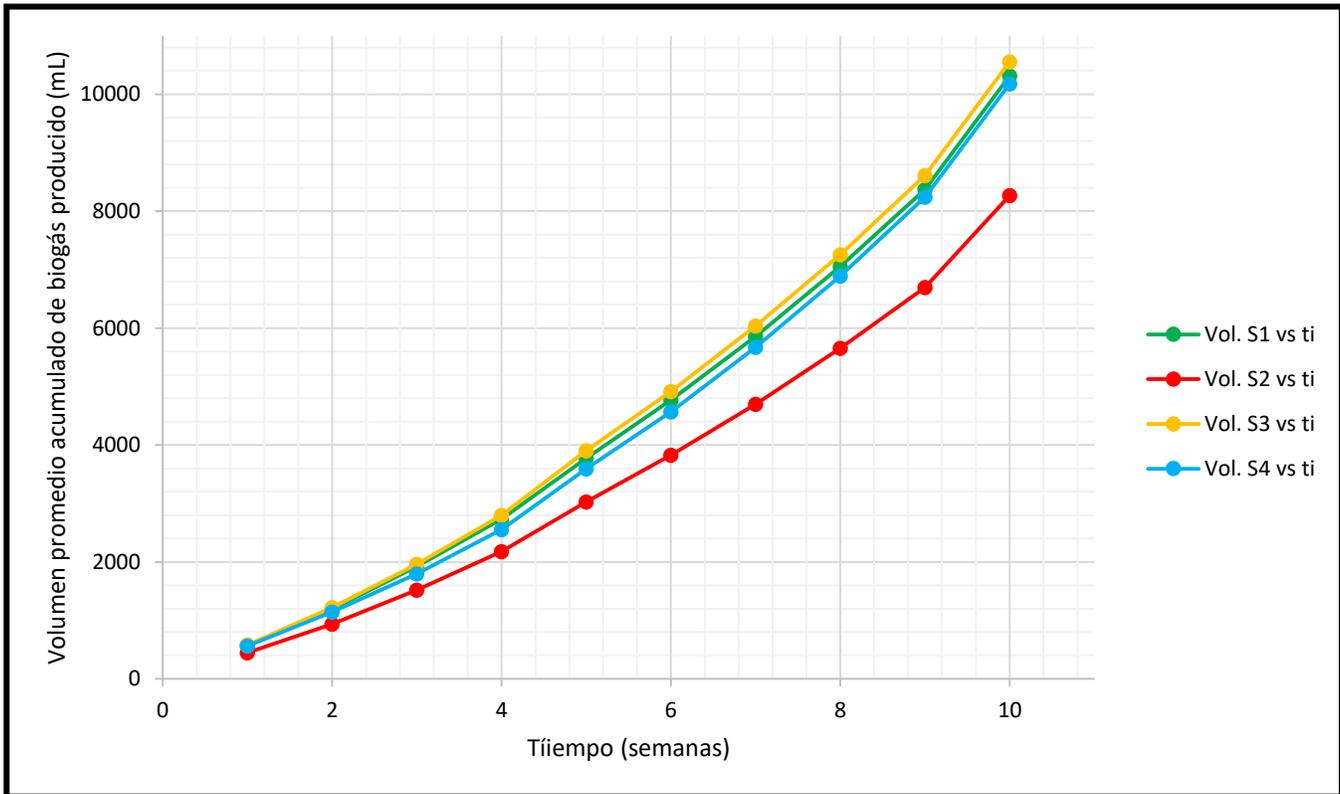


Gráfico 4. 5. Volumen promedio acumulado de biogás producido por cada sustrato (celulosa o agroplástico) a través del tiempo

Para el modelo experimental se utilizó el volumen producido semanalmente de cada reactor (variable de respuesta). La función del modelo es determinar si hay una relación entre la cantidad de biogás producido y el sustrato aplicado, además de la interacción entre el sustrato y el tiempo. En la *tabla 4.7.* se presenta la ANOVA correspondiente para el modelo por “Parcelas Divididas” y en el *gráfico 4.6.* se muestra el promedio semanal de cada muestra agroplástica, apreciando así el comportamiento en la producción de biogás en función del tiempo y del sustrato.

Tabla 4. 7. ANOVA del modelo estadístico experimental por “Parcelas Divididas” aplicado

	Componente	gl	SS	CM	F	p-value
Parcela grande	sustrato	3	999032	333011	4.4898	0.039712
	sustrato:reactor	8	593360	74170	30.7911	2.2E-16
Parcela pequeña	ti	9	16334440	1814938	753.4573	2.2E-16
	sustrato:tiempo	27	164384	6088	2.5275	0.000955
	residual	72	173435	2409		

Fuente: Elaboración propia

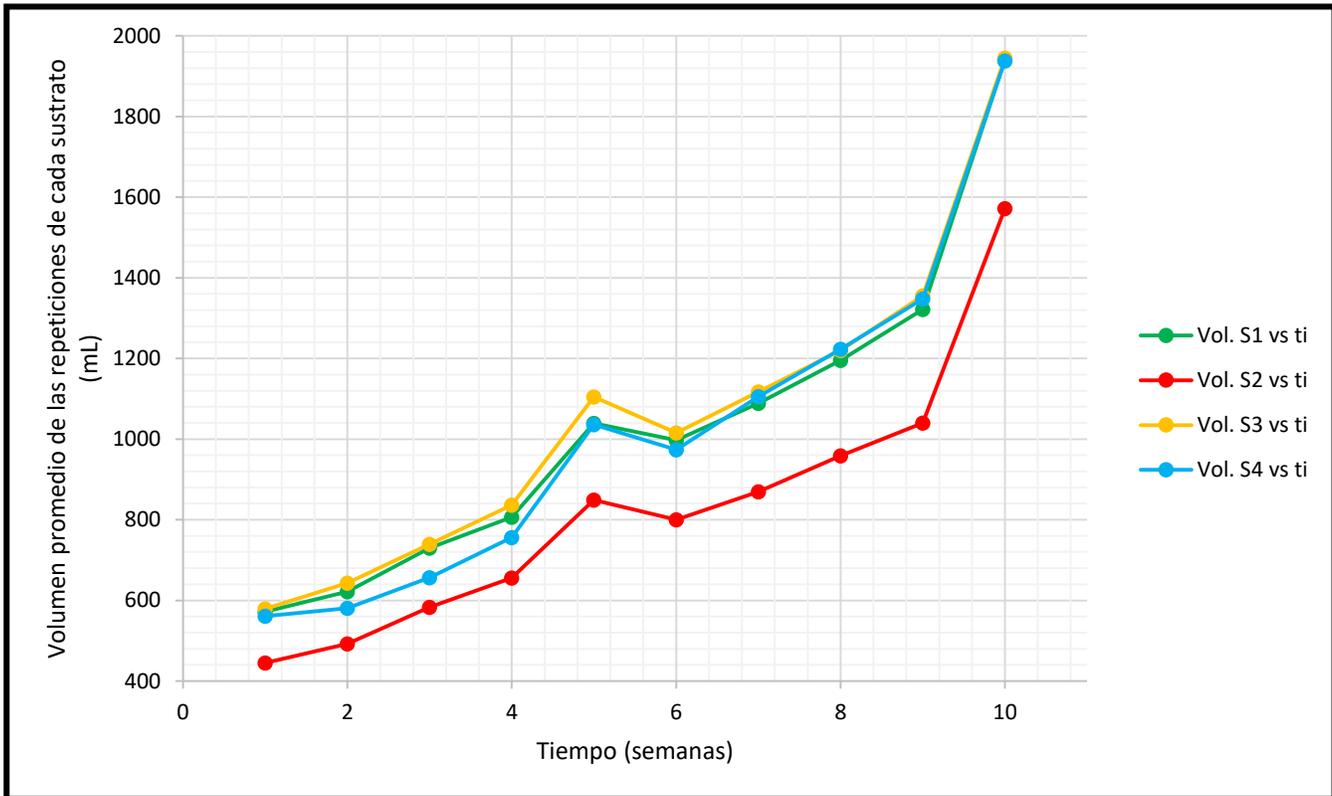


Gráfico 4. 6. Volumen promedio de las repeticiones de cada sustrato aplicado a través del tiempo

El análisis de resultados de la ANOVA general del modelo estadístico por parcelas divididas presentó un *p-value* de 0.000955 en el efecto que tiene el tiempo en la parcela pequeña, lo que indica que existe una diferencia significativa en la interacción entre sustrato:tiempo. Debido a esto se debe descartar el *p-value* de los factores independientes (sustrato, reactor y tiempo) y concentrar el análisis en la interacción y el efecto que tiene el sustrato aplicado como tratamiento a través del tiempo, además comparar con el sustrato “celulosa” (S1) mediante las interacciones de cada muestra en el tiempo.

