



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE TRES RESINAS
BIODEGRADABLES PARA LA SUSTITUCIÓN DEL POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD
EN LA FABRICACIÓN DE PELÍCULAS FLEXIBLES PARA EMPAQUE AUTOMÁTICO**

Sara Aida Cajas Orellana

Asesorado por el Ing. Adrián Antonio Soberanis Ibáñez

Guatemala, mayo de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE TRES RESINAS
BIODEGRADABLES PARA LA SUSTITUCIÓN DEL POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD
EN LA FABRICACIÓN DE PELÍCULAS FLEXIBLES PARA EMPAQUE AUTOMÁTICO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

SARA AIDA CAJAS ORELLANA

ASESORADO POR EL ING. ADRIÁN ANTONIO SOBERANIS IBÁÑEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, MAYO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL I	
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO


DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Dinna Lissette Estrada Moreira
EXAMINADOR	Ing. César Ariel Villela Rodas
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE TRES RESINAS
BIODEGRADABLES PARA LA SUSTITUCIÓN DEL POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD
EN LA FABRICACIÓN DE PELÍCULAS FLEXIBLES PARA EMPAQUE AUTOMÁTICO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha junio de 2013.



Sara Aida Cajas Orellana



Guatemala, 23 de Febrero de 2015

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Ingeniero Víctor Monzón:

Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y dado mi aprobación del informe final del trabajo de graduación titulado "EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICO-MECANICAS DE TRES RESINAS BIODEGRADABLES PARA LA SUSTITUCION DEL POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD EN LA FABRICACION DE PELICULAS FLEXIBLES PARA EMPAQUE AUTOMÁTICO", del estudiante de Ingeniería Química Sara Aida Cajas Orellana quien se identifica con el carné número 2007-14494.

Sin otro particular, me suscribo a usted.

Atentamente,

Adrian Soberanis
Ingeniero Químico
Colegiado 1515

Adrián Antonio Soberanis Ibáñez
Ingeniero Químico
Colegiado 1515
Asesor



Guatemala, 13 de abril de 2015.
Ref. EIQ.TG-IF.019.2015.

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **074-2013** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por la estudiante universitaria: **Sara Aída Cajas Orellana**.
Identificada con número de carné: **2007-14494**.
Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

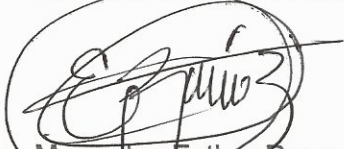
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICO-MECÁNICAS DE TRES RESINAS BIODEGRADABLES PARA LA SUSTITUCIÓN DEL POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD EN LA FABRICACIÓN DE PELÍCULAS FLEXIBLES PARA EMPAQUE AUTOMÁTICO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Adrián Antonio Soberanis Ibañez**.

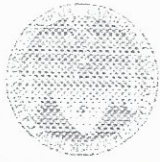
Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Inga. Mercedes Esther Roquel Chávez
COORDINADORA DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.059.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **SARA AIDA CAJAS ORELLANA** titulado: "EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE TRES RESINAS BIODEGRADABLES PARA LA SUSTITUCIÓN DEL POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD EN LA FABRICACIÓN DE PELÍCULAS FLEXIBLES PARA EMPAQUE AUTOMÁTICO". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Victor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, mayo 2015

Cc: Archivo
VMMV/ale





DTG. 218.2015

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE TRES RESINAS BIODEGRADABLES PARA LA SUSTITUCIÓN DEL POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD EN LA FABRICACIÓN DE PELÍCULAS FLEXIBLES PARA EMPAQUE AUTOMÁTICO**, presentado por la estudiante universitaria: **Sara Aida Cajas Orellana**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Angel Roberto Sic García
Decano

Guatemala, 22 de mayo de 2015



/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por su inmenso amor, por la sabiduría e inteligencia puesta en mí para poder concluir con éxito esta meta profesional. A ÉL sea la gloria.
- Mis padres** Moisés Cajas y Aída de Cajas, por su gran amor y apoyo incondicional, sus sabios consejos, por creer en mí y porque todo lo que soy es gracias a ellos, los amo mucho.
- Mi abuela** Sara de Orellana, por sus cuidados, amor y paciencia, por ser ejemplo de emprendimiento para mi vida.
- Mis hermanos** Rebeca y Samuel Cajas, por estar conmigo siempre y apoyarme en las buenas y en las malas, los quiero.
- Mis tíos** Por sus enseñanzas, consejos y por brindarme su apoyo.
- Mis primos** Por todos los momentos vividos, por su cariño y apoyo, en especial a Fernando Chang que siempre estuvo pendiente de que culminara este logro profesional.

Mis amigos

Porque son la familia que escogí y por compartir tantos momentos y experiencias inolvidables, por el apoyo incondicional y cariño.

Personas especiales

Eloisa Márquez y Elisa Bonilla, por su apoyo, cariño y comprensión, porque no solo somos amigas sino que nos hicimos hermanas en esta etapa de la vida. A Josué Matheu, por tu amor, comprensión e incondicional apoyo para culminar con éxito este logro, te amo mucho.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por toda la formación profesional adquirida a través de todos los catedráticos y por convertirse en mi casa de estudios.

Technofilms, S. A.

Por el apoyo y recursos brindados para realizar este trabajo de graduación.

Mi asesor

Ing. Adrián Soberanis, gracias por brindarme su tiempo, compañerismo, dedicación y paciencia, por los conocimientos compartidos para poder realizar este trabajo de graduación.

Ing. Carlos Morales

Por apoyarme y ser ese mentor que compartió sus conocimientos con amabilidad y dedicación; sin su apoyo no hubiera sido posible realizar esta investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
Hipótesis	XX
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Polímeros	5
2.2. Polimerización	5
2.3. Clasificación de los polímeros	7
2.3.1. Clasificación según el número de unidades repetitivas	7
2.3.2. Clasificación según su comportamiento mecánico ...	9
2.3.3. Clasificación según su comportamiento térmico.....	10
2.3.3.1. Termoplásticos	11
2.3.3.2. Termoestables	12
2.3.3.3. Elastómeros.....	13
2.4. Propiedades de los polímeros	14
2.4.1. Densidad	15
2.4.2. Conductividad eléctrica.....	15
2.4.3. Conductividad térmica	16

2.5.	Clasificación del polietileno	16
2.5.1.	Polietileno de baja densidad (LDPE)	18
2.5.2.	Polietilenos lineales	19
2.5.2.1.	Polietileno lineal de baja densidad (LLDPE)	19
2.5.2.2.	Polietileno de alta densidad (HDPE)	20
2.6.	Polímeros degradables y biodegradables	21
2.7.	Aditivos oxobiodegradables	21
2.8.	Clasificación de los polímeros biodegradables	22
2.9.	La degradación	23
2.10.	Legislación	26
2.10.1.	Norma EN 13432:2000	27
2.10.2.	Sistemas de certificación	28
2.11.	Proceso de coextrusión	29
2.12.	Propiedades físicomecánicas	30
2.12.1.	Tracción y elongación (ASTM D-882-83)	31
2.12.2.	Resistencia al rasgamiento (ASTM D-1922-05)	32
2.12.3.	Coeficientes de fricción (ASTM D-1894-93)	33
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	35
3.1.	Variables	35
3.1.1.	Variables dependientes	35
3.1.2.	Variables independientes	35
3.2.	Delimitación del campo de estudio	35
3.3.	Recursos humanos disponibles	36
3.4.	Recursos materiales disponibles	36
3.4.1.	Equipo y cristalería	36
3.4.2.	Materia prima	37

3.5.	Técnica cuantitativa	37
3.5.1.	Diseño preliminar	37
3.5.2.	Procedimiento experimental	39
3.5.2.1.	Preparación de la materia prima.....	39
3.5.2.2.	Medición de calibre de la película.....	40
3.5.2.3.	Determinación de la resistencia a cedencia, resistencia a rotura, elongación a rotura y módulo de Young	40
3.5.2.4.	Determinación del coeficiente de fricción	41
3.5.2.5.	Determinación de rasgado.....	42
3.5.2.6.	Determinación de sellabilidad.....	42
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	43
3.6.1.	Muestreo.....	43
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	44
3.7.1.	Determinación de las propiedades tensiles	44
3.7.2.	Determinación del coeficiente de fricción y fuerza de selle	46
3.7.3.	Recopilación de porcentajes de elongación a rotura de los diferentes tiempos de exposición.....	47
3.7.4.	Determinación del porcentaje de elongación residual	47
3.7.5.	Determinación de la variación del módulo de Young	48

3.7.6.	Comparativo del porcentaje de degradabilidad de las películas extruidas con las tres resinas biodegradables, respecto a la película extruida con LDPE y película oxobiodegradable en función del tiempo de exposición	49
3.8.	Análisis estadístico	50
4.	RESULTADOS.....	51
4.1.	Determinación del balance de masa del proceso de extrusión	51
4.2.	Determinación del balance de energía del proceso de extrusión	52
4.3.	Determinación de coeficiente de fricción de las películas extruidas con las distintas resinas biodegradables	56
4.4.	Determinación de la fuerza de selle de las películas extruidas con las distintas resinas biodegradables	56
4.5.	Comparativo de las propiedades físicomecánicas obtenidas en la película extruida con las tres resinas biodegradables, respecto a las propiedades físicomecánicas de la película extruida con polietileno de baja densidad y la película con aditivos oxobiodegradables	57
4.6.	Porcentaje de degradabilidad de la película extruida con la resina biodegradable tipo A en función del tiempo de exposición	59
4.7.	Porcentaje de degradabilidad de la película extruida con la resina biodegradable tipo B en función del tiempo de exposición	60

4.8.	Porcentaje de degradabilidad de la película extruida con la resina biodegradable tipo C en función del tiempo de exposición.....	61
4.9.	Porcentaje de degradabilidad de la película extruida con aditivos oxobiodegradables en función del tiempo de exposición.....	62
4.10.	Porcentaje de degradabilidad de la película extruida con polietileno de baja densidad en función del tiempo de exposición.....	63
4.11.	Comparativo del porcentaje de degradabilidad de las películas extruidas con las tres resinas biodegradables, respecto a la película extruida con polietileno de baja densidad y película oxobiodegradable en función del tiempo de exposición.....	64
4.12.	Comparativo del módulo de Young inicial y final de las películas extruidas con las tres resinas biodegradables, respecto a la película extruida con polietileno de baja densidad y película oxobiodegradable en función del tiempo de exposición.....	65
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	67
	CONCLUSIONES	73
	RECOMENDACIONES.....	75
	BIBLIOGRAFÍA.....	77
	APÉNDICES	79
	ANEXOS.....	97

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Polimerización por adhesión del PE.....	6
2.	Polimerización por condensación del <i>nylon</i> 6.6	7
3.	Estructura del homopolímero	8
4.	Estructura del copolímero	8
5.	Distribución de copolímeros	9
6.	Diferencia entre cadenas termoplásticas, elastómeras y termoestables.....	11
7.	Propiedades generales de los termoplásticos.....	12
8.	Propiedades generales de los termoestables	13
9.	Propiedades generales de los elastómeros	14
10.	Familia de los polímeros del etileno	17
11.	Esquema general de la degradación del polietileno	24
12.	Algunos cromóforos presentes en el polietileno.....	25
13.	Esquema de la degradación del polietileno.....	26
14.	Sistemas de certificación.....	29
15.	Diagrama del proceso de extrusión de película soplada.....	30
16.	Prueba de tracción y elongación	32
17.	Prueba de resistencia al rasgamiento y la ruptura	33
18.	Prueba del coeficiente de fricción	34
19.	Diagrama de flujo del proceso preliminar de la investigación	38
20.	Diagrama del balance de masa y energía.....	51
21.	Trayectoria de estado de las resinas	53
22.	Cantidad de calor respecto a la temperatura	55

23.	Degradación película extruida con resina A.....	59
24.	Degradación película extruida con resina B.....	60
25.	Degradación película extruida con resina C	61
26.	Degradación película extruida con aditivos oxobiodegradables	62
27.	Degradación película extruida con LDPE	63
28.	Comparativo en porcentaje de degradabilidad de cada película extruida con las diferentes materias primas.....	64

TABLAS

I.	Densidad, conductividad térmica y eléctrica de varios materiales	16
II.	Propiedades del LDPE	18
III.	Propiedades del HDPE	20
IV.	Determinación de las propiedades tensiles	39
V.	Recolección de datos para determinar la resistencia a cedencia, rotura, módulo de Young y elongación a rotura	45
VI.	Recolección de datos para determinar la resistencia al rasgado.....	45
VII.	Recolección de datos para determinar el coeficiente de fricción	46
VIII.	Recolección de datos para determinar la fuerza de selle	46
IX.	Recolección de mediciones en porcentaje de elongación a rotura en los diferentes tiempos de exposición	47
X.	Porcentaje de elongación residual en los diferentes tiempos de exposición correspondiente a cada película extruida	48
XI.	Variación del módulo de Young <i>versus</i> tiempo de exposición.....	49
XII.	Comparativo en porcentaje de degradabilidad de las diferentes películas extruidas.....	50
XIII.	Balance de masa	52
XIV.	Coefficientes de fricción de las películas extruidas con resinas biodegradables	56