En la *tabla 4.8.* se resume el análisis realizado en el paquete estadístico R mediante una prueba de Student-Newman-Kneuls (SNK), que permite realizar una comparación de la interacción del factor sustrato (en sus 4 niveles de tratamiento) con el factor anidado tiempo en sus diferentes niveles del modelo, que en ésta investigación fueron las 10 semanas de experimentación.



Tabla 4. 8. Análisis estadístico mediante prueba de SNK para la interacción sustrato: tiempo del modelo por parcelas divididas

SEMANA	ORDEN POR PRODUCCIÓN BIOGÁS	D. S. ***	D. S. **, *	D. N-S
1	S2≤S4≤S1≤S3	S3-S2, S1-S2, S4-S2	-	S3-S4, S1-S4, S1-S3
2	S2≤S4≤S1≤S3	S3-S2, S1-S2, S4-S2	S3-S4*	S4-S1, S3-S1
3	S2≤S4≤S1≤S3	S3-S2, S1-S2, S4-S2	S3-S4**, S1-S4**	S3-S1
4	S2≤S4≤S1≤S3	S3-S2, S1-S2, S4-S2	S3-S4**, S1-S4*	S3-S1
5	S2≤S4≤S1≤S3	S3-S2, S1-S2, S4-S2	S3-S4*, S3-S1*	S4-S1
6	S2≤S4≤S1≤S3	S3-S2, S1-S2, S4-S2	-	S3-S4, S1-S4, S1-S3
7	S2≤S1≤S4≤S3	S3-S2, S1-S2, S4-S2	-	S3-S4, S1-S4, S1-S3
8	S2≤S1≤S3≤S4	S3-S2, S1-S2, S4-S2	-	S3-S4, S1-S4, S1-S3
9	S2≤S1≤S4≤S3	S3-S2, S1-S2, S4-S2	-	S3-S4, S1-S4, S1-S3
10	S2≤S4≤S1≤S3	S3-S2, S1-S2, S4-S2	-	S3-S4, S1-S4, S1-S3

Fuente: Adaptación del análisis obtenido mediante prueba de SNK en R

Código del grado de significancia: (<0.001, ***); (<0.01, **); (<0.05, *); (>0.05, n-s).

La primera columna corresponde a la semana de experimentación analizada, considerando que el tratamiento de la parcela pequeña es el tiempo en diez niveles ($t_i = t_1, t_2, \dots, t_{10}$).

La segunda columna corresponde al orden de “producción de biogás” del menor al mayor, considerando que es la producción promedio de las repeticiones de cada sustrato. Aquí se puede apreciar que en todos los niveles, el sustrato agroplástico convencional (S2) siempre se mantiene como el menor productor de biogás, mientras que el resto de los sustratos (S1, S3 y S4) tienen un comportamiento interesante. De la primera a la sexta semana el orden permaneció igual con el sustrato S3 como el mayor productor, seguido del S1 y S4. Durante las siguientes dos semanas el S4 aumentó su producción, siendo el mayor en la octava semana para finalmente disminuir su promedio en las últimas dos y regresando el S3 como el mayor productor. De acuerdo con lo anterior, se podría decir que el mejor productor fue el S3, sin embargo en el modelo no se consideró la composición del biogás y para éste sustrato únicamente se logró cuantificar CO₂ por medio del cromatógrafo de gases, mientras que S1 y S4 fueron los mayores productores de CH₄.



En la siguiente columna se muestran las comparaciones (obtenidas mediante la prueba SNK) entre los sustratos y sus diferencias significativas, es decir, los sustratos que tienen diferencias importantes en cuanto a la producción promedio de biogás. El grado de significancia indica que no hay ninguna similitud entre la producción de biogás del S2 y la del resto de sustratos (S1, S3 y S4), que permanece igual en todos los niveles de tiempo.

La cuarta columna contiene las diferencias significativas en menor nivel, pues aquí se compara la producción de los sustratos agroplásticos biodegradables (S1, S3 y S4), es decir, los sustratos que no tienen parecido a S2. Las comparaciones aquí son mínimas pues solo ocurrieron de la segunda a la quinta semana, donde solo hay diferencias entre la producción del S3 y S4 que después cambia pues la producción de biogás de S4 aumenta eliminando las disimilitudes en las próximas semanas. En menor nivel se diferencian el S1 y S4, pues ocurre lo mismo que en el caso anterior al aumentar la producción en S4.

La última columna tiene un comportamiento interesante, pues ésta muestra las “diferencias no significativas” que son las comparaciones SNK que representan a los sustratos con mayores similitudes en cuanto a producción. Aquí se puede apreciar que, en la mayoría de los niveles de tiempo (semanas), no existen grandes diferencias en la producción promedio de los tres sustratos biodegradables (S1, S3 y S4).-Esta columna indica que considerando la producción de biogás, el sustrato S1, S3 y S4, son muy parecidos y su comportamiento no muestra diferencias significativas. Únicamente en la tercera, cuarta y quinta semana, el comportamiento es distinto, sin embargo, aún ahí los sustratos S4 y S3 se asemejan al S1.

De acuerdo con el análisis realizado mediante la prueba SNK, se puede decir que el comportamiento de los sustratos agroplásticos biodegradables (S1, S3 y S4) no muestra diferencias significativas considerando la producción y que el único que es diferente es el plástico agrícola convencional (S2), teniendo una producción promedio de biogás menor. Éste es el comportamiento esperado exclusivamente para la producción de biogás y no para su composición. De acuerdo con lo anterior, se contempló el análisis de un parámetro más como la composición de esta variable de respuesta para determinar si un agroplástico biodegradable es apto para biodegradación anaerobia (producción de CH₄ y CO₂ cuantificable).

4.4. Comparación visual y física del material de prueba inicial y después del proceso de biodegradación

De acuerdo con las dimensiones y forma en la que se cortó el material de prueba para cada reactor (cuadrados de aproximadamente 1.5x1.5 cm), se realizó la comparación del agrolástico antes y después del proceso de biodegradación. En la *figura 4.5.* se puede apreciar la comparación entre el material inicial y el removido de una de las repeticiones, exceptuando el sustrato “celulosa” (S1) correspondiente al control positivo pues para éste fue imposible su recuperación. En la *figura 4.6.* se muestran los tres sustratos agrolásticos con su respectiva repetición luego de su biodegradación, remoción, lavado y secado.



Figura 4. 5. Antes (foto superior) y después (foto inferior) del material de prueba luego del proceso de biodegradación: a) celulosa o aserrín (S1), b) agrolástico convencional (S2), c) agrolástico biodegradable proveedor 1 (S3) y d) agrolástico biodegradable proveedor 2 (S4)

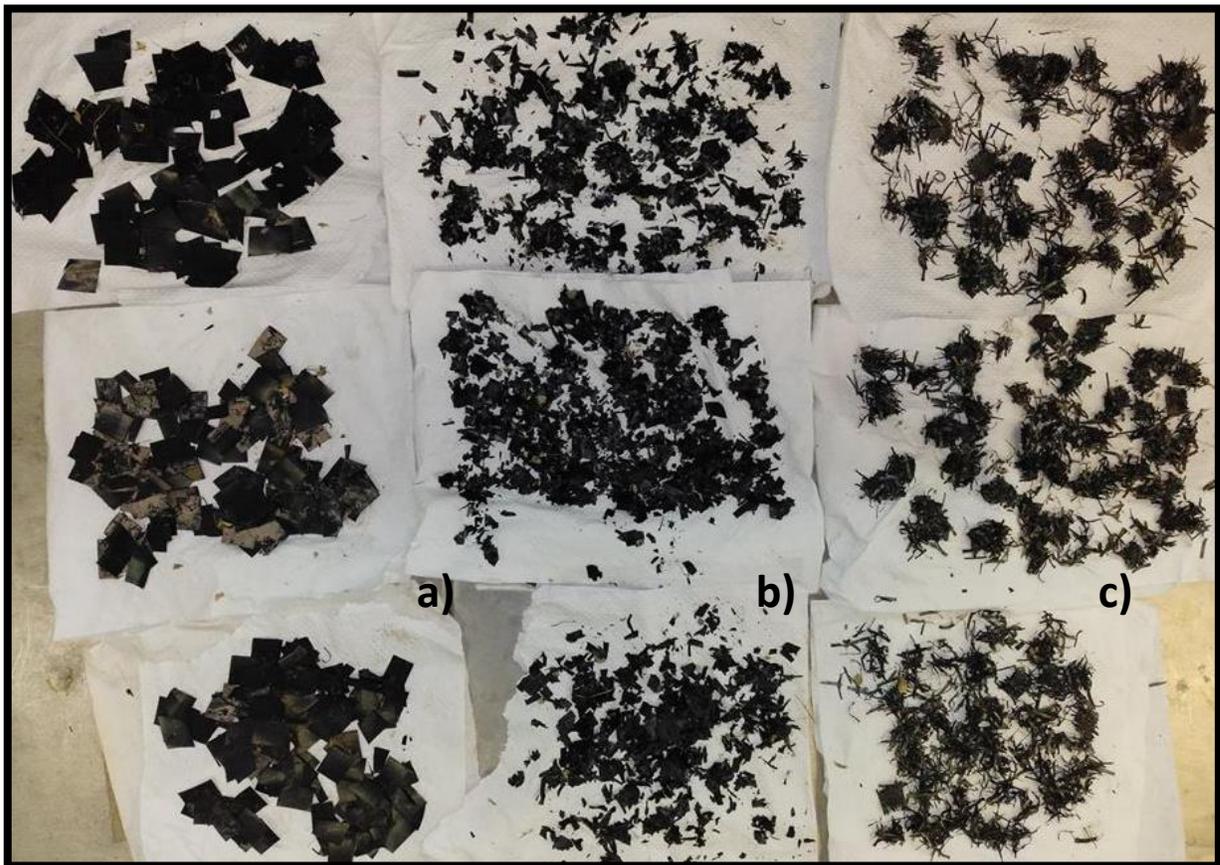


Figura 4. 6. Material de prueba (fila=rep. 1-3): columna a) agroplástico convencional, b) agroplástico biodegradable proveedor 1 y c) agroplástico biodegradable proveedor 2