XV.	Fuerza de selle de las diferentes películas extruidas con resinas biodegradables	57
XVI.	Comparativo de las propiedades físicomecánicas de cada película extruida con las diferentes resinas	58
XVII.	Modelo matemático de la figura 23	59
XVIII.	Modelo matemático de la figura 24	60
XIX.	Modelo matemático de la figura 25	61
XX.	Modelo matemático de la figura 26	62
XXI.	Modelo matemático de la figura 27	63
XXII.	Comparativo módulo de Young de cada película extruida con las diferentes resinas en función del tiempo de exposición	65

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
p/p	Concentración en peso
k	Conductividad térmica
CD	Dirección transversal
Q	Flujo de calor
°C	Grados Celsius
gf	Gramo fuerza
g	Gramos
h	Hora
J	Joule
K	Kelvin
kJ	Kilo Joule
kg	Kilogramo
lb	Libra
lbf	Libra fuerza
MPa	Megapascales
m	Metros
mm	Milímetros
N	Newton
PE	Polietileno
PP	Polipropileno
%	Porcentaje
Plg	Pulgada
MD	Sentido máquina

T

Temperatura

t

Tiempo

GLOSARIO

Biodegradable	Producto o sustancia que puede descomponerse en elementos químicos naturales por la acción de los agentes naturales como el Sol, agua, bacterias, plantas o los animales.
Bioplásticos	Polímeros basados en recursos renovables, fósiles o biodegradables que cumplen todos los criterios de las normas científicamente reconocidas para biodegradabilidad y compostaje de plásticos y productos plásticos.
Calibre	Se refiere al espesor de la bolsa o al de la película según la etapa del proceso.
Caracterizar	Determinar los atributos de un material, de modo que se distinga de los demás.
Compost	Técnica de manejo de residuos sólidos que utiliza un proceso natural para convertir materiales orgánicos a dióxido de carbono, agua y humus a través de la acción de microorganismos.
Conductividad térmica	Propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor.

Criba	Instrumento para cernir o cribar el cual está compuesto por un aro o un marco al cual está asegurado un cuero o un tejido agujereado o una tela metálica fina con el fin de separar lo más fino de la harina o de otras sustancias.
Extrusión	Consiste en la fundición de una mezcla de resinas poliméricas por medio de la acción de transferencia de calor por conductividad y por esfuerzos mecánicos.
Extrusor	Máquina encargada de llevar a cabo la extrusión.
LDPE	Polietileno de baja densidad.
<i>Masterbatch</i>	Mezcal altamente concentrada de aditivos con una resina portadora de los mismos.
Norma ASTM	Documento desarrollado y establecido dentro de los principios de consenso de la organización, y que cumple los requisitos de los procedimientos y regulaciones de ASTM, que por sus siglas en inglés significa American Society for Testing and Materials.
Oxibiodegradable	Es resultado del fenómeno de oxidación y biodegradación en simultáneo o sucesivamente.

Plástico biodegradable	Polímero completamente asimilado por los microorganismos presentes en un ambiente definido como alimento para su energía.
Polietileno	Es un polímero con un monómero de etileno.
Polietileno de baja densidad (LDPE)	Es un tipo de polietileno que posee ramificaciones, lo que disminuye su empaquetamiento y por ende su densidad.
Polímero	Macromoléculas formadas por una molécula más pequeña que se repite, llamada monómero.
Presión	Es la cantidad de fuerza por unidad de área.

RESUMEN

Se realizó una evaluación de las propiedades físico-mecánicas de tres resinas biodegradables para la sustitución del polietileno de baja densidad, en la fabricación de películas flexibles para empaque automático.

Para ello se extruyeron tres películas flexibles, cada una con diferente resina biodegradable, utilizando el mismo tamaño de muestra para la materia prima correspondiente. Se procedió a caracterizar las muestras extruidas para la obtención de los parámetros iniciales, realizando las pruebas de resistencia a cedencia, resistencia a rotura y elongación a rotura bajo método ASTM D-882-83, resistencia al rasgado según método ASTM D-1922-05, coeficiente de fricción según método ASTM D-1894-93 utilizando el equipo universal de ensayos.

Se cortaron muestras de cada película extruida con las diferentes resinas biodegradables, una muestra de película extruida con aditivos oxobiodegradables y una muestra de película extruida con LDPE, las cuales se colocaron a intemperie en una estructura metálica. Se determinó el comportamiento de la degradabilidad de las películas y se evaluó el porcentaje de elongación residual correspondiente a cada una estableciendo un rango de tiempo establecido en días.

Los porcentajes obtenidos de degradabilidad de cada película extruida expuesta durante 60 días, fueron de 90,15 % para A, 98,8 % para B y 98,3 % para C, 37,4 % para la película extruida con aditivos oxobiodegradables y película extruida con LDPE fue de 20,32 %.

Al comparar los porcentajes de degradabilidad de cada película extruida con resinas biodegradables respecto a la película extruida con polietileno de baja densidad, todas estas expuestas durante 60 días a la intemperie, se obtuvieron variaciones de 443,6 % para A, 486,2 % para B y 483,8 % para C, lo cual determina mayor degradabilidad en las resinas A, B y C, que en el LDPE.

También se compararon los porcentajes de degradabilidad de cada película extruida con resinas biodegradables, respecto a la película extruida con película oxobiodegradable, todas estas expuestas durante 60 días a la intemperie, obteniendo variaciones de 241,04 % para A, 264,2 % para B y 262,8 % para C, lo cual determina mayor degradabilidad en las resinas A, B y C, que en la película extruida con aditivos oxobiodegradables.

Se observaron diferencias significativas en cuanto a resistencia a cedencia, rotura, rasgado, porcentaje de elongación y módulo de Young, al comparar las propiedades físico-mecánicas de las tres películas extruidas utilizando resinas biodegradables A, B y C con la película extruida de LDPE, de igual manera al compararlas con las de la película extruida con aditivos oxobiodegradables, por lo que se cumple la hipótesis alternativa planteada en esta investigación.

OBJETIVOS

General

Evaluar las propiedades físico-mecánicas de tres resinas biodegradables para la sustitución del polietileno de baja densidad, en la fabricación de películas flexibles para empaque automático.

Específicos

1. Realizar un balance de masa y energía del proceso de producción de extrusión para las tres resinas biodegradables.
2. Determinar el coeficiente de fricción y la fuerza de selle de las películas extruidas con las resinas biodegradables de tres distintos proveedores.
3. Realizar la comparación de las propiedades físico-mecánicas obtenidas en la película extruida con las tres resinas biodegradables, respecto a las propiedades físico-mecánicas de la película extruida con polietileno de baja densidad y la película con aditivos oxobiodegradables.
4. Determinar el porcentaje de degradabilidad de las películas extruidas con las tres diferentes resinas biodegradables en función del tiempo de exposición.

5. Comparar el porcentaje de degradabilidad de las películas extruidas con las tres resinas biodegradables, respecto a la película extruida con polietileno de baja densidad y película oxobiodegradable en función del tiempo de exposición.

Hipótesis

Es posible realizar una evaluación de las propiedades físicomecánicas de tres resinas biodegradables para la sustitución del polietileno de baja densidad, en la fabricación de películas flexibles para empaque automático.

- Hipótesis nula

No existe diferencia significativa en las propiedades físicomecánicas de las películas extruidas con resinas biodegradables, en comparación con las películas extruidas con polietileno de baja densidad.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

- Hipótesis alternativa

Existe diferencia significativa en las propiedades físicomecánicas de las películas extruidas con resinas biodegradables, en comparación con las películas extruidas con polietileno de baja densidad.

$$H_a: \mu_1 \neq \mu_2$$

En donde:

μ_1 : propiedades físico-mecánicas de las películas extruidas con resinas biodegradables

μ_2 : propiedades físico-mecánicas de las películas extruidas con polietileno de baja densidad.

INTRODUCCIÓN

Los plásticos son materiales de variados usos que se producen a partir de reservas fósiles de energía, como el petróleo. Una vez son desechados, estos polímeros perduran en la naturaleza por largos períodos de tiempo y por tanto se acumulan, generando así grandes cantidades de residuos sólidos.

En los últimos años, las distintas investigaciones y aportes científicos sobre polímeros biodegradables de origen natural han sido un campo muy activo, debido a los problemas derivados del elevado impacto que los plásticos procedentes del petróleo presentan sobre el medio ambiente. Como resultado de estas investigaciones han surgido multitud de variantes y alternativas naturales, que pueden constituir una vía factible para reemplazar a los plásticos de uso habitual.

Uno de los principales retos para los bioplásticos es la competencia en precio con los plásticos derivados del petróleo.

El presente estudio se enfoca en la evaluación de las propiedades físico-mecánicas de películas extruidas con tres materiales biodegradables y propiedades de películas extruidas actualmente con materiales provenientes del petróleo, además se verificará el porcentaje de degradabilidad de cada material extruido con las diferentes resinas biodegradables, con el objetivo de implementar el uso de dichas materias primas y satisfacer las necesidades de aquellos nichos de consumidores contribuyentes a la sostenibilidad ambiental.

1. ANTECEDENTES

Se han realizado estudios sobre usos y aplicaciones de biopolímeros a nivel mundial, esto como consecuencia del aumento en el precio del petróleo, disminución de reservas petrolíferas mundiales, implantación de políticas ambientales para combatir el cambio climático y el aumento de la conciencia medioambiental, han llevado a la búsqueda de nuevas fuentes alternativas para la generación de este tipo de materiales.

En los últimos cinco años algunos fabricantes de envases plásticos han lanzado al mercado varias formas de plásticos biodegradables, fabricados con polímeros procedentes de recursos naturales renovables o bioplásticos (BPL), fundamentalmente de los vegetales, especialmente maíz, confiados en que la demanda responderá positivamente a sus ofertas.

Actualmente, el mercado de los biopolímeros se está desarrollando pero todavía no puede competir con los plásticos tradicionales. En la Unión Europea hay países que tienen en sus comercios frutas o verduras envasadas en BPL, pero en el caso de España, el mercado de los BPL en envases, se limita a alguna campaña de algún centro comercial.

Paulo César Castellanos Nájera presentó el trabajo de graduación, *Estandarización de procesos de producción en una fábrica de bolsas plásticas, para la reducción de costos* en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, para obtener el grado de licenciado en Ingeniería Industrial, en septiembre del 2009, en el presenta mayores conceptos sobre la producción de bolsas plásticas, profundizando en las etapas del proceso de una

manera más puntual y específica, tales como la materia prima, la extrusión y el corte. El objetivo principal de este trabajo consiste en los estudios de métodos y el estudio de tiempos y movimientos en el proceso de producción.

En abril de 2005, Byron Manuel Urrutia Cambranes, realizó el trabajo de graduación, *Mejoramiento del proceso de producción en una planta de empaque flexible de polietileno para productos de limpieza*, en la Universidad de San Carlos de Guatemala, en la Escuela de Ingeniería Mecánica. En dicho estudio realizó un diagnóstico general de la planta de empaque flexible y documento procedimiento que definen la forma de fabricar los productos, de llevar a cabo la instalación y el servicio posventa, así como el uso de equipos apropiados, instalación y condiciones adecuadas de trabajo.

En diciembre de 1997, Diana Libia Romero González realizó la investigación *Evaluación del grado de deterioro en plásticos biodegradables sometidos a distintos ecosistemas de estudio*. Dicho estudio se realizó en la Facultad de Ciencia Biológicas en la Universidad Autónoma de Nuevo León, México, en el cual evaluó las propiedades físicomecánicas (pérdida en peso, fuerza de tensión y porcentaje de elongación), químicas (IRTF) y análisis microbiológico de plásticos biodegradables hechos de mezclas quitina-almidón- PE-EAA y materiales 100 % sintéticos en tres ambientes, composta, agua y suelo, en donde los resultados obtenidos a través de dichos análisis demostraron que los plásticos biodegradables sufren disminución en su peso y son más atractivos a ser degradados por microorganismos, asimismo se verificó que el fenómeno de degradación se lleva a cabo por factores físicos, químicos y biológicos.

En marzo del 2001, fue publicada la Norma Europea EN 13432 *Requisitos de los envases y embalajes valorizables mediante compostaje y biodegradación*, la cual especifica los requisitos y procedimientos para determinar la compostabilidad y tratabilidad anaerobia de los envases y embalajes en cuanto a biodegradabilidad, desintegración durante el tratamiento biológico y el efecto sobre este y el efecto de la calidad del compost obtenido. Además hace la aclaración que para el caso de envases o embalajes formados por diferentes componentes, algunos de los cuales son compostables y otros no, el envase o embalaje en sí mismo como un todo se considera no compostable. Sin embargo, si los componentes pueden separarse fácilmente con la mano antes de su eliminación, los componentes compostables pueden efectivamente considerarse y ser tratados como tales, una vez separados de los componentes no compostables.

En marzo de 2008, Cheila G. Mothé, Leonid Stejko, José Luis Prin y Blanca Rojas de Gáscue, realizaron la investigación *Estudio de las propiedades mecánicas y de envejecimiento a la intemperie de polietilenos cargados con polisacáridos*, el cual se realizó en el Departamento de Procesos Orgánicos, Escuela de Química en la Universidad Federal de Rio de Janeiro. En dicho estudio se evaluaron las propiedades mecánicas y el envejecimiento a la intemperie de películas de polietileno de baja densidad (LDPE), cargadas con polisacáridos (almidón) (20 % p/p). Los ensayos de tensión realizados, en especial, los módulos de elasticidad y la deformación en el estado inicial, antes y después de someter las películas a envejecimiento por exposición a la luz durante trece semanas, proporcionaron informaciones relevantes sobre el efecto del tiempo de exposición.

En 2009, Javier Meré Marcos, realizó el *Estudio del procesado de un polímero termoplástico basado en almidón de patata amigable con el medio*

ambiente en la Universidad Carlos III de Madrid, en el Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química. Dicho estudio evaluó la selección de los diferentes plastificantes a utilizar, diseño de la proporción en peso de los diferentes constituyentes y la elección de las condiciones de procesado. A partir de los resultados obtenidos se ha podido comprobar que es posible llevar a cabo la caracterización de los materiales TPS mediante la comparación de sus índices de absorción de agua (WAI) y de solubilidad en agua (WSI), calculados a partir del Método Anderson.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Polímeros

Los polímeros pueden definirse como materiales formados por moléculas con unidades constitucionales que se repiten de una manera más o menos ordenada. Dado el gran tamaño de estas moléculas, reciben el nombre de macromoléculas. De hecho, el nombre de estos compuestos ya sugiere su constitución interna, puesto que la palabra polímero deriva de los términos griegos *poli* y *meros*, que significan “mucho” y “partes”, respectivamente.

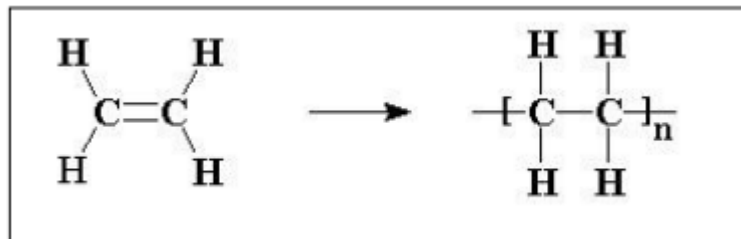
El proceso químico mediante el cual se obtiene un polímero se conoce con el nombre de polimerización; en donde el polímero se forma a partir de la unión entre sí de pequeñas moléculas. A estas pequeñas moléculas se les conoce como monómeros. Para que una molécula pueda generar el polímero, es necesario que presente dos o más grupos funcionales que puedan reaccionar.

2.2. Polimerización

A partir de los monómeros se obtienen los polímeros mediante el proceso de polimerización, en el cual existen dos tipos de reacciones; adición y condensación. Las polimerizaciones de adición corresponden a reacciones en cadena que implican centros activos de tipo radical o iónico, mientras que las polimerizaciones de condensación suceden a través de reacciones por etapas de los grupos funcionales.

En los polímeros de adición, la fórmula de la unidad estructural es la misma que la del monómero, exceptuando los dobles enlaces que han desaparecido. En tales polímeros no aparecen grupos funcionales en las cadenas, sino que están formados por la sucesión de átomos de carbono, aunque ciertos grupos funcionales pueden estar presentes como sustituyentes laterales. Al desarrollarse el polímero a partir de un centro activo, se obtienen polímeros de peso molecular elevado. La reacción transcurre a través de un mecanismo caracterizado por la coexistencia entre cadenas de alto peso molecular y monómero que no ha reaccionado.

Figura 1. **Polimerización por adhesión del PE**

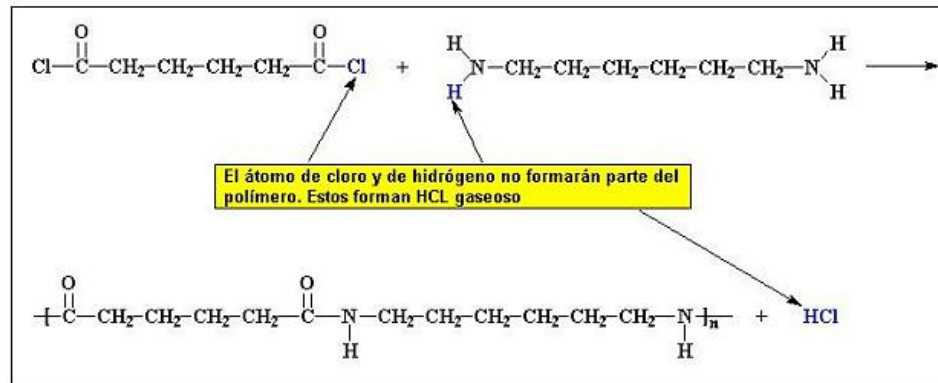


Fuente: SORDO REBOLLO, Laura. *Proceso de fabricación de un masterbatch biodegradable*.

p. 13.

En los polímeros de condensación, la fórmula de la unidad estructural tiene normalmente algunos átomos menos que la del monómero, ya que casi siempre se separa una partícula pequeña en la polimerización. Por otra parte, en estos polímeros los grupos funcionales generalmente forman parte del esqueleto de la cadena. El mecanismo de la reacción por etapas consiste en la reacción sucesiva de dos monómeros que tienen funciones complementarias o un monómero con dos funciones complementarias. Los polímeros resultantes se caracterizan por tener pesos moleculares inferiores a los obtenidos mediante mecanismos en cadena.

Figura 2. **Polimerización por condensación del nylon 6.6**



Fuente: SORDO REBOLLO, Laura. *Proceso de fabricación de un masterbatch biodegradable*.
p. 14.

2.3. Clasificación de los polímeros

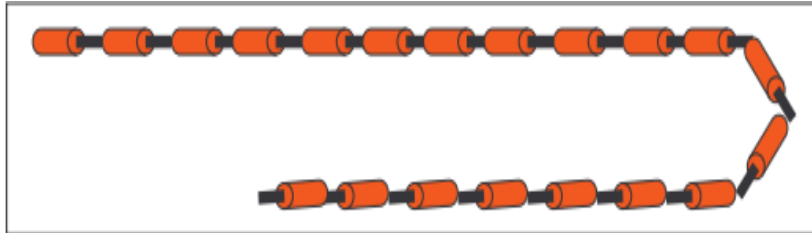
Los polímeros puede clasificarse de diversas maneras, en esta investigación se detallan tres distintos tipos.

2.3.1. Clasificación según el número de unidades repetitivas

Los polímeros pueden clasificarse en dos grandes grupos dependiendo del número de unidades repetitivas del que están formados. Así pues, un polímero puede ser:

- Homopolímero: está constituido por una única unidad repetitiva.

Figura 3. **Estructura del homopolímero**

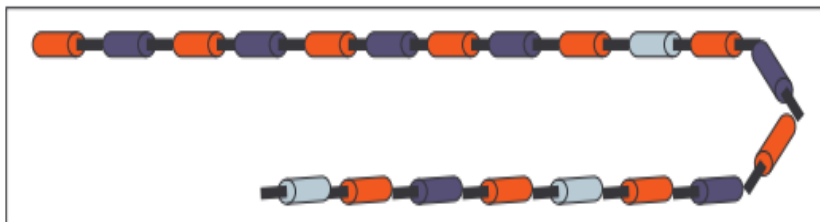


Fuente: *Estructura de la materia- polímeros.*

<http://www.escet.urjc.es/~ihierro/estructuradelamateria/Tema%209.pdf>. Consulta: 15 de enero de 2013.

- Copolímero: está constituido por dos o más unidades repetitivas distintas.

Figura 4. **Estructura del copolímero**



Fuente: *Estructura de la materia- polímeros.*

<http://www.escet.urjc.es/~ihierro/estructuradelamateria/Tema%209.pdf>. Consulta: 15 de enero de 2013.

La distribución de las diferentes unidades repetitivas en los copolímeros puede tener lugar de diferentes maneras:

- Al azar: unidades repetitivas se encuentran dispersas de forma aleatoria.
- Alternantes: unidades repetitivas se suceden alternativamente.

- En bloque: existen secuencias largas de cada una de las unidades repetitivas.
- De injerto: a una cadena formada por la misma unidad repetitiva le cuelgan como ramificaciones cadenas formadas por otra unidad repetitiva.

Figura 5. **Distribución de copolímeros**

-A-A-A-B-A-B-B-A-B-A-B-B-A-	Copolímero al azar o estadístico
-A-B-A-B-A-B-A-B-A-B-A-B-A-	Copolímero alternado
-A-A-A-A-A-A-B-B-B-B-B-B-	Copolímero en bloque
-A-A-A-A-A-A-A-A-A-A-A-A-	Copolímero de injerto
B B B	
B B B	
B B B	

Fuente: *Introducción a los polímeros.*

<https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/4182/3/AnexoB.pdf>. Consulta: 15 de enero de 2013.

2.3.2. Clasificación según su comportamiento mecánico

Existe una clasificación de aplicación muy general, que atiende al comportamiento mecánico del material. Según esta, los materiales formados por polímeros se clasifican en tres grandes grupos:

- Elastómeros: son aquellos que muestran un comportamiento elástico. Los elastómeros presentan moléculas distribuidas sin orden, con pocos entrecruzamientos, se caracteriza por un grado de reticulación bajo.

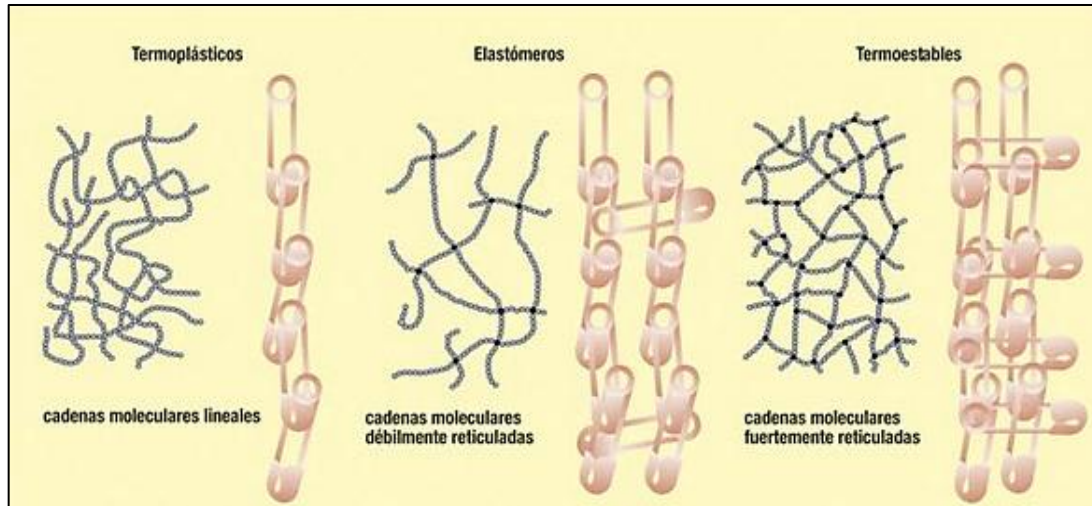
- Fibras: también llamadas fibras poliméricas, son aquellas cuyas cadenas están extendidas en línea recta o casi recta una al lado de la otra a lo largo de un mismo eje. Los polímeros ordenados en fibras, pueden ser hilados y usados como textiles. Algunos de los polímeros que pueden ser empleados como fibras son: el polietileno, polipropileno, *nylon*, poliéster, kevlar y nomex, la celulosa, entre otras.
- Plásticos: son aquellos que ante un esfuerzo suficientemente intenso se deforman irreversiblemente, no pudiendo volver a su forma original, por lo tanto, poseen durante un intervalo de temperaturas, propiedades de elasticidad y flexibilidad que permiten moldearlas, adaptarlas a diferentes formas y aplicaciones.

2.3.3. Clasificación según su comportamiento térmico

Este tipo de clasificación abarca los siguientes polímeros o plásticos:

- Termoplásticos: amorfos y semicristalinos
- Termoestables
- Elastómeros

Figura 6. **Diferencia entre cadenas termoplásticas, elastómeras y termoestables**



Fuente: SORDO REBOLLO, Laura. *Proceso de fabricación de un masterbatch biodegradable*. p. 21.

2.3.3.1. Termoplásticos

Se tratan de polímeros cuyas macromoléculas constan de cadenas lineales o ramificadas, que mantienen su cohesión mediante fuerzas intermoleculares, su intensidad depende del tipo y número de ramificaciones o cadena laterales. Al calentar este tipo de polímeros pasan al estado líquido (fluyen) y se vuelven a endurecer al enfriarlos, es decir, vuelven al estado sólido. Se pueden dividir en dos grupos: termoplásticos amorfos (PP, PE, POM, PA) y termoplásticos parcialmente cristalinos (PC, PMMA, PS, PVC).