La diferencia entre la apariencia de entrada y de salida del material es evidente para los casos de agroplásticos biodegradables de cada repetición (muestras de proveedor 1 y 2). En el caso del sustrato S3, se pueden ver los pedazos fragmentados del plástico inicialmente introducido en forma cuadrangular, los trozos son variables y algunos pocos permanecieron del mismo tamaño, sin embargo si hay diferencia apreciable. Para el sustrato S4, se distingue que la conformación inicial del plástico cambió y se desenredaron las tiras plásticas que formaban el acolchado plástico, además se trozaron y cambiaron de color negro a marrón oscuro y algunos a gris claro. En ambas muestras biodegradables la acción de tocarlas y machucarlas implicaba trozarlas más.

El sustrato número 2, correspondiente al agroplástico convencional, permaneció de la misma forma y tamaño después del proceso de biodegradación, su color sigue siendo igual y no hubo fragmentación alguna. El proceso quizá solo opaco un poco la muestra, sin embargo no hay diferencia apreciable.



4.5. Cálculo del %BD de las muestras agroplásticas puestas a prueba de acuerdo a la norma ASTM D5526-12, carbono teórico y balance de masa de C

La *tabla 4.9.* resume los resultados obtenidos referidos a la producción acumulada total de biogás en volumen y mol de componente (CH₄ y CO₂) de cada reactor hasta la décima semana, cuando se detuvo el sistema. La cuantificación de los componentes del gas se interrumpió dos días antes del paro total del sistema y se dejó de monitorear el volumen desplazado acumulado en las probetas. En el *gráfico 4.7* se muestra el volumen promedio total acumulado de biogás de cada reactor.

Tabla 4. 9. Producción total acumulada de biogás, metano y dióxido de carbono por reactor

Reactor	Vol. total Acumulado (mL)	TOTAL CH ₄ (mol)	TOTAL CO ₂ (mol)
S1:R1	11672	0.02097471	0.081886
S1:R2	9665	0.01987147	0.083244
S1:R3	9609	0.02154594	0.081725
S2:R1	8093	-	0.03685434
S2:R2	8246	-	0.03964406
S2:R3	8458	-	0.0378432
S3:R1	11166	-	0.090293
S3:R2	10451	-	0.092526
S3:R3	10048	-	0.100632
S4:R1	11456	0.018648	0.106519
S4:R2	9632	0.01771	0.123634
S4:R3	9449	0.019586	0.125013

Fuente: Elaboración propia

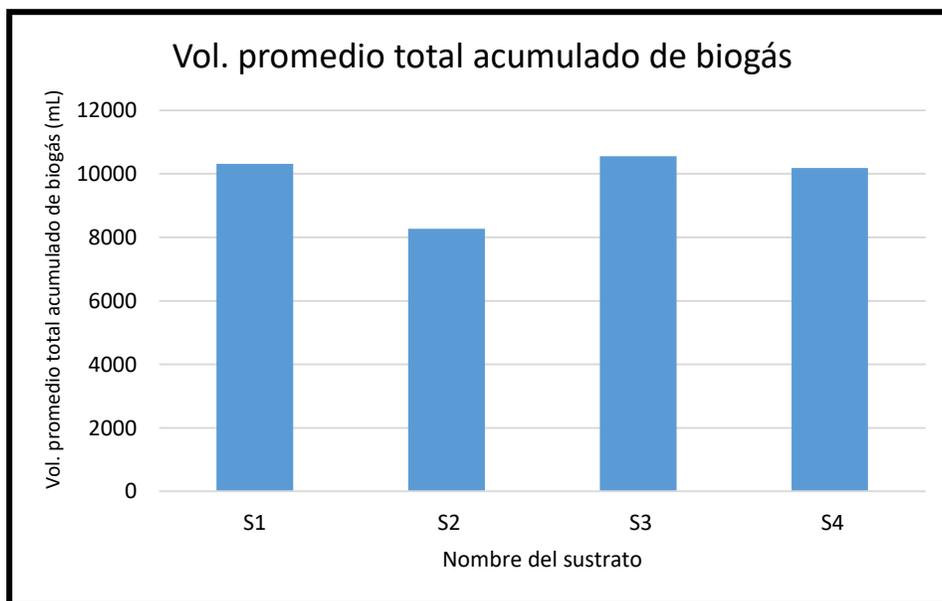


Gráfico 4. 7. Volumen total acumulado de biogás de cada reactor



Considerando el volumen total acumulado se puede decir que los reactores del control positivo (S1, con celulosa), junto con los reactores S3 y S4 (con sustrato agroplástico biodegradable) son los que mayor cantidad de biogás produjeron, dejando atrás a los reactores que contienen el sustrato no biodegradable (S2: agroplástico convencional). Como se observó mediante el modelo estadístico, el volumen total acumulado para los sustratos agroplásticos biodegradables presenta una similitud en cuanto a producción de biogás, sin contemplar la composición.

El *gráfico 4.8.* y *gráfico 4.9.* presentan la producción independiente de CH_4 y CO_2 de cada reactor, mientras que en el *gráfico 4.10* se comparan las magnitudes de producción del CH_4 y CO_2 , para dar una idea de las proporciones que juega cada componente dentro de la composición total del biogás. De acuerdo con la literatura, el metano puede llegar a ocupar el 60% de la composición del biogás en la etapa metanogénica, sin embargo en la experimentación presente no se observó el pico máximo de este fenómeno.