Figura 7. **Propiedades generales de los termoplásticos**

Termoplásticos	
Calor	Funde
Disolventes	Solubles
Estructura	Lineales
Cristalinidad	Amorfos o cristalinos
Prop. Mecánicas	Rígidos a $T < T_g$ $E \approx 10^3$ MPa
Procesado	Sin reacción química
Ejemplos	PE, PP, PVC, Poliamidas, Poliésteres

Fuente: POZUELO DE DIEGO, Javier. *Materiales metálicos, cerámicos y polímeros*.
<http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/quimica-de-los-materiales/Material-de-clase/tema-6.-materiales-metalicos-ceramicos-y-polimeros-iii>. Consulta: 15 de enero de 2013.

2.3.3.2. Termoestables

Estos poseen una estructura interna formada por cadenas entrecruzadas, lo cual los hace rígidos, debido a que las cadenas de estos materiales forman una red tridimensional espacial, entrelazándose con fuertes enlaces covalentes. Resisten temperaturas más altas a la que soportan los termoplásticos, pero si son sometidos a temperaturas muy altas, tienden a descomponerse y se vuelven quebradizos. Debido al tipo de estructura que poseen, estos solo pueden fundirse una sola vez.

Figura 8. **Propiedades generales de los termoestables**

Termoestables	
Calor	No funde
Disolventes	Insolubles
Estructura	Entrecruzados
Cristalinidad	Amorfos
Prop. Mecánicas	Rígidos, $\epsilon \approx 4\%$ $E \approx 10^4$ MPa
Procesado	Con reacción química
Ejemplos	Resinas epoxi, Resinas fenol-formaldehido...

Fuente: POZUELO DE DIEGO, Javier. *Materiales metálicos, cerámicos y polímeros*.
<http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/quimica-de-los-materiales/Material-de-clase/tema-6.-materiales-metalicos-ceramicos-y-polimeros-iii>. Consulta: 15 de enero de 2013.

2.3.3.3. Elastómeros

Debido a los entrecruzamientos entre las diversas cadenas moleculares estas disponen solo de una movilidad limitada. Los enlaces covalentes que configuran los puentes únicamente pueden liberarse por medio de temperaturas muy altas, y tampoco vuelven a formarse una vez desciende la temperatura, debido a esto, los elastómeros no son ni fundibles ni solubles. Lo que sí pueden hacer hasta cierto punto es hincharse, puesto que existen pocos puntos de entrecruzamiento y las moléculas pequeñas, pueden introducirse entre sus moléculas.

Figura 9. **Propiedades generales de los elastómeros**

Elastómeros	
Calor	No funde
Disolventes	Insolubles, se hinchan
Estructura	Poco entrecruzados
Cristalinidad	Amorfos
Prop. Mecánicas	$\epsilon \approx 100-1000\%$ E bajos \approx MPa
Procesado	Con reacción química
Ejemplos	Caucho, Polibutadieno, Poliisopreno.

Fuente: POZUELO DE DIEGO, Javier. *Materiales metálicos, cerámicos y polímeros*.
<http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/quimica-de-los-materiales/Material-de-clase/tema-6.-materiales-metalicos-ceramicos-y-polimeros-iii>. Consulta: 15 de enero de 2013.

2.4. **Propiedades de los polímeros**

A pesar de la diferencia entre su composición y estructura de los distintos tipos de polímeros, existen propiedades comunes a todos ellos que los distinguen de otro tipo de materiales. A continuación se describirán propiedades como: conductividad térmica, conductividad eléctrica, densidad, transparencia y resistencia química.

2.4.1. Densidad

Los plásticos se distinguen de otros materiales por tener densidades considerablemente reducidas. El rango de densidades de los plásticos se extiende desde $0,9 \text{ g/cm}^3$ hasta $2,3 \text{ g/cm}^3$ (ver tabla I). Entre los plásticos de mayor uso y consumo están: polietileno (PE) y polipropileno (PP), ambos con densidades menores a la del agua.

Estas densidades tan bajas se deben principalmente a dos motivos: por un lado los átomos que componen los plásticos son ligeros (básicamente carbono e hidrógeno, y en algunos casos además oxígeno, nitrógeno o halógenos), y por otro, las distancias medias entre átomos dentro de los polímeros son relativamente grandes. Una densidad tan baja permite que los polímeros sean materiales fáciles de manejar, al mismo tiempo proporcionan una gran ventaja en el diseño de piezas en las que el peso es una limitación.

2.4.2. Conductividad eléctrica

De acuerdo con Raymond Chang (2013), la conductividad eléctrica mide la facilidad de un material para conducir la corriente eléctrica. En general, los plásticos son malos conductores de la corriente eléctrica. En relación con otras sustancias, tienen resistencias muy elevadas, por lo tanto, bajas conductividades (ver tabla I). Debido a sus elevadas resistencias eléctricas, los polímeros se utilizan frecuentemente como aislantes eléctricos de aparatos y conducciones que funcionan con corriente y conducciones que funcionan transporte de corriente.

2.4.3. Conductividad térmica

Esta propiedad se refiere a la cantidad de energía calórica que puede transportar un material (Kern, 1999). Las conductividades térmicas de los plásticos se encuentran en el intervalo de 0,15 hasta 0,5 W/K *m, un valor relativamente bajo. En muchas aplicaciones de los plásticos, bajos valores de conductividad térmica, se convierten en una ventaja ya que permite emplear estos materiales como aislantes térmicos.

Tabla I. **Densidad, conductividad térmica y eléctrica de varios materiales**

Material	Densidad (g/cm ³)	Conductividad térmica (W/k*m)	Conductividad eléctrica (m/Ohm mm ⁻²)
PE	0,9- 1,0	0,15- 0,5	
PP	0,9- 1,0		
PC	1,0 -1,2		
PA	1,0 -1,2	0,23 – 0,29	
PVC	1,2-1,8		10 ⁻¹⁵
PTFE	> 1,8		
Acero	7,8	17-50	5,6
Aluminio	2,7	211	38,5
Madera	0,2 -0,95		
Cobre	8,96	400	58,5
Agua	1,0		

Fuente: elaboración propia.

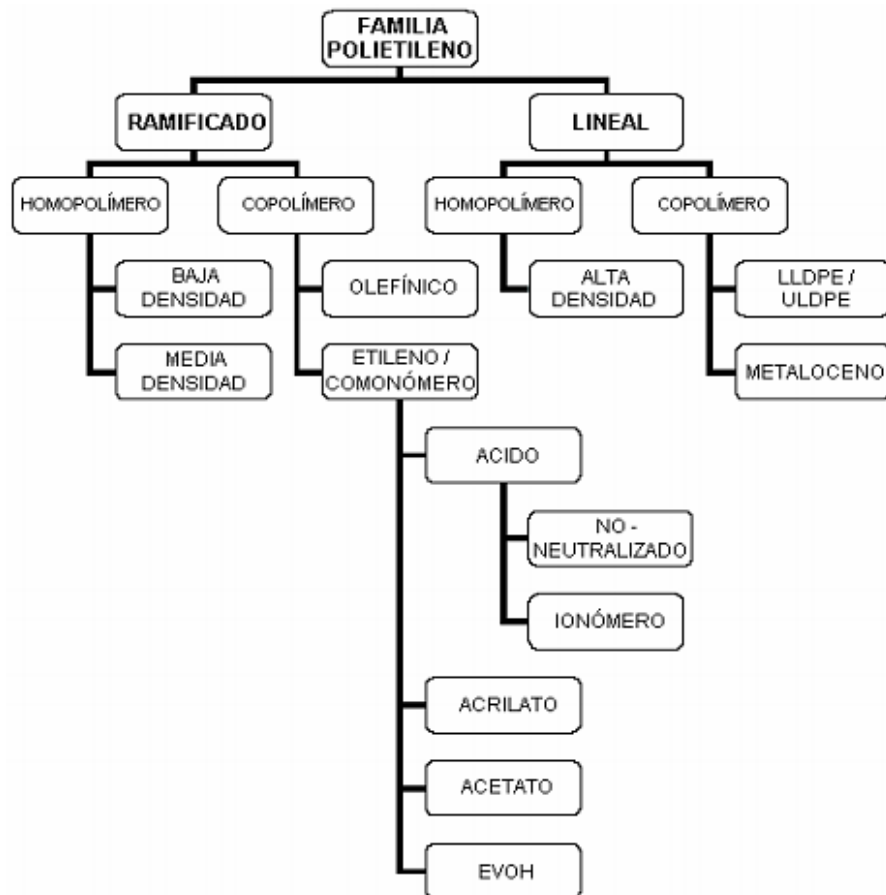
2.5. Clasificación del polietileno

El polietileno es uno de los polímeros de mayor uso en la industria del empaque, el cual pertenece a la familia de las poliolefinas. El término poliolefina

se aplica a los polímeros hechos de alquenos, sean homopolímeros o copolímeros, esto incluye a la familia del polietileno y la del polipropileno. El polietileno es la familia de adición de polímeros basados en el etileno.

A continuación se detalla la clasificación de la familia del polietileno y se detallan las características más importantes de cada uno de ellos

Figura 10. Familia de los polímeros del etileno



Fuente: QUINTANA PINCAY, Jorge Luis. *Análisis y diseño de empaques flexibles laminados para envasar alimentos*. p. 19.

2.5.1. Polietileno de baja densidad (LDPE)

Según Fred W. Billmeyer (1975), un termoplástico posee una estructura ramificada, parcialmente cristalina, fabricado bajo altas condiciones de presión y temperatura mediante el proceso de polimerización por radical libre. El LDPE posee una cristalinidad entre 40 a 60 % y una densidad entre rango de 0,91 a 0,94 g/cm³. El LDPE se caracteriza por su excelente flexibilidad, maquinabilidad, buena resistencia al impacto y sellabilidad.

Tabla II. **Propiedades del LDPE**

Propiedad	Valor
Densidad	0,91 -0,925 g/cm ³
Tg	-120 °C
Temperatura de fusión	105-115 °C
Módulo de tensión	172- 517 MPa
Elongación	100-965 %
Resistencia al rasgado	200-300 g/25µm
WVTR	375-500 gµm/m ² @ 37,8 °C a 90 % HR
Permeabilidad al O ₂ , 25 °C	16 300-21 300 cm ³ gµm/m ² dia
Permeabilidad al CO ₂ , 25 °C	75 000-1 060 000 cm ³ gµm/m ² dia
Absorción de agua	<0,01 %

Fuente: elaboración propia.

2.5.2. Polietilenos lineales

Son producidos de la polimerización de etileno, pero tienen una estructura casi lineal, la cual causa una mejor habilidad para cristalizarse, obteniendo un empaque más compacto de moléculas. Estos pueden clasificarse de la siguiente manera:

- ULDPE : polietileno de ultra baja densidad (0,89-0,915 g/cm³)
- LLDPE: polietileno lineal de baja densidad (0,916 -0,94 g/cm³)
- HDPE: polietileno de alta densidad (0,94 -0,965 g/cm³)
- HMW-HDPE: polietileno de alta densidad y alto peso molecular (0,94 - 0,965 g/cm³)

2.5.2.1. Polietileno lineal de baja densidad (LLDPE)

Este se produce debido a la presencia de comonómeros en la polimerización del etileno. Las propiedades de este polietileno son controladas por su peso molecular y densidad, ya que al tener una estructura más regular y una distribución más estrecha de peso molecular, posee mejores propiedades mecánicas que las del LDPE a la misma densidad. El LLDPE tiene mejor resistencia a la tensión, rasgado y mejor elongación, aunque el LDPE posee mejor brillo y transparencia y mejores propiedades de sellado. Estos dos polietilenos comúnmente suelen mezclarse debido a los beneficios de propiedades mecánicas que posee el LLDPE y a la buena sellabilidad del LDPE.

2.5.2.2. Polietileno de alta densidad (HDPE)

Este polietileno es un termoplástico no polar de color blanco, el cual posee un rango de densidad entre 0,94 y 0,965 g/cm³, y tiene una temperatura de fundición entre 128-138 °C. Debido al empaquetamiento compacto de las moléculas del HDPE, posee una cristalinidad de 65-90 %, es por ello que su nivel de transparencia es muy bajo y sus propiedades de barrera a la humedad son buenas. Una de las desventajas del HDPE es la poca barrera al oxígeno y compuestos orgánicos.

Tabla III. **Propiedades del HDPE**

Propiedad	Valor
Densidad	0,94 -0,965 g/cm ³
Tg	-120 °C
Temperatura de fusión	128-138 °C
Módulo de tensión	620- 1 089 MPa
Elongación	10-1 200 %
Resistencia al rasgado	20-60 g/25µm
WVTR	125 gµm/m ² @ 37,8 °C a 90 % HR
Permeabilidad al O ₂ , 25 °C	40 000-73 000 cm ³ gµm/m ² dia
Permeabilidad al CO ₂ , 25 °C	200 000-250 000 cm ³ gµm/m ² dia
Absorción de agua	<0,01 %

Fuente: elaboración propia.

2.6. Polímeros degradables y biodegradables

Antes de describir la diferencia entre estos tipos de polímeros es necesario definir el término biodegradabilidad; el cual hace referencia a la degradación de sustratos complejos por parte de microorganismos, siguiendo vías metabólicas catalizadas por enzimas segregadas por estos últimos, para obtener sustancias sencillas, básicamente agua, dióxido de carbono y biomasa, fácilmente asimilables por el medio ambiente. La velocidad de la biodegradación depende de la flora microbiana, temperatura humedad y presencia de oxígeno.

Según la Norma ASTM D883-99, este tipo de plásticos se definen de la siguiente manera:

- **Plásticos degradables:** un plástico diseñado para sufrir un cambio significativo en su estructura química bajo ciertas condiciones ambientales, resultante en la pérdida de algunas de sus propiedades, las cuales pueden ser comprobadas por métodos estándares de verificación de los materiales plásticos y su aplicación en un período determinado de tiempo, el cual determina su clasificación.
- **Plásticos biodegradables:** un plástico degradable en el cual la degradación ocurre por efecto de la acción de microorganismos existentes en la naturaleza tales como bacterias, hongos y algas.

2.7. Aditivos oxobiodegradables

Son aditivos que típicamente se adicionan en cantidades muy pequeñas (2–3 %) a resinas plásticas comunes (polietileno, polipropileno y poliestireno),

durante el proceso de transformación en productos terminados, empleando para ello equipo y procesos de manufactura estándar. Los aditivos permiten que el material plástico se degrade al ser expuesto a la luz solar, calor y a esfuerzos mecánicos en el caso de productos de polietileno.

2.8. Clasificación de los polímeros biodegradables

Los polímeros biodegradables pueden clasificarse básicamente en cuatro categorías principales:

- Polímeros naturales: como la celulosa, el almidón y las proteínas.
- Polímeros naturales modificados: como el acetato de celulosa o los polialcanoatos.
- Materiales compuestos que combinan partículas biodegradables con polímeros sintéticos.
- Polímeros sintéticos: poliésteres, poliesteramidas y los poliuretanos, entre otros.

Con respecto a la constitución química, los materiales biodegradables de mayor uso pueden clasificarse en tres categorías:

- Derivados de azúcares: engloba a polímeros que son los de mayor aplicación. El almidón, termoplástico de carácter fuertemente hidrofílico, de bajo coste y de alta disponibilidad, puede utilizarse como aditivo biodegradable o material de sustitución en plásticos tradicionales. La celulosa es el polímero natural más abundante por lo que ella y sus derivados han sido ampliamente investigados como potencial material biodegradable.

- Derivados de poliésteres: sus grupos funcionales, degradables hidrolíticamente, les confiere un gran interés en el campo de los biomateriales. Los polímeros preparados a partir de ácido glicólico (PGA) y ácido láctico (PLA) tienen una aplicación muy extensa en medicina. Otra aplicación usual de los poliésteres son las bolsas de compostaje y envasado.
- Derivados del alcohol polivinílico: se trata de un polímero sintético soluble en agua, su reactividad y degradabilidad hacen de él un material potencialmente útil en biomedicina, agricultura, áreas de tratamiento de agua y excipiente en sistemas para liberación de fármaco

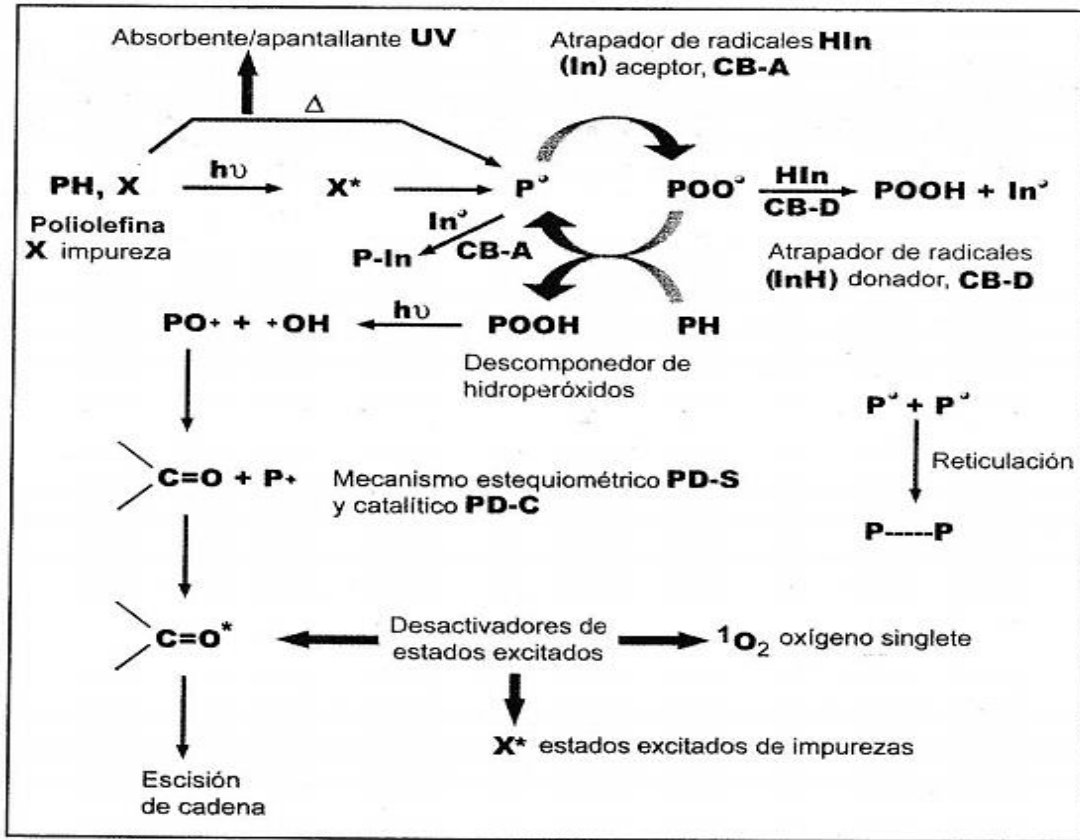
2.9. La degradación

Teresa Díaz Serrano, et al. (2001) explica que la degradación de los filmes plásticos se produce en tres circunstancias:

- Degradación termooxidativa: durante su procesado debido a las altas temperaturas que exige la transformación.
- Degradación térmica oxidativa: cuando se expone al calor en presencia del aire, durante su uso.
- Fotodegradación: cuando se expone a la luz, especialmente a la radiación ultravioleta.

La degradación fotooxidativa de las poliolefinas, que incluye escisiones de cadenas, reticulación y reacciones oxidativas secundarias, ocurre por un mecanismo de radicales libres, similar al de degradación térmica, según se observa en la figura 11.

Figura 11. Esquema general de la degradación del polietileno



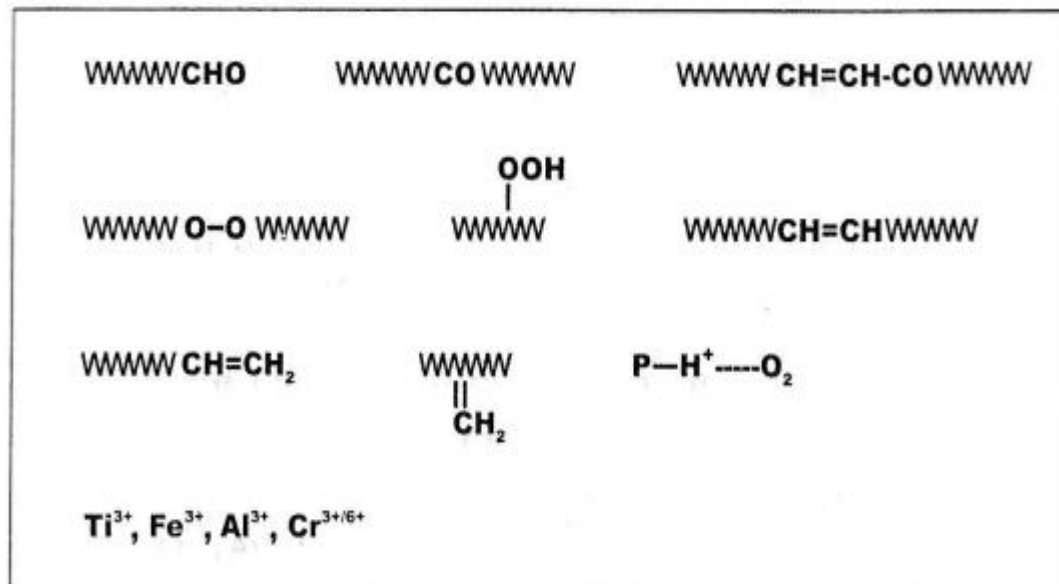
Fuente: DÍAZ SERRANO, Teresa; et al. *Los filmes plásticos en la producción agrícola*. p. 138.

En una primera etapa, por la acción del calor o de la luz, se generan radicales como consecuencia de la ruptura de enlaces. Ambos tipos de degradación dependen fundamentalmente de las características estructurales del polímero, tales como energía de enlace, interacción entre cadenas o grado de cristalización.

El polietileno, por analogía con otros hidrocarburos totalmente saturados, debería ser una material relativamente estable a la radiación ultravioleta que forma parte del espectro sola. Sin embargo, existe una fototermooxidación que

se atribuye a la existencia de grupos cromóforos capaces de absorber la luz UV de longitud de onda superior a 295 nm.

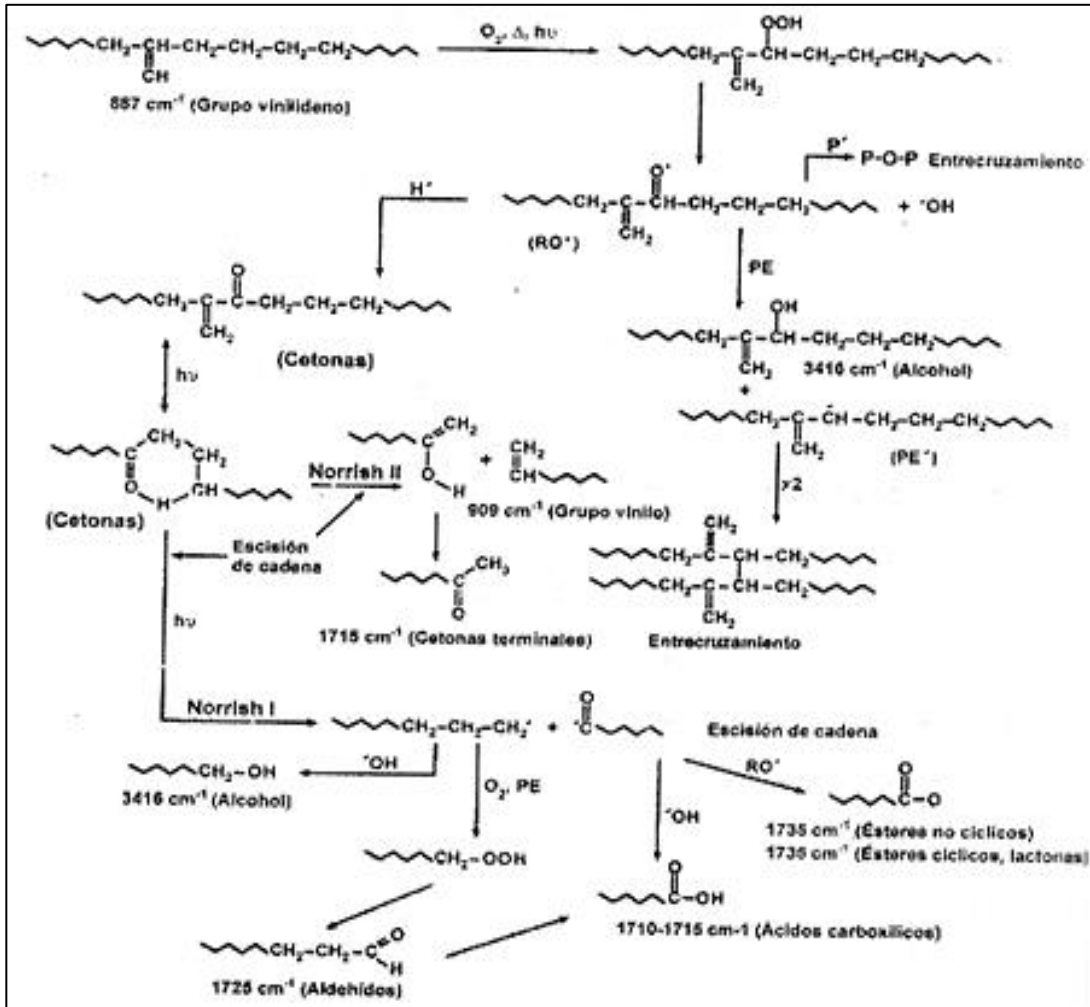
Figura 12. Algunos cromóforos presentes en el polietileno



Fuente: DÍAZ SERRANO, Teresa; et al. *Los filmes plásticos en la producción agrícola*. p. 139.

Los grupos carbonilo, hidroperóxidos, residuos de catalizadores y otras especies pueden considerarse como cromóforos inherentes al material, formados durante su obtención y procesado, responsables de la fotodegradación. En el polietileno de baja densidad existen, además, pequeñas cantidades de insaturaciones de tipo vinilideno que se ven envueltas en proceso de oxidación durante operaciones de procesado del polímero.