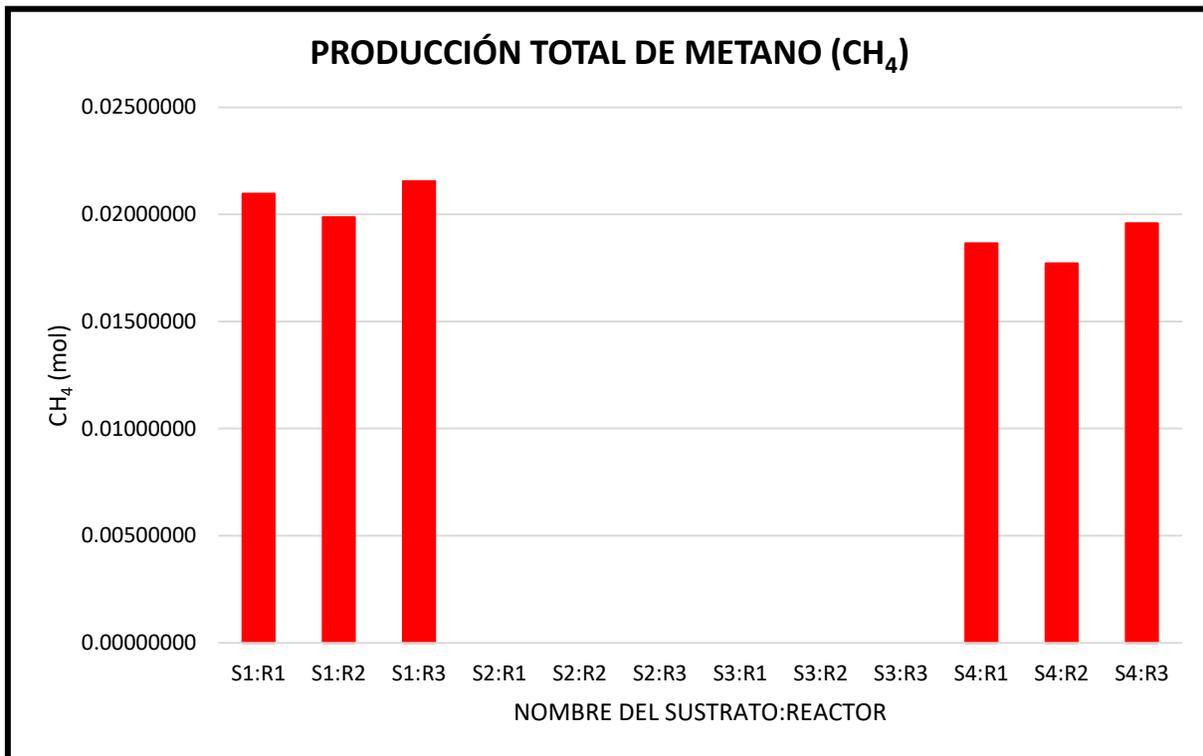


Gráfico 4. 8. Producción total de metano (CH_4) de cada reactor

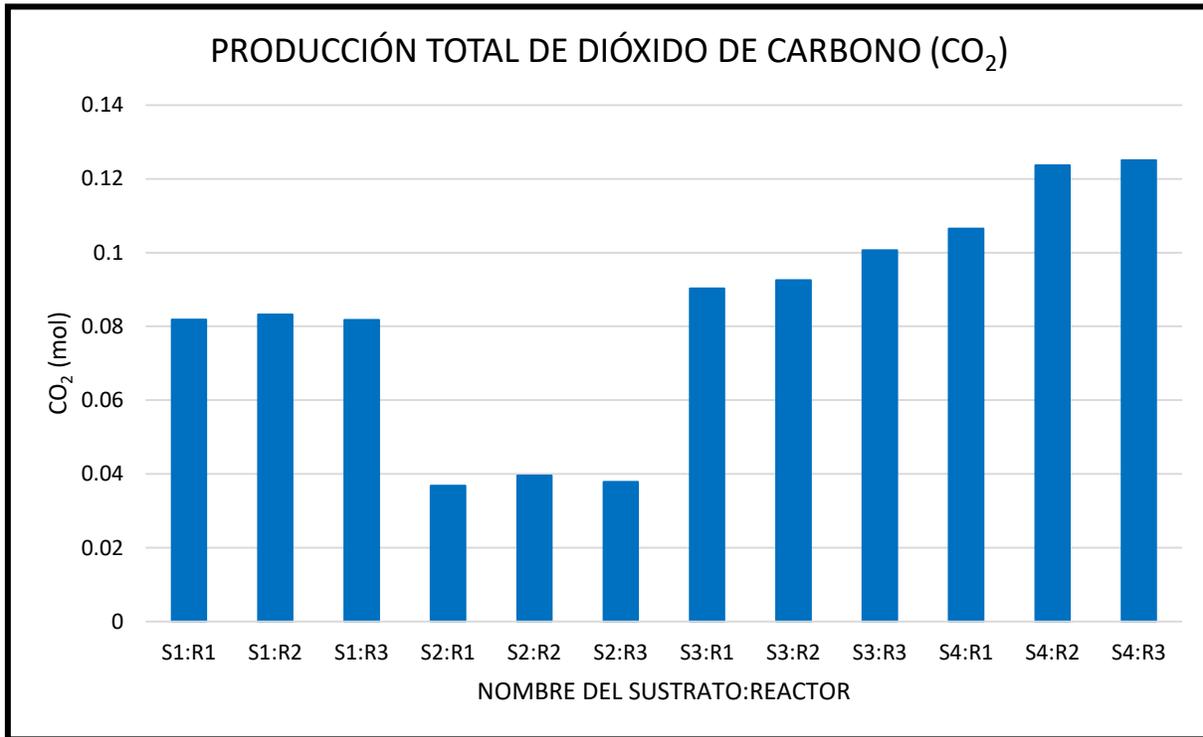


Gráfico 4. 9. Producción total de dióxido de carbono (CO₂) de cada reactor.

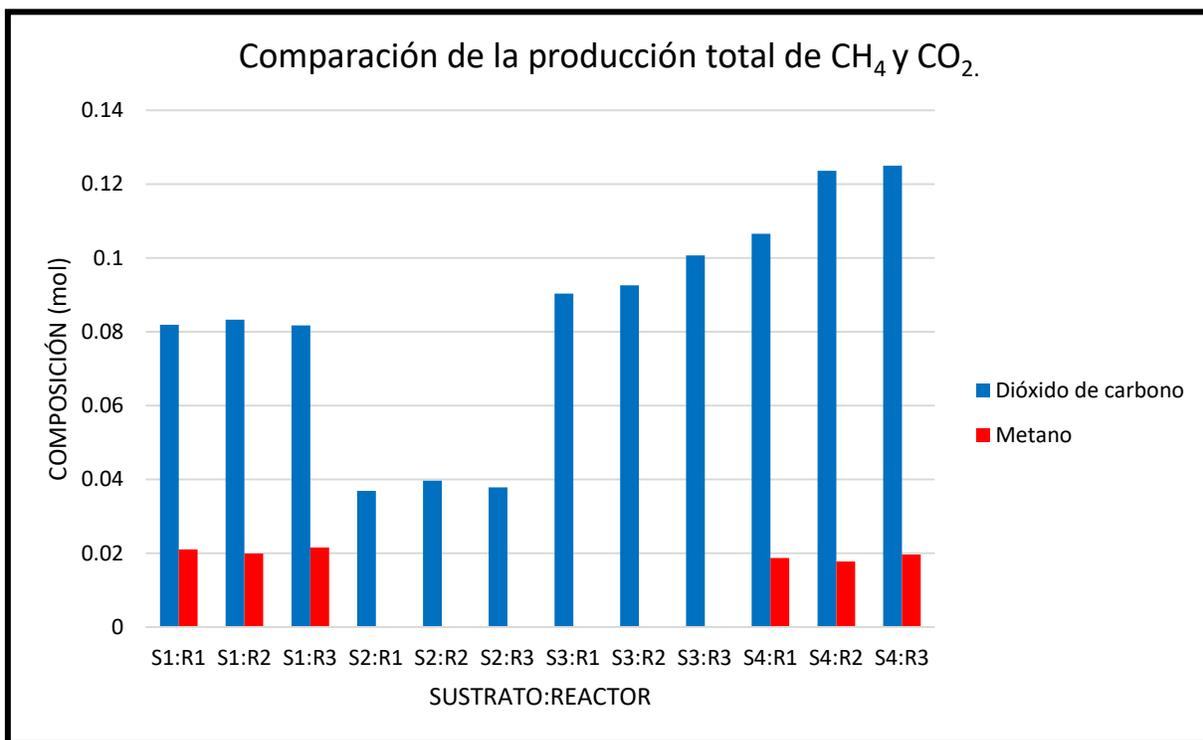


Gráfico 4. 10. Comparación de la producción total de CH₄ y CO₂



En el caso de los reactores S2 y S3, no fue posible la lectura de la cantidad de metano producida pues no estaba dentro del límite de detección del cromatógrafo. En algunos casos se observó que el pico era tan pequeño que no había lectura, sin embargo no se descarta la producción de metano para los reactores de ambos sustratos. El sustrato celulosa (S1: control positivo) y el sustrato biodegradable cuatro (S4: agroplástico proveedor 2) nos dan lecturas de metano en mayor proporción, el sustrato uno por encima del cuatro como se esperaba.

En el caso del sustrato S3 (del cual se desconoce su composición en porcentaje de ácido poliláctico), es posible que el agroplástico tenga una proporción pequeña de este material biodegradable y probablemente sus componentes sean en su mayoría compostables. Esa podría ser la causa de la incuantificable producción de metano en el biogás producido por los reactores con este sustrato. Además de ésta limitante, es importante mencionar que este material no podría considerarse biodegradable en su totalidad pues no hubo producción cuantificable de metano (CH_4). La muestra S3 podría considerarse compostable pues tuvo una alta producción de CO_2 y una degradación visible físicamente; tiene la capacidad de biodegradarse sin embargo para considerarla por vías anaerobias debió haber producido metano.

Como se desarrolló en la metodología, los reactores se prepararon con la mezcla indicada en la *tabla 4.10.*, que indica el balance de masa de las muestras dentro de los reactores. La tabla organiza (en masa), las cantidades agregadas de FORSU, inóculo y plástico agrícola al inicio de la experimentación, distribuidas en los diferentes reactores. Además se presenta la masa total en la mezcla final contenida en cada reactor



CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y SU ANÁLISIS

Tabla 4. 10. Balance de masa (g) de los reactores sometidos al proceso anaerobio de biodegradación

REACTOR	FORSU (g)	Inóculo (g)	S1 (g)	S2 (g)	S3 (g)	S4 (g)	Mezcla (g)
S1, R1	100.2	106.01	6.01				212.22
S1,R2	100.01	106.01	6.01				212.03
S1, R3	100.01	106.01	6				212.02
S2, R1	100.02	106.01		6.01			212.04
S2, R2	100.01	106.01		6.03			212.05
S2, R3	100.1	106.01		6.05			212.16
S3, R1	100.1	106.01			6.04		212.15
S3, R2	100.03	106.01			6.07		212.11
S3, R3	100.07	106.01			6.03		212.11
S4, R1	100.06	106.01				6.04	212.11
S4, R2	100.02	106.01				6.07	212.1
S4, R3	100.04	106.01				6.02	212.07

Fuente: Elaboración propia mediante metodología experimental

La *tabla 4.11.* muestra los resultados calculados de carbono teórico total de cada componente en la mezcla, considerando la masa agregada de sustrato agroplástico, el porcentaje de material biodegradable en la muestra y el % de carbono en el material biodegradable. Para las muestras de FORSU e inóculo también se utilizó el % COT y la masa agregada de muestra para determinar el carbono teórico total.