Figura 13. Esquema de la degradación del polietileno



Fuente: DÍAZ SERRANO, Teresa; et al. *Los filmes plásticos en la producción agrícola*. p. 140.

2.10. Legislación

Los bioplásticos se diferencian de los plásticos convencionales en dos importantes puntos:

- Por el uso de recursos renovables para su producción

- Por su biodegradabilidad / compostabilidad

2.10.1. Norma EN 13432:2000

Actualmente, los términos, biodegradación, material biodegradable, compostabilidad, entre otros, son muy comunes, pero frecuentemente mal empleados, y son, en consecuencia, una fuente de malos entendidos. La norma europea EN 13432 “*Requerimientos para recuperar el empaquetado mediante el compostaje y la biodegradación-plan de test y criterios de evaluación para la aceptación final del empaquetado*”, la cual ha sido adoptada en Italia, resuelve este problema definiendo las características que debe tener un material para poder ser definido como compostable. Esta norma es un punto de referencia para manufacturas, autoridades públicas y consumidores.

De acuerdo con la EN 13432, un material compostable debe poseer las siguientes características:

- **Biodegradabilidad:** se determina midiendo la conversión metabólica del material compostable en dióxido de carbono. Esta propiedad es evaluada cuantitativamente con un método de prueba estándar, EN 14046 (publicada también en la ISO 14855: biodegradabilidad bajo condiciones controladas de compostación). El nivel de aceptación es del 90 %, que debe ser alcanzado en menos de un mes.
- **Desintegración:** se trata de la fragmentación y la pérdida de visibilidad en el compuesto. Se mide mediante un test de compostación (descrito en la Norma EN 14045). El material es degradado junto a desperdicios orgánicos, por tres meses. Después de este tiempo, el

compuesto es cernido con una criba de 2 mm. Los residuos del material cuyas dimensiones sean mayores de 2 mm. Serán considerados como no desintegrados. Esta fracción debe ser menor al 10 % de la masa inicial.

- Ausencia de efectos negativos durante el procesamiento de compostación: requisito verificado con una prueba de compostación.
- Bajos niveles de metales pesados (por debajo de los valores máximos predefinidos) y ausencia de efectos negativos en la calidad del compuesto.





La Norma EN 13432 está estandarizada, es decir, ha sido publicada en *The Oficial Gazette of the European Community*, y, en consecuencia, debe ser adoptada por todas las comunidades europeas. La norma proporciona un supuesto en el que el empaquetado y los desperdicios del empaquetado cumplen con la Directiva Europea 94/62 EC.

2.10.2. Sistemas de certificación

Los sistemas de certificación aseguran que un producto cumple una norma, acreditándolo con un logo, que es fácilmente reconocible. Existen varios sistemas de certificación internacionales, cada uno de ellos gestionado por una organización diferente. Entre las diversas organizaciones existen acuerdos para la aceptación de sus correspondientes certificados.

La figura 14 muestra de una forma clara y concisa la relación entre organizaciones, con su correspondiente localización, sus logos y la norma asociada a los mismos.

Figura 14. **Sistemas de certificación**

Organización	DIN Certco / European Bioplastics	AIB Vinçotte	BPI / USCC	BPS
Localización	Alemania	Bélgica	EEUU	Japón
Logo				
Norma	EN 13432 ASTM D6400	EN 13432	ASTM D6400	Esquema certificación Green Pla

Fuente: SORDO REBOLLO, Laura. *Proceso de fabricación de un masterbatch biodegradable*.
p. 74.

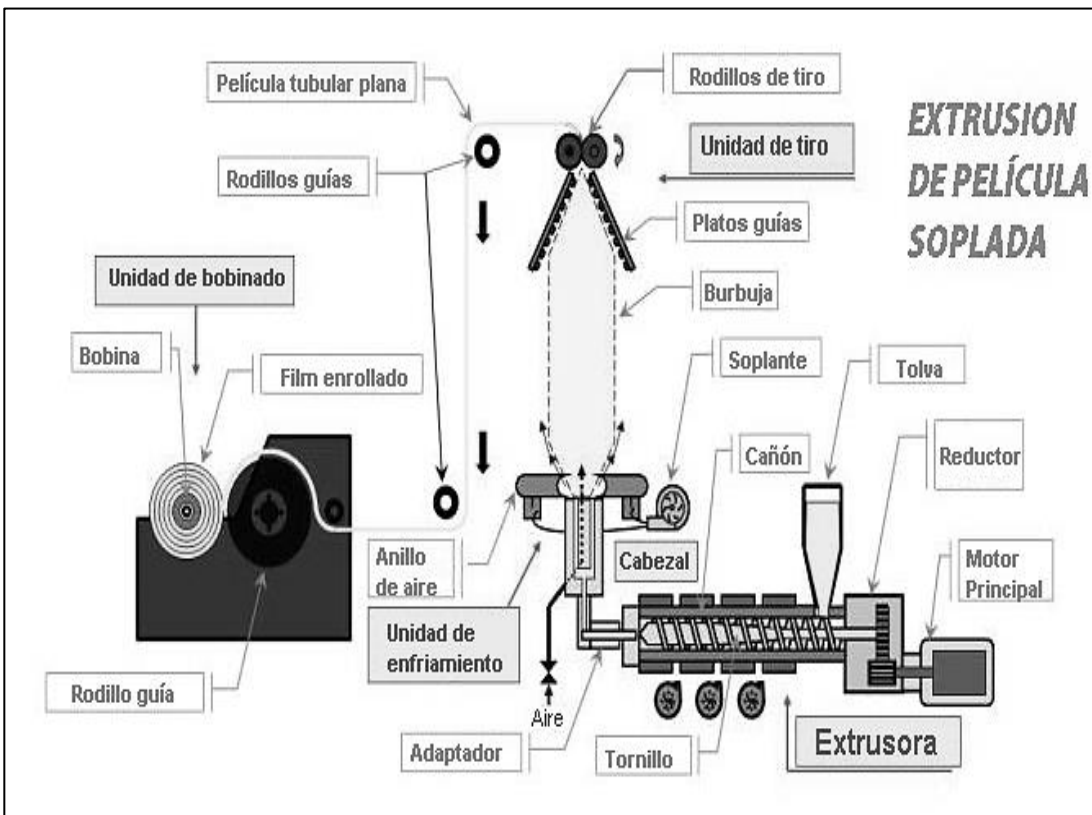
2.11. Proceso de coextrusión

Según Teresa Díaz Serrano, et al. (2001) explica que la coextrusión es una técnica que consiste en la combinación de los flujos plásticos fundidos, procedentes de dos o más extrusores diferentes en un único cabezal de diseño apropiado. Los materiales conservan sus características a la salida de la boquilla y de esta forma se aprovechan las cualidades favorables de cada uno de los materiales individuales.

La coextrusión surge en el momento en que los productos obtenidos a partir de un único material no pueden responder a las propiedades deseadas, de allí resulta la idea de combinar diferentes compuestos, cada uno formando una capa, cuyo conjunto de materiales se emplea para la obtención de películas agrícolas, industriales, láminas, tubos, entre otros.

Los extrusores que se emplean en la coextrusión son básicamente a los utilizados en tecnología monocapa. Sin embargo, los cabezales o boquillas presentan unas características especiales.

Figura 15. Diagrama del proceso de extrusión de película soplada



Fuente: *Tecnología de los plásticos, extrusión de película soplada.*

<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/04/extrusion-de-pelicula-soplada.html>.

Consulta: 15 de enero de 2013.

2.12. Propiedades físicomecánicas

Estas definen el comportamiento de los plásticos ante la imposición de un esfuerzo o una deformación, con el objetivo de predecir su comportamiento.

Para determinar estas propiedades, se han desarrollado métodos de ensayo, los cuales se realizan sobre probetas que pueden ser muestras tomadas de las películas obtenidas del proceso de extrusión por soplado. Estos análisis se llevan a cabo según las normas establecidas ASTM en donde se contemplan todas aquellas condiciones que deben proporcionar repetibilidad y reproducibilidad a los resultados obtenidos.

Debido a la anisotropía que se produce en la transformación de las películas flexibles, es necesario especificar la dirección de transformación en las probetas en función del tipo de ensayo mecánico axial o multiaxial, el cual puede ser en dirección máquina (MD) en el sentido de la salida de la boquilla y dirección transversal (CD), perpendicular al anterior.

A continuación se describen los ensayos realizados en esta investigación para la obtención de las propiedades físicomecánicas.

2.12.1. Tracción y elongación (ASTM D-882-83)

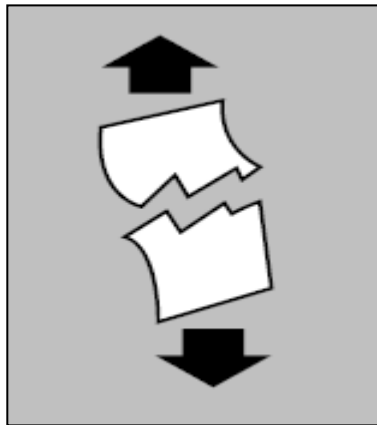
En este ensayo la probeta es estirada por sus extremos en una dirección. Los parámetros de tracción varían para una misma película en función de la dirección en la que se hayan tomado las probetas, MD o CD.

La resistencia a la tracción es la cantidad de fuerza requerida para la ruptura completa de un material. Para películas, las unidades normales de medida son las libras por pulgada cuadrada del área original transversal.

La elongación es la cantidad de estiramiento que el material puede soportar antes de romperse. La máquina de prueba consiste en mordazas para sujetar la muestra, algún modo de aumentar la tensión hasta el punto de ruptura de las muestras, e indicadores de la tensión y la cantidad de elongación.

Mucha elongación es un índice de resistencia, puesto que indica que el material absorberá una gran cantidad de energía antes de romperse.

Figura 16. **Prueba de tracción y elongación**



Fuente: ALARCÓN SALAS, Xavier Alberto. *Estudio de la relación entre la estructura, procesamiento, propiedades mecánicas y transferencia de vapor de agua en películas multicapa de polietileno utilizadas en empaques alimenticios*. p. 68.

2.12.2. Resistencia al rasgamiento (ASTM D-1922-05)

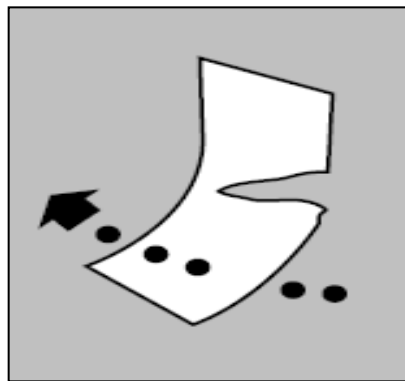
La resistencia al rasgado o rompimiento indica la fuerza necesaria para llegar a la ruptura de una muestra después de hacerle una muesca inicial. La resistencia se mide en kilogramo o gramo fuerza por milímetro de película.

El equipo consiste en una mordaza fija y una mordaza movable en un péndulo, algún modo de mantener elevado este péndulo y luego soltarlo de súbito y una escala para medir el arco que hace el péndulo libre. Muestras de la película son sujetadas con mordaza dentro del probador y se les hace una muesca para iniciar el rasgamiento/ruptura; luego se suelta la mordaza del péndulo. Esto rasga la muestra y la escala mide el arco. Puesto que el arco es

proporcional a la resistencia de la muestra, la medición del arco indica la resistencia.

Esta prueba es muy importante para todo tipo de película así como para papel. Valores altos al rasgamiento pueden ser necesarios para operaciones de máquina o para proporcionar mejor resistencia en los empaques flexibles. Sin embargo, los valores bajos son necesarios y útiles para proporcionar una

Figura 17. **Prueba de resistencia al rasgamiento y la ruptura**



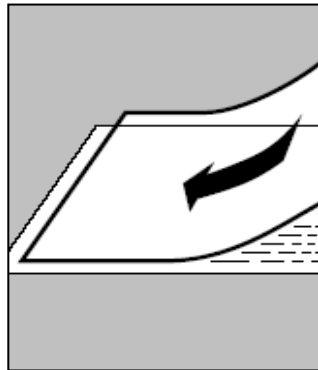
Fuente: ALARCÓN SALAS, Xavier Alberto. *Estudio de la relación entre la estructura, procesamiento, propiedades mecánicas y transferencia de vapor de agua en películas multicapa de polietileno utilizadas en empaques alimenticios*. p. 70.

2.12.3. Coeficientes de fricción (ASTM D-1894-93)

Los coeficientes de fricción son la relación entre la fuerza de fricción y la fuerza, generalmente de gravitación, que actúa perpendicularmente a las dos superficies en contacto. Este coeficiente es una medida de la dificultad relativa que tendrá la superficie de una película al deslizarse sobre otra semejante contigua a la primera.

El coeficiente de fricción inicial o estático se relaciona con la fuerza medida para comenzar el movimiento de las superficies, una en relación con la otra. El coeficiente de fricción dinámico se relaciona con la fuerza medida para mantener este movimiento. El equipo para determinar el COF consiste en un deslizador recubierto con película que será arrastrado a una velocidad controlada sobre una superficie de película fija. Se emplea un medidor de flujo para medir la fuerza de fricción. Esta prueba mide el deslizamiento o lubricidad de película a película o de metal a película.