Tabla 4. 11. Balance de carbono durante proceso anaerobio de biodegradación y cálculo del %BD

REACTOR	C _t FORSU (g)	C _t inóculo (g)	C _t sustrato agroplástico (g)	C _i o C _t total (g)	C _g producido o liberado (g)	C _f o C en reactor (g)	% BD
S1, R1	40.19022	41.184885	1.335422	82.710527	1.23432846	81.4761985	1.49234748
S1,R2	40.114011	41.184885	1.335422	82.634318	1.2373856	81.3969324	1.49742338
S1, R3	40.114011	41.184885	1.3332	82.632096	1.23925133	81.3928447	1.49972152
S2, R1	40.118022	41.184885		81.302907	0.44225213		
S2, R2	40.114011	41.184885		81.298896	0.47572875		
S2, R3	40.15011	41.184885		81.334995	0.45411844		
S3, R1	40.15011	41.184885		81.334995	1.083516		
S3, R2	40.122033	41.184885		81.306918	1.110312		
S3, R3	40.138077	41.184885		81.322962	1.207584		
S4, R1	40.134066	41.184885	2.869	84.187951	1.502004	82.685947	1.78410804
S4, R2	40.118022	41.184885	2.88325	84.186157	1.696128	82.490029	2.01473504
S4, R3	40.126044	41.184885	2.8595	84.170429	1.735188	82.435241	2.06151735

Fuente: Elaboración propia mediante resultados del análisis



El balance considera el carbono inicial en cada reactor (C_i) o carbono teórico en la mezcla, el carbono total producido o transformado a CH_4 y CO_2 (C_g) y el carbono final (C_f), que corresponde al carbono restante dentro del reactor luego del proceso.

Todos los reactores contenían en promedio 212 g de mezcla total, sin embargo, para los reactores con S2 y S3 no se determinó el carbono teórico de la muestra agroplástica, pues son productos comerciales y la información del porcentaje de material biodegradable en la formulación del producto es confidencial. Para los reactores con S1, el 38.98% de la mezcla total corresponde a materia orgánica biodegradable disponible y para los que contuvieron a S4, el 39.71% corresponde a materia orgánica biodisponible.

Lo anterior se debe a que el material utilizado como control positivo fue aserrín (S1), el cual contiene un 50% de celulosa que a su vez, contiene 44.44% de carbono orgánico biodegradable. En cambio, el agroplástico utilizado como S4, contiene un 95% de ácido poliláctico que a su vez, contiene 50% de carbono orgánico disponible. Esto permite que el material agroplástico S4 contenga mayor cantidad de carbono orgánico disponible para la biodegradación. Esto también puede explicar el porqué de una mayor producción de CO_2 en este sustrato que en el control positivo, aunque el S1 tuvo mayor cantidad de CH_4 , la mayor proporción de carbono orgánico disponible permite mejor su transformación en los componentes del biogás, además de la conformación de las cadenas del polímero.

Para la presente investigación se obtuvo un %BD promedio de 1.4964 para el control positivo (celulosa) y de 1.9534 para el agroplástico biodegradable del proveedor 2 (ácido poliláctico) en reactores anaerobios simulando condiciones aceleradas de relleno sanitario. Diversos autores obtuvieron diferentes %BD para distintos materiales plásticos biodegradables en procesos anaerobios simulando condiciones de relleno sanitario (*tabla 4.12.*):



Tabla 4. 12. Valores de %BD para diversos trabajos con materiales plásticos biodegradables en reactores anaerobios simulando condiciones de relleno sanitario

Autores	Materiales plásticos	% BD
Thomas et al. (2012)	Películas plásticas oxo-biodegradables	2.73%
Frederick y Gómez (2013)	Oxo- biodegradable con aditivo prodegradante y un bioplástico	2% y 25%
(Treviño, 2016)	Plástico oxo-biodegradable con aditivo St-Mn (para bolsas)	1.30%
Roe-Sosa et al. (2015)	Películas plásticas de PEBD oxo-biodegradables con aditivo St-Mn	74%
Presente investigación	Plástico agrícola biodegradable a base de ácido poliláctico (aplicación para acolchado)	1.95%

Fuente: Elaboración mediante diversos autores

Los porcentajes de biodegradación obtenidos en dichas fuentes están aproximados al dato obtenido en la presente investigación, considerando que la experimentación duró 65 días. En el trabajo de investigación de Treviño (2016), el proceso anaerobio tuvo una duración de 106 días, obteniendo un %BD de 1.30% para uno de los plásticos biodegradables puestos a prueba. El resultado de la presente investigación se debe al tipo de material biodegradable utilizado (ácido poliláctico), pues las cadenas poliméricas en este compuesto presentan una configuración y conformación que permite que sea más sencillo romper las fuerzas de enlace entre los carbonos del polímero, mientras que las cadenas poliméricas del polietileno son largas y más estables químicamente.

Roe-Sosa (2015) obtuvo un %BD de 74% para condiciones específicas: una exposición térmica de 50°C durante 288 horas (degradación abiótica de 91.4%) y un tiempo promedio de 90 días en proceso de compostaje. A partir de lo anterior, se puede considerar que existe más de una variable que afecta el %BD en un material plástico como el pre-tratamiento térmico realizado por Roe-Sosa, además de que en dicha investigación se consideraron parámetros fisicoquímicos y reológicos (tiempo de exposición, viscosidad, índice de carbonilo y porcentaje de elongación a la ruptura).

El resto de los autores presentan un %BD mayor que el presentado, lo que puede decir que aún en poco tiempo, el resultado obtenido es un poco bajo para éste tipo



de procesos y que probablemente existen factores que inhibieron el proceso de biodegradación.

Posiblemente la inhibición del proceso de biodegradación se deba a la presencia de ácidos grasos volátiles (AGV's), que no fueron cuantificados o analizados debido a los alcances en esta investigación. Los AGV's pueden ocasionar pequeños cambios en los niveles de pH, alejando así a los reactores de su pH óptimo. Los organismos metanogénicos son más susceptibles a las variaciones de pH que los otros organismos anaerobios y siendo la metanogénesis una etapa determinante en el proceso, se debió mantener neutro el pH del sistema. Considerando que el pH de la FORSU tuvo un grado de acidez, se puede decir que fue uno de los factores limitantes para el proceso de biodegradación en la experimentación.

De los materiales en los que fue posible la determinación del %BD, los valores no presentan variaciones muy grandes, el dato con mayor valor corresponde al sustrato S4 con un %BD de 2.06 para su R3 y el menor para éste mismo de 1.78 para su R1, mientras que el control positivo presenta valores de %BD aproximados de 1.49 en sus tres reactores.

El %BD del sustrato S4 presenta un valor mayor al del control positivo, que se puede explicar de la misma forma que la cantidad de carbono teórico disponible para ser biodegradada, el material biodegradable estaba en mayor proporción en la muestra plástica que en el caso de la celulosa, así mismo el ácido poliláctico presenta mayor contenido de carbono que el control positivo.



CONCLUSIONES

Adaptando la metodología establecida en la norma ASTM D5526-12 se demostró que existe una biodegradación, que aunque es baja, el proceso de degradación físicamente es apreciable. Por lo tanto, se concluye que los materiales agroplásticos biodegradables utilizados en la agricultura protegida tienen un fin potencial para evitar la contaminación de los campos mexicanos.

Primeramente, se obtuvo información de investigaciones previas sobre la biodegradación de plásticos convencionales y biodegradables, gran parte de esta información hace referencia a plásticos de uso cotidiano como bolsas plásticas y para envases. La literatura sobre la biodegradación de plásticos de uso agrícola es suficiente, sin embargo los estudios y análisis de este tipo de material son escasos.

Considerando la producción total de biogás, la respuesta que tuvieron los plásticos agrícolas biodegradables en el proceso anaerobio de biodegradación al que fueron sometidos fue como se esperaba respecto a los agroplásticos convencionales. El modelo estadístico experimental por parcelas divididas comprobó que el comportamiento de la producción de biogás de los materiales biodegradables fue mayor comparado con el de los agroplásticos convencionales.

Posteriormente, se examinó la composición del biogás producido por las muestras de agroplásticos convencionales y biodegradables y se concluyó que la muestra biodegradable S4 presentó una mayor proporción en la composición de CH_4 y CO_2 que en el caso de la convencional (S2), que solo tuvo lectura de CO_2 . La muestra biodegradable S3 presentó una alta composición de CO_2 , sin embargo no tuvo lectura de CH_4 , por lo que se puede concluir que el agroplástico es en mayor parte compostable que biodegradable.