Figura 18. **Prueba del coeficiente de fricción**



Fuente: ALARCÓN SALAS, Xavier Alberto. *Estudio de la relación entre la estructura, procesamiento, propiedades mecánicas y transferencia de vapor de agua en películas multicapa de polietileno utilizadas en empaques alimenticios.* p. 76.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Para determinar los objetivos establecidos, a continuación se describen las variables involucradas en la obtención de los resultados de investigación.

3.1.1. Variables dependientes

- Resistencia en cedencia (libra fuerza/pulgadas²)
- Resistencia en rotura (libra fuerza/pulgadas²)
- Elongación a rotura (en porcentaje)
- Resistencia a rasgado (gramo fuerza)
- Fuerza de sello (Newton)
- Coeficiente de fricción (adimensional)
- Temperatura de inicio selle (grados Celsius)
- Tiempo de exposición (días)

3.1.2. Variables independientes

- Densidad de resina (gramos/centímetros³)

3.2. Delimitación del campo de estudio

En esta investigación se evaluaron las propiedades físico-mecánicas de tres resinas biodegradables, para la sustitución del polietileno de baja densidad en la fabricación de películas flexibles para empaque automático. El estudio se

llevó a cabo a nivel laboratorio, enfocando su aplicación a la industria de plásticos.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Tesista: Sara Aída Cajas Orellana
- Asesor: Ing. Adrián Antonio Soberanis Ibáñez
- Coasesor: Ing. Carlos Alberto Morales

3.4. Recursos materiales disponibles

Consisten en las materias primas, equipos y cristalería utilizados para la ejecución de la investigación.

3.4.1. Equipo y cristalería

- Extrusor industrial
- Tolvas mezcladoras
- Flexómetro
- Micrómetro digital Mitutoyo 03095
- Balanza analítica
- Equipo universal de ensayos LF plus 1923
- Péndulo universal Testing Maching Inc.
- Selladora Proysolin
- Plantillas de calibración
- Plantillas de rendimiento
- Plantillas para medición de COF
- Plantillas para corte de probetas

3.4.2. Materia prima

- Resina biodegradable A
- Resina biodegradable B
- Resina biodegradable C
- Polietileno de baja densidad
- Aditivo oxobiodegradable

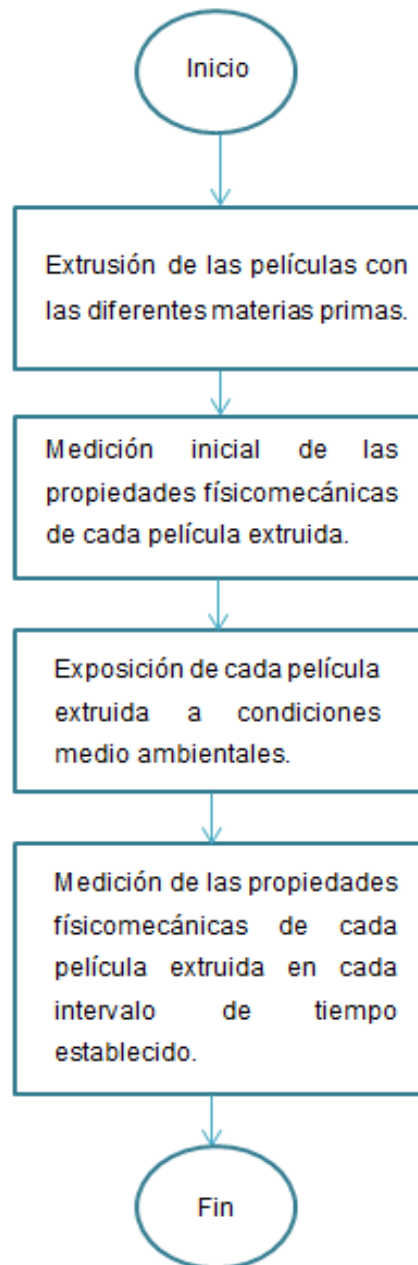
3.5. Técnica cuantitativa

Para el cumplimiento de los objetivos establecidos, se desarrolló una técnica cuantitativa dentro de la investigación.

3.5.1. Diseño preliminar

Se elaboró un diagrama de flujo del proceso preliminar de la investigación, para establecer la secuencia de las operaciones a realizar.

Figura 19. Diagrama de flujo del proceso preliminar de la investigación



Fuente: elaboración propia, con programa Word.

3.5.2. Procedimiento experimental

Las propiedades físico-mecánicas fueron determinadas mediante los siguientes ensayos establecidos en diferentes normas ASTM.

Tabla IV. **Determinación de las propiedades tensiles**

PROPIEDAD	MÉTODO ASTM
Resistencia a cedencia	D-882-83
Resistencia a rotura	D-882-83
Elongación a rotura	D-882-83
Resistencia a rasgado	D-1922-05
Coefficiente de fricción	D1894-93

Fuente: elaboración propia.

3.5.2.1. Preparación de la materia prima

- Se prepararon las materias primas utilizadas para la alimentación en cada una de las tolvas.
- Se graduaron las temperaturas para cada una de las zonas (A, B, y C) para establecer las condiciones de operación.
- Se haló la masa fundida hacia arriba y se amarró a la reata.
- Se estableció y controló la relación de soplado.
- Se encendieron los rodillos haladores y a la vez se cerraron para el colapsamiento de la película.

- Se controló la velocidad del halador y extrusora.
- Se abrieron y cerraron los rodillos haladores.
- Se activó el embobinador para ir halando la reata.
- Se embobinó la película mientras se cuadraron los parámetros de operación.
- Se esperó de 10 a 15 minutos mientras se estabilizaba el proceso.
- Se tomaron muestras de cada película extruida.

3.5.2.2. Medición de calibre de la película

- Se colocó la muestra sobre una superficie plana de vidrio.
- Se encendió el micrómetro digital, se colocó en unidades de milésimas de pulgada y se ajustó cero.
- Se realizaron diferentes medidas puntuales de calibre a lo ancho de cada muestra.
- Se anotaron las mediciones obtenidas.

3.5.2.3. Determinación de la resistencia a cedencia, resistencia a rotura, elongación a rotura y módulo de Young

- Se cortaron las probetas a evaluar con la cuchilla de 10 cm en ambas direcciones (MD – CD).
- Se encendió el equipo de ensayo universal y se colocó a la medida establecida entre la mordaza superior e inferior (3 centímetros).
- Se colocó la probeta entre las mordazas y se aseguraron con las mismas sin dejarla muy ajustada.
- Se verificaron los parámetros en el software de tensiles para evitar errores en las mediciones.

- Se presionó el botón *play* para empezar a colocar la trazabilidad de la muestra a analizar.
- Se colocó en cero la consola y presionó el botón ok en la pantalla de trazabilidad para ejecutar la prueba.
- Se evaluó el comportamiento de la gráfica durante el tiempo de la prueba y se registraron los valores obtenidos.

3.5.2.4. Determinación del coeficiente de fricción

- Se cortaron las muestras con las plantillas de corte correspondientes.
- Se colocaron las muestras de 26,5*12 cm en la plataforma, y se sujetaron con cinta adhesiva.
- Se colocó la muestra de 13*6,5 cm en el sled y se sujetó con los rodillos sobre los extremos del sled.
- Se ingresó al software de fricción.
- Se esperaron 10 segundos para que el programa se estabilizara.
- Se ingresó en el icono New Test para abrir la pantalla de condiciones de operación del equipo.
- Se ingresó al ícono *play* que aparece en la parte superior de la pantalla en donde se ingresaron los datos generales de la muestra.
- Se ingresó la información requerida para con el fin de identificar y distinguir el ensayo.
- Se presionó en el botón ajustar a cero que aparece en la consola para establecer en punto donde se inició el ensayo.
- Se presionó en el botón ok que aparece sobre la pantalla de datos generales de la muestra para empezar el ensayo.
- Se verificaron y registraron los datos obtenidos.

3.5.2.5. Determinación de rasgado

- Se cortaron las probetas con la plantilla para ensayo de rasgado.
- Se encendió el equipo de rasgado y se verificó que este nivelado.
- Se procedió a realizar la calibración interna al equipo.
- Se colocó la probeta en las mordazas del equipo.
- Se procedió a realizar el ensayo asegurándose que el equipo y la probeta se encontrarán en las condiciones correctas.
- Se registraron los valores obtenidos.

3.5.2.6. Determinación de sellabilidad

- Se cortó una muestra doble de la película flexible con la plantilla de corte y la cuchilla.
- Se activó la mordaza sin colocar película, antes de iniciar el sellado de las muestras. Esta operación se realizó 3 veces, con el objetivo de estabilizar las temperaturas en cada una de las mordazas.
- Se colocó la muestra cortada sobre la base de la selladora de laboratorio y luego se selló, accionando los activadores 1 y 2 simultáneamente para que la mordaza bajara y fundiera las dos capas de película.
- Se identificó la tira sellada en cada espacio que dejan las 5 mordazas y colocaron las diferentes temperaturas correspondientes a cada mordaza.
- Se cortó la probeta con la cuchilla de 10 mm a lo largo de la muestra.
- Se cortó con la tijera, sobre el borde superior del sello, asegurando que cada probeta quedara identificada con la temperatura de sellado.
- Se colocó en el equipo universal de ensayos la celda de carga de 250 Newton.
- Se verificaron las condiciones del equipo para realizar la prueba.

- Se procedió a realizar el ensayo y se observó el comportamiento de la probeta.
- Se verificaron y registraron los datos obtenidos.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Para poder evaluar los objetivos de la investigación, se tabularon los datos obtenidos en cada ensayo, con el fin de determinar los resultados correspondientes a cada objetivo establecido.

3.6.1. Muestreo

Debido a que los resultados deben ser precisos y satisfactorios, se trata de disminuir los posibles errores utilizando un número de corridas adecuadas a evaluar. Para llevar a cabo lo anterior se trabajará con un 95 % de probabilidad de éxito y por tanto un 5 % de probabilidad de fracaso y un nivel de significancia del 5 %. Para ello, se utiliza la siguiente ecuación:

$$N = \frac{Z^2 PQ}{E^2} \quad (\text{Ecuación 1})$$

En donde:

$Z_{\alpha/2}$ = confiabilidad

P = probabilidad de éxito

Q = probabilidad de fracaso (1-P)

E = error estimado

N = número de corridas

Para el desarrollo de la investigación se utilizó un error estimado del 20 %, por lo que aplicando la ecuación 1 se obtuvo la siguiente cantidad de corridas:

$$N = \frac{(1,96)^2 \times 0,95 \times 0,05}{(0,20)^2}$$

$$N = 4,5619 \approx 5$$

De acuerdo al resultado anterior, el número de corridas a realizadas fue de 5.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Las siguientes tablas muestran cómo se recolectó la información de los ensayos realizados para obtener los resultados de la investigación.

3.7.1. Determinación de las propiedades tensiles

La recolección datos obtenidos en el análisis de las propiedades tensiles se muestran en las tablas V y VI para obtener los valores correspondientes a cada propiedad físico-mecánica de las diferentes películas extruidas.

Tabla V. **Recolección de datos para determinar la resistencia a cedencia, rotura, módulo de Young y elongación a rotura**

Tipo de resina	Núm. muestra	Sentido	Resistencia a cedencia (lbf/plg ²)	Resistencia a rotura (lbf/plg ²)	Módulo de Young (lbf/plg ²)	Elongación a rotura (%)
Película con resina XX	1					
	2					
	3					
	4					
	5					

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Recolección de datos para determinar la resistencia al rasgado**

Tipo de resina	Núm. muestra	Sentido	Resistencia al rasgado (gr)
Película con resina XX	1		
	2		
	3		
	4		
	5		

Fuente: elaboración propia.

3.7.2. Determinación del coeficiente de fricción y fuerza de selle

La recolección de datos obtenidos en el análisis del coeficiente de fricción y fuerza de selle se muestran en la tabla VII y VIII.

Tabla VII. **Recolección de datos para determinar el coeficiente de fricción**

Tipo de resina	Núm. muestra	COF Estático	COF Dinámico	Lado versus lado
Película con resina XX	1			
	2			
	3			
	4			
	5			

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Recolección de datos para determinar la fuerza de selle**

Tipo de resina	Temperatura (°C)	Carga máxima (N)
Película con resina XX	105	
	110	
	115	
	120	
	125	
	130	
	135	
	140	

Fuente: elaboración propia.

3.7.3. Recopilación de porcentajes de elongación a rotura de los diferentes tiempos de exposición

La tabla IX se utilizó para recopilar las mediciones realizadas a cada película extruida en los diferentes tiempos de exposición

Tabla IX. **Recolección de mediciones en porcentaje de elongación a rotura en los diferentes tiempos de exposición**

Tipo de resina	Tiempo de exposición (días)	Porcentaje de elongación a rotura
Película con resina XX		

Fuente: elaboración propia.

3.7.4. Determinación del porcentaje de elongación residual

La tabla X se utilizó para recopilar el porcentaje de elongación residual correspondiente a cada tiempo de exposición de cada película extruida.