Utilizando un sistema de reactores sometidos a un proceso de digestión anaerobio simulando condiciones de relleno sanitario, se pusieron a prueba dos muestras plásticas de uso agrícola a base de ácido poliláctico, una a base de polietileno de baja densidad (control negativo) y una de celulosa (control positivo). La muestra biodegradable S4 obtuvo un %BD del 1.95%, comparable con el control positivo (1.5% BD), por lo que se concluye que el material agroplástico presenta una biodegradación pequeña pero representativa. Para el material convencional no se



CONCLUSIONES

obtuvo un cálculo de %BD, sin embargo, se puede concluir que éste es casi despreciable, pues su conversión de carbono teórico a carbono gaseoso en forma de CH_4 y CO_2 fue muy pequeña respecto a los materiales biodegradables.

De acuerdo con la metodología y condiciones simuladas de relleno sanitario acelerado con las que se trabajaron, se concluye que un plástico agrícola biodegradable es apto para su degradación teniendo un control de pH del sistema donde se disponga el material, así como un tiempo de exposición que permita realizar el proceso de biodegradación en su totalidad.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar pruebas de biodegradación aeróbica para demostrar el comportamiento de los materiales agroplásticos por esta vía. Una manera plausible de hacerlo es a la intemperie, exponiendo los plásticos agrícolas a las condiciones reales de cultivo, donde estén sujetos a todos los factores que modificarán y afectarán las propiedades del material, revelando el comportamiento de biodegradación real.

Es factible realizar más repeticiones por material de prueba para tener resultados estadísticos más significativos. Se recomienda realizar un nivel de reactor únicamente con FORSU e inóculo para tener una comparación más real de acuerdo con el blanco positivo (celulosa) y negativo (agroplástico convencional).

Uno de los factores importantes que tiene impacto en los resultados del porcentaje de biodegradación fue el pH, por lo que es recomendable monitorear este parámetro en la mezcla para la conservación de los microorganismos y aumentar el porcentaje de biodegradación.

Investigaciones futuras se pueden mejorar trabajando con diversos materiales agroplásticos biodegradables para comparar su comportamiento considerando su composición (en este trabajo se utilizaron únicamente materiales con ácido poliláctico y convencional), así como el tiempo de exposición y el tipo de biodegradación al que sean sometidos (aerobia o anaerobia). Esto implica añadir al modelo estadístico experimental factores como la composición del agroplástico, tiempo de exposición y pH. Sería interesante considerar como variable de respuesta la producción de metano y dióxido de carbono por separado.

ANEXO FOTOGRÁFICO Y DE PROGRAMACIÓN



Equipo utilizado para la determinación de DQO



Equipo utilizado para determinar STT, STV, STF y % humedad



Equipo para determinar N_2 total por Kjeldhal



Potenciometro usado para determinar pH



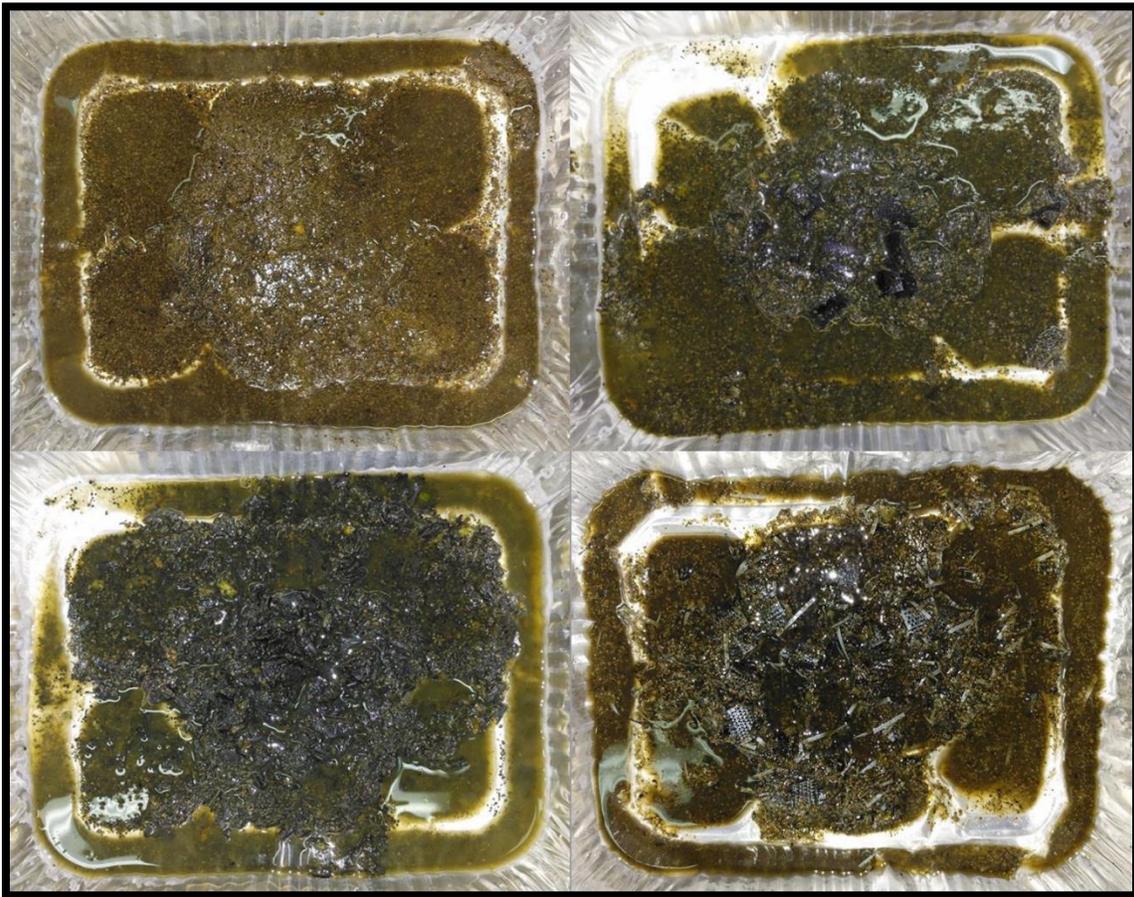
Balanza analítica para determinaciones gravimétricas realizadas



Desecador para las determinaciones de STT, STV y STF



Reactores con mezclas de FO+Inóculo+Sustrato dentro del baño María



Sobrenadantes con sustrato (repetición 1)



Sobrenadante sin sustratos



PROGRAMACIÓN UTILIZADA EN R PARA CORRER LOS ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

```
# programa
setwd("C:/Users/CHRISTIAN/Desktop/MAESTRIA/3er SEMESTRE")
datos <- read.csv("datos_volumen_final.csv")
attach(datos)
reactor <- as.factor(reactor)
sustrato <- as.factor(sustrato)
ti <- as.factor(ti)
library(GAD)
reactor <- as.random(reactor)
sustrato <- as.fixed(sustrato)
ti <- as.fixed(ti)

mod1 <- aov(y~sustrato +reactor%in%sustrato +ti +ti*sustrato)
gad(mod1) #
estimates(mod1)

snk.test(mod1, term= "sustrato:ti", among="sustrato", within="ti")
```

RESULTADO DE LA PROGRAMACIÓN EN R DE LOS ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

```
> reactor <- as.random(reactor)
> sustrato <- as.fixed(sustrato)
> ti <- as.fixed(ti)
> mod1 <- aov(y~sustrato +reactor%in%sustrato +ti +ti*sustrato)
> gad(mod1) #
Analysis of Variance Table
```

Response: y

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
sustrato	3	999032	333011	4.4898	0.039712 *
ti	9	16334440	1814938	753.4573	< 2.2e-16 ***
sustrato:reactor	8	593360	74170	30.7911	< 2.2e-16 ***
sustrato:ti	27	164384	6088	2.5275	0.000955 ***
Residual	72	173435	2409		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```
> estimates(mod1)
$tm
      sustrato reactor ti  n
sustrato      0      3 10 2.5
ti             4      3  0 2.5
sustrato:reactor 1      1 10 2.5
sustrato:ti      0      3  0 2.5
Res             1      1  1 1.0
```

```
$mse
      Mean square estimates
sustrato "Res + sustrato:reactor + sustrato"
```



```

ti "Res + ti"
sustrato:reactor "Res + sustrato:reactor"
sustrato:ti "Res + sustrato:ti"
Residual "Res"

```

\$f.versus

```

sustrato F-ratio versus "sustrato:reactor"
ti "Residual"
sustrato:reactor "Residual"
sustrato:ti "Residual"

```

> snk.test(mod1, term= "sustrato:ti", among="sustrato", within="ti")

Student-Newman-Keuls test for: sustrato:ti

Standard error = 17.9214
Df = 72

Pairwise comparisons among levels of: sustrato
within each level of: ti

Level: 1

	2	4	1	3
Rank order:	1	2	3	4
Ranked means:	445.3333	561.3333	572	579
Comparisons:				
1	4-1 ***			
2	3-1 ***	4-2 ns		
3	2-1 ***	3-2 ns	4-3 ns	

Level: 2

	2	4	1	3
Rank order:	1	2	3	4
Ranked means:	492	580.6667	622	642.6667
Comparisons:				
1	4-1 ***			
2	3-1 ***	4-2 *		
3	2-1 ***	3-2 ns	4-3 ns	

Level: 3

	2	4	1	3
Rank order:	1	2	3	4
Ranked means:	583.3333	656.6667	730	739.3333
Comparisons:				
1	4-1 ***			
2	3-1 ***	4-2 **		
3	2-1 **	3-2 **	4-3 ns	

Level: 4

	2	4	1	3
Rank order:	1	2	3	4
Ranked means:	655.3333	756	806.6667	836
Comparisons:				
1	4-1 ***			
2	3-1 ***	4-2 **		
3	2-1 ***	3-2 *	4-3 ns	



Level: 5

	2	4	1	3
Rank order:	1	2	3	4
Ranked means:	849.3333	1035.6667	1039.3333	1104.6667
Comparisons:				
1	4-1 ***			
2	3-1 ***	4-2 *		
3	2-1 ***	3-2 ns	4-3 *	

Level: 6

	2	4	1	3
Rank order:	1	2	3	4
Ranked means:	800.3333	974	997.6667	1015.6667
Comparisons:				
1	4-1 ***			
2	3-1 ***	4-2 ns		
3	2-1 ***	3-2 ns	4-3 ns	

Level: 7

	2	1	4	3
Rank order:	1	2	3	4
Ranked means:	869.6667	1088.6667	1105.6667	1117.3333
Comparisons:				
1	4-1 ***			
2	3-1 ***	4-2 ns		
3	2-1 ***	3-2 ns	4-3 ns	

Level: 8

	2	1	3	4
Rank order:	1	2	3	4
Ranked means:	958.3333	1195.6667	1220	1223
Comparisons:				
1	4-1 ***			
2	3-1 ***	4-2 ns		
3	2-1 ***	3-2 ns	4-3 ns	

Level: 9

	2	1	4	3
Rank order:	1	2	3	4
Ranked means:	1040	1321.6667	1348	1355.3333
Comparisons:				
1	4-1 ***			
2	3-1 ***	4-2 ns		
3	2-1 ***	3-2 ns	4-3 ns	

Level: 10

	2	4	1	3
Rank order:	1	2	3	4
Ranked means:	1572	1938	1941.6667	1945
Comparisons:				
1	4-1 ***			
2	3-1 ***	4-2 ns		
3	2-1 ***	3-2 ns	4-3 ns	

Signif. codes: <0.001 '***' <0.01 '**' <0.05 '*' >0.05 'ns'



REFERENCIAS

- Aamer, A. S., & et. al. (2008). Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances*, 26(3): 246-265.
- Alibardi, L., & Cossu, R. (2015). Composition variability of the organic fraction of municipal solid waste and effects on hydrogen and methane production potentials. *Waste Management*, 36, 147-155.
- Álvarez, A. (2014). *Degradación de la película de polietileno con un aditivo pro-oxidante durante el compostaje*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería.
- Ambientaling Wordpress. (2010). *Residuos Sólidos y Peligrosos* . Obtenido de mbientaling.wordpress.com
- Ammala , A., & et. al. (2011). *An overview of degradable and biodegradable polyolefins* . Progress in Polymer Science.
- Angelidaki, I., & et. al. (1993). Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste: The effect of ammonia. *Applied Microbiology and biotechnology*, 38(4): 560-564.
- ASTM D5338-11. (2011). *Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials Under Controlled Composting Conditions*.
- ASTM D5511-12. (2012). *Método de prueba para la determinación de la biodegradación anaerobia de materiales plásticos en condiciones de digestión anaerobia con alto contenido de sólidos*.
- ASTM D5988-12. (2012). *Método de prueba para la determinación de la biodegradación aerobia en el suelo*.
- ASTM D6002-96. (1996). *Standard guide for assessing the compostability of environmentally degradable plastics*.
- ASTM D6400-04. (2004). *Standard specification for compostable plastics*.
- ASTM D7475-11. (2011). *Método de prueba para la determinación de la biodegradación aerobia y anaerobia de materiales plásticos en condiciones de relleno mediante pruebas aceleradas de biorreactor*.
- ASTM International. (2012). *ASTM D 5526-12. Standard Test Method for Determining Anaerobic Biodegradation of Plastic Materials Under Accelerated Landfill Conditions*. Estados Unidos: Copyright ASTM International.



REFERENCIAS

- Barclay , A. (2006). The efficacy of Reverte oxy-biodegradable additive masterbatches. *Wells Plásticos Ltd.*
- BASF, The Chemical Company. (2013). *Ecoflex. Certified compostable polymer.* BASF.
- Beltrán, M., & Marcilla, A. (2012). *Tecnología de polímeros. Tema 2: Tipos de plástico, aditivación y mezclado.* Universidad Alicante.
- Benavides, A. (1998). *Agroplásticos : Control microambiental, control metabólico y morfogénesis.* México: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro: Departamento de Horticultura.
- Blaquéz, M. (2003). Capitulo X. Los residuos plásticos agrícolas. En C. d. Junta de Andalucía, *Los residuos urbanos y asimilables* (págs. 305-326). Andalucía : EGONDI, Artes Gráficas S. A. .
- Bonhomme, S., Cuer, A., Delort, A., Lemaire, J., Sancelme, M., & Scott, G. (2003). Environmental biodegradation of polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*, 81(3).
- Bonora, M., & De Corte, D. (2003). *Additives for controlled degradation of agricultural plastics: ENVIROCARE.* Weinheim: Macromolecular Symposia, WILEY-VCH Verlag GmbH &KGaA.
- Briassoulis, D. (2013). *Review, mapping and analysis of the agricultural plastic waste generation and consolidation in Europe;* Waste, management and research.
- Burke, D. (2011). Dairy waste anaerobic digestion handbook. Option for recovering beneficial products from dairy manure. *Environmental Energy Company; Olympia Washington, EEUU*, 16-35.
- Camargo, Y., & Vélez, A. (2009). *Emisiones de Biogás Producidas en Rellenos Sanitarios.* II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos .
- Castañeda, G., & et. al. (2007). *Degradación y estabilización acelerada de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) por tratamientos aerobios y anaerobios.* México: Informe final, Universidad Autónoma Metropolitana unidad Iztapalapa.
- Castillo-Arnedo, S. (Octubre de 2017). *Castillo-Arnedo.* Obtenido de Suministros Agrícolas: <http://www.castilloarnedo.com/>
- Chávez, J. I. (2014). *Degradación de películas de polietileno con aditivo prodegradante en reactores de relleno sanitario.* CDMX: Tesis de Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería.
- CIQA. (2019). *Determinación de peso molecular por GPC en dos muestras .* Saltillo, Coahuila: Centro de Investigaciones en Química Aplicada (CIQA).



REFERENCIAS

- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2011). *Biogas from waste and renewable resources*. Deggendorf, Germany: Wiley-VCH.
- DOF. (1984). *Norma mexicana NMX-AA-16-1984. Protección al ambiente-Contaminación del suelo-Residuos sólidos municipales-Determinación de humedad*. CDMX: Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (1984). *Norma mexicana NMX-AA-24-1984. Protección al ambiente-Contaminación del suelo-Residuos sólidos municipales-Determinación de nitrógeno total*. CDMX: Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (1984). *Norma mexicana NMX-AA-25-1984. Protección al ambiente-Contaminación del suelo-Residuo sólidos-Determinación del pH-Método potenciométrico*. CDMX: Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (1992). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA). Segundo listado de actividades altamente riesgosas*. México: Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (1992). *Norma mexicana NMX-AA-15-1985-PROTECCIÓN AL AMBIENTE - CONTAMINACIÓN DEL SUELO - RESIDUOS*. México: Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (2011). *Norma oficial mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011-Residuos de manejo especial*. CDMX: Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (2012). *Norma oficial mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012. Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación*. México: Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (2014). *Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. México: Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (2018). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)*. México: Diario Oficial de la Federación.
- Esposito, G., Funzo, L., Liotta, F., Panico, A., & Pirozzi, F. (2012). Bio-methane potential test to measure the biogas production from the digestion and co-digestion of complex organic substrates. *The Open Environmental Engineering Journal*, (5).
- Fernández Villagómez, G. (2014). *Manual de laboratorio de química del agua*. México: Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, UNAM.



REFERENCIAS

- Fernández, J., & et. al. (2010). Kinetics of mesophilic anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: Influence of initial total solid concentration . *Bioresource Technology*, 101 (16): 6322-6328.
- Fernández, L. A. (2008). *Caracterización cinética de la degradación anaerobia termofílica seca de la FORSU. Efecto de diferentes pretratamientos sobre la biodegradabilidad del residuo* . Cádiz: Universidad de Cádiz, Tesis Doctoral.
- Forster, T. (2005). *Digestión anaerobia termofílica seca de residuos sólidos urbanos: Estudio de las variables del proceso en el arranque y estabilización del bio-reactor* . Cádiz: Tesis de Doctorado, Universidad de Cádiz.
- Friedrich, J. (2014). *Etapas de la digestión anaerobia*. Obtenido de <https://fjarabo.webs.ull.es>
- Gerardi, M. (2003). *The microbiology of anaerobic digesters*. Hoboken, New Jersey, USA: Wiley-Interscience.
- Gómez, G., & Arellano, R. (2014). *Plan de Manejo Integral de Plásticos para la Agricultura*. México: Plan e-book de Asociación de Recicladores de Plásticos Agrícolas de México (ARPAM).
- Hanson, J., Yesiller, N., & Oettle , N. (2010). Spatial and Temporal Temperature Distributions in Municipal Solid Waste Landfills. *Environmental Engineering*, 136.
- ISO 13975:2012. (2012). *Determinación de la biodegradación anaerobia total de materiales plásticos en sistemas controlados de digestión de lodos-Método por medición de producción de biogás*.
- ISO 14853:2005. (2005). *Determinación de la biodegradación anaerobia total de materiales plásticos en sistemas acuosos – Método por medición de la producción de biogás*.
- ISO 14855-1:2012. (2012). *Determinación de la biodegradabilidad aerobia total de materiales plásticos en condiciones de composteo controlado- Método por análisis de la generación de dióxido de carbono. Parte 1: Método general*.
- ISO 15985:2004. (2004). *Determinación de la biodegradación anaerobia total y desintegración en condiciones de digestión anaerobia con alto contenido de sólidos – Método por análisis del biogás liberado*.
- ISO 17556:2012. (2012). *Determinación de la biodegradabilidad aerobia total de materiales plásticos en suelo mediante la medición de la demanda de oxígeno en un respirómetro o la masa generada de dióxido de carbono*.



REFERENCIAS

- Jongbloed, A. U., Puentes, J. A., & Albarracín, L. I. (2009). *Proyecto de investigación: Estudio de biodegradabilidad de plásticos denominados biodegradables sometidos a condiciones anaerobias*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, Secretaría Distrital de Ambiente.
- Kiener, R. (2010). Plastic Pollution. *CQR-CQ Press Library*, 4(7).
- Lindner, S. (2016). *Bio-Based and biodegradable Plastics*. PlasticsEurope, Association of Plastics Manufacturers.
- López, L. A., & SEMARNAT. (2012). *Simposio Internacional de Residuos: Perspectiva y gestión del sector primario en México (2008-2012), "Los residuos de la producción primaria (agropecuarios y pesqueros)"*.
- Mata-Álvarez, J., & et. al. (2000). Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology*, 74(1): 3-16.
- Mecking, S. (2004). Biologisch abbaubare Werkstoffe - Natur oder Petrochemie. *Zuerst ersch. in: Angewandte Chemie*, 9, 1096-1104.
- Mennle, F., Beylich, J., Lecerf, N., Olafsen, K., Hauge, R., Roedseth, K., & Kleppe, E. (2004). *Additive for thermoplastics, use of and method for its manufacture*. Pat WO2004094516, assigned to NOR-X Ind.
- MEYER, Herman Meyer KG. (2016). *Agrotexiles. Ökolys®: La forma ecológica de reducir las malas hierbas*. Alemania: Beaulieu International Group.
- Mostafa, W. (2002). Bioreactor landfills: experimental and field results. *Waste Management*, 22.
- Mumtaz, M., & George, J. (1995). *Toxicological profile for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*. Atlanta, Georgia: Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, US Department of Health and Human Services.
- Norlander, B. (2010). Floating Junkyard: Plastic Pollution is Turning Parts of the Ocean into a Deadly Dump. *Student Resource Center-Gold Science World*.
- Olayan, B., & et. al. (1996). Photochemical and thermal crosslinking of polymers. *Journal of Macromolecular Science Part C Polymer Reviews*, 36(4): 671-719.
- Plásticos Degradables S.A. de C.V. (23 de Marzo de 2010). *¿Qué es d2w?* Obtenido de www.plasticosdegradables.com.mx/plast4.html



- PlasticsEurope. (12 de Octubre de 2017). *Biodegradable Plastics*. Obtenido de <http://www.plasticseurope.org/what-is-plastic/bio-based-biodegradable-plastics/biodegradable-plastics.aspx>
- PlasticsEurope, & Association of Plastics Manufactures. (2017). *Biodegradable plastics fact sheet*. PlasticsEurope; Association of Plastics Manufacturers;
- Roé-Sosa, A., Estrada, M., Calderas, F., Sánchez-Arévalo, F., Manero, O., & Orta Ledesma, M. (Julio de 2015). Degradation and biodegradation of polyethylene with pro-oxidant additives under compost conditions establishing relationships between physicochemical and rheological parameters. *Journal of Applied Polymer Science*, 11. doi:10.1002/app.42721
- Roy, P., Surekha, C., & Rajagopal, C. (2006). Effect of cobalt carboxylates on the photo-oxidative degradation of low density polyethylene, Part I. *Polymer Degradation and Stability*, 91.
- Roy, P., Surekha, P., Rajagopal, C., Chatterjee, S., & Choundhary, V. (2005). Effect of benzil and cobalt stearate on aging of low-density polyethylene films. *Polymer Degradation and Stability*, 90.
- SAGARPA. (2012). *Agricultura protegida 2012*. Obtenido de SAGARPA: <http://2006-2012.sagarpa.gob.mx/agricultura/Paginas/Agricultura-Protegida2012.aspx>.
- SAGARPA, U. F. (2015). *Plan de manejo de residuos generados en actividades agrícolas. Primera etapa: Diagnóstico Nacional*. Zacatecas: Reporte detallado, Folio: 211PP064.
- Sandoval, C., & et. al. (2007). Caracterización microbiológica de lodos anaerobios utilizados en el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. *Ciencia y Tecnología*, 35(1): 509-510.
- Santos, K., & Colmenares, W. (2007). *Generación y manejo de gases en sitios de disposición final*. Obtenido de IngenieríaQuímica.org
- Schön, M. (2010). *Numerical modelling of anaerobic digestion processes in agricultural biogas plants* (Vol. 6). BoD-Books on Demand.
- SEGOB. (2014). *PROY-NMX-E-260-CNCP-2013 Industria del Plástico - Materiales bioplásticos - Terminología*. México : Diario Oficial de la Federación .
- Sonnevera International Corporation. (2011). *Ontario agricultural waste study: Environmental impacts of open-burning agricultural plastics*. Obtenido de <http://www.cleanfarms.ca/documents/studies/AgPlasticEnviroImpact>



REFERENCIAS

- SOTRAFA, T. (Octubre de 2017). *SOTRAFA*. Obtenido de Agricultura y Geosintéticos:
<http://sotrafa.com/>
- Tchobanoglous, G., & et. al. (1993). *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*.
- Treviño, N. N. (2016). *Propuesta de gestión para la disposición final de las bolsas plásticas oxobiodegradables de baja densidad presentes en los residuos sólidos urbanos*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería.
- UNE 13432:2001/AC. (2001). *Determinación de la biodegradabilidad de los envases plásticos bajo condiciones de composteo y requisitos para poder certificar que es compostable*.
- UNE-EN ISO 14851:2005. (2005). *Determinación de la biodegradabilidad aeróbica final de los materiales plásticos en medio acuoso. Método según la medición de la demanda de oxígeno en un respirómetro cerrado (ISO 14851:1999)*.
- UNE-EN ISO 14852:2005. (2005). *Determinación de la biodegradabilidad aeróbica final de los materiales plásticos en medio acuoso. Método según el análisis de dióxido de carbono generado (ISO 14852:1999)*.
- Vázquez, A. (1 de Octubre de 2004). *Instituto Nacional de Ecología*. (SEMARNAT) Recuperado el 15 de 10 de 2014, de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/444/cap5.html>
- Vázquez, A., & et. al. (2014). *Bioplásticos y plásticos degradables*. México: UAM Azcapotzalco, Asociación Nacional de Industrias del Plástico.
- Vogt, N., & Kleppe, E. (2009). Oxo-biodegradable polyolefins show continued and increased thermal oxidative degradation after exposure to light. *Polymer Degradation and Stability*, 94.
- Vox, G., Loisi, R., Blanco, I., Mugnozza, G., & Schettini, E. (2016). Mapping of agriculture plastic waste. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 8, 583-591.
- Wypych, G. (2004). *Handbook of plasticizers*. ChemTec Publishing.