Tabla X. **Porcentaje de elongación residual en los diferentes tiempos de exposición correspondiente a cada película extruida**

Tipo de resina	Tiempo de exposición (días)	Porcentaje de elongación a rotura	Porcentaje de elongación residual
Película con resina XX			

Fuente: elaboración propia.

Para calcular el porcentaje de elongación residual se utiliza la siguiente ecuación:

$$\% \text{ elongación residual} = \left(\frac{\% \text{ elongación a rotura}_{\text{tiempo 1}}}{\% \text{ elongación a rotura}_{\text{tiempo inicial}}} \right) * 100$$

(Ecuación 2)

3.7.5. Determinación de la variación del módulo de Young

Para determinar la variación del módulo de Young se utilizó la tabla X para la recopilación de los datos obtenidos.

Tabla XI. **Variación del módulo de Young *versus* tiempo de exposición**

Tipo de resina	Tiempo de exposición (días)	Módulo de Young
Película con resina XX	t _{inicial}	
	t _{final}	

Fuente: elaboración propia.

Para calcular el porcentaje de elongación residual se utiliza la siguiente ecuación:

$$\% \text{ variación módulo de Young} = \left(\frac{\text{Módulo de Young}_{t \text{ final}}}{\text{Módulo de Young}_{t \text{ inicial}}} \right) * 100$$

(Ecuación 3)

3.7.6. Comparativo del porcentaje de degradabilidad de las películas extruidas con las tres resinas biodegradables, respecto a la película extruida con LDPE y película oxobiodegradable en función del tiempo de exposición

La tabla XI se utilizó para realizar el comparativo del porcentaje de degradabilidad por medio de las mediciones del porcentaje de elongación residual, de las diferentes películas extruidas con las distintas materias primas.

Tabla XII. **Comparativo en porcentaje de degradabilidad de las diferentes películas extruidas**

Tiempo de exposición	Porcentaje de degradación película con resina A	Porcentaje de degradación película con resina B	Porcentaje de degradación película con resina C	Porcentaje de degradación película con aditivos OXO	Porcentaje de degradación película con resina de LDPE

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

Se analizó el efecto de la variación de las propiedades físico-mecánicas en diferentes muestras analizadas para la sustitución del polietileno de baja densidad, utilizando anova como análisis estadístico de los resultados.

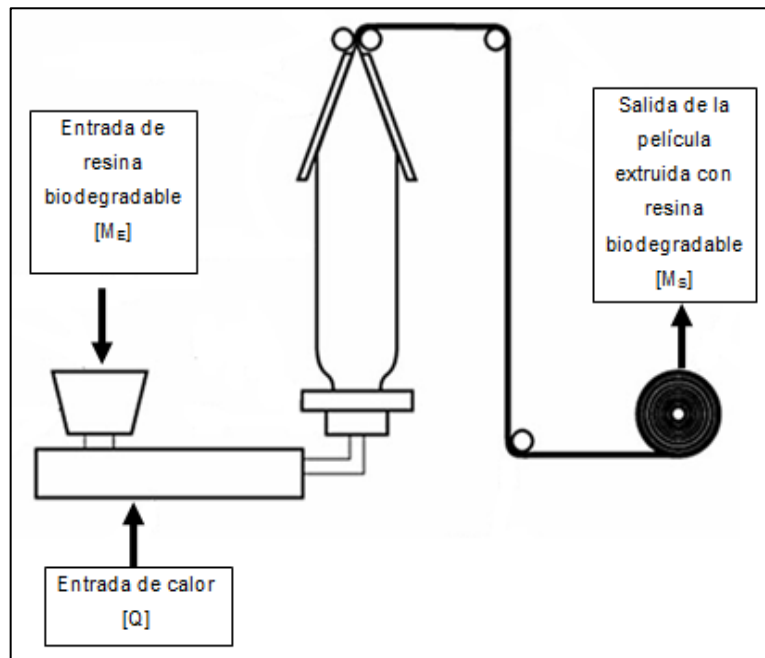
4. RESULTADOS

4.1. Determinación del balance de masa del proceso de extrusión

Se establece en el balance de masa la acumulación de material en el extrusor. Para determinar este valor, se asume el porcentaje de pureza al 99 % ya que las fichas técnicas proporcionadas por los proveedores de la materia prima no lo detallan. La ecuación general del balance es la siguiente:

$$\text{Entrada} - \text{salida} + \text{generación} = \text{acumulación} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Figura 20. Diagrama del balance de masa y energía



Fuente: elaboración propia, con programa Word.

Balance de masa sobre las resinas biodegradables

$$M_E = M_S + \text{acumulación} \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$M_E = 151,47 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 1,53 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 153 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Tabla XIII. **Balance de masa**

Masa que entra al extrusor (kilogramo/hora)	153,00
Masa que sale del extrusor (kilogramo/hora)	151,47
Acumulación de materia en el extrusor (kilogramos)	1,53

Fuente: elaboración propia.

4.2. Determinación del balance de energía del proceso de extrusión

Este balance permite determinar la cantidad de calor necesario para fundir y mezclar la materia prima en el extrusor. La ecuación del balance de energía es la siguiente:

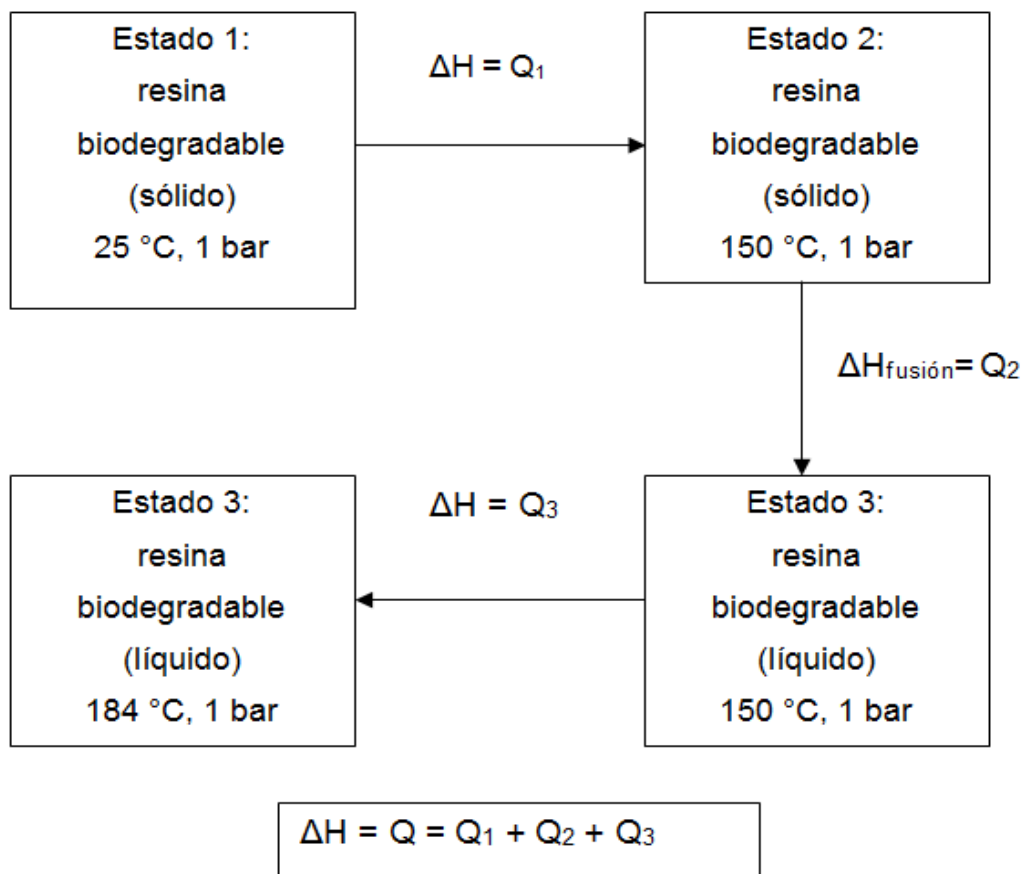
$$\Delta \text{Energía} = Q - \text{pérdidas} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Asumiendo un comportamiento adiabático, las pérdidas son nulas. Además, que la energía potencial y la energía interna también se consideran nulas, el balance se establece de la siguiente forma:

$$\Delta \text{Energía} = \Delta H = Q \quad (\text{Ecuación 7})$$

Para establecer la cantidad de calor necesaria para realizar la fundición y el mezclado de las resinas, se utilizaron propiedades intrínsecas y fue necesario plantear una trayectoria de estado que permitiera calcular la cantidad de calor.

Figura 21. **Trayectoria de estado de las resinas**



Fuente: elaboración propia.

Cálculo de Q_1

$$Q_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_p dt \quad (\text{Ecuación 8})$$

En donde:

$$C_p = 2,5 \text{ kJ/kg K}$$

$$Q_1 = \int_{25}^{150} 2,5 \, dt$$

$$Q_1 = 312,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Cálculo de Q_2

$$Q_2 = \Delta H_{\text{fusión}} \quad (\text{Ecuación 9})$$

En donde:

$$\Delta H_{\text{fusión}} = 317 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_2 = 317 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Cálculo de Q_3

$$Q_3 = \int_{T_1}^{T_2} C_p \, dt \quad (\text{Ecuación 10})$$

En donde:

$$C_p = 2,5 \text{ kJ/kg K}$$

$$Q_3 = \int_{150}^{184} 2,5 \, dt$$

$$Q_3 = 85 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Cálculo del calor total

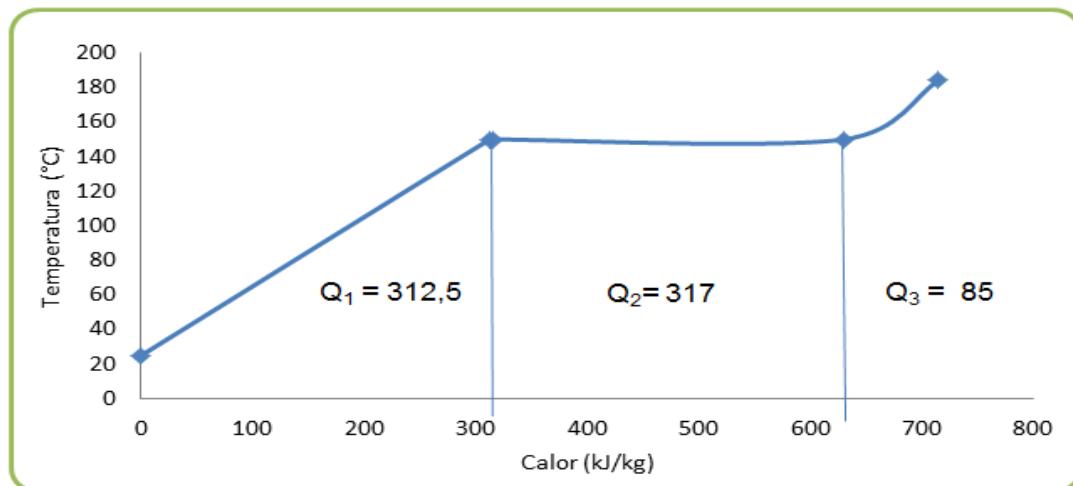
$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q = 312,5 + 317 + 85$$

$$Q = 714,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

El valor de Q es el calor necesario para fundir y mezclar de manera adecuada un kilogramo de resina biodegradable y es consecuente con el balance de energía planteado en la sección anterior.

Figura 22. **Cantidad de calor respecto a la temperatura**



Fuente: elaboración propia.

4.3. Determinación de coeficiente de fricción de las películas extruidas con las distintas resinas biodegradables

En la tabla XIV se muestran los datos de coeficiente de fricción de cada película extruida con las diferentes resinas biodegradables.

Tabla XIV. **Coefficientes de fricción de las películas extruidas con resinas biodegradables**

Tipo de resina	COF Estático	COF Dinámico	Sentido
Resina A	0,37	0,37	Dorso-Dorso
Resina B	0,24	0,24	
Resina C	0,26	0,24	

Fuente: elaboración propia.

4.4. Determinación de la fuerza de selle de las películas extruidas con las distintas resinas biodegradables

En la tabla XV se muestran los valores de fuerza de selle obtenidos para cada película extruida con las diferentes resinas biodegradables.

Tabla XV. **Fuerza de selle de las diferentes películas extruidas con resinas biodegradables**

Tipo	Temperatura inicio de selle (°C)	Fuerza de selle (N)	Sentido
Resina A	135	1,67	Dorso-Dorso
Resina B	No selló		
Resina C	110	1,23	

Fuente: elaboración propia.

4.5. Comparativo de las propiedades físico-mecánicas obtenidas en la película extruida con las tres resinas biodegradables, respecto a las propiedades físico-mecánicas de la película extruida con polietileno de baja densidad y la película con aditivos oxobiodegradables

En la tabla XVI se muestra los valores de cada propiedad físico-mecánica de cada película extruida con las tres resinas biodegradables, película extruida con LDPE y película extruida con aditivos oxobiodegradables.

Tabla XVI. **Comparativo de las propiedades físico-mecánicas de cada película extruida con las diferentes resinas**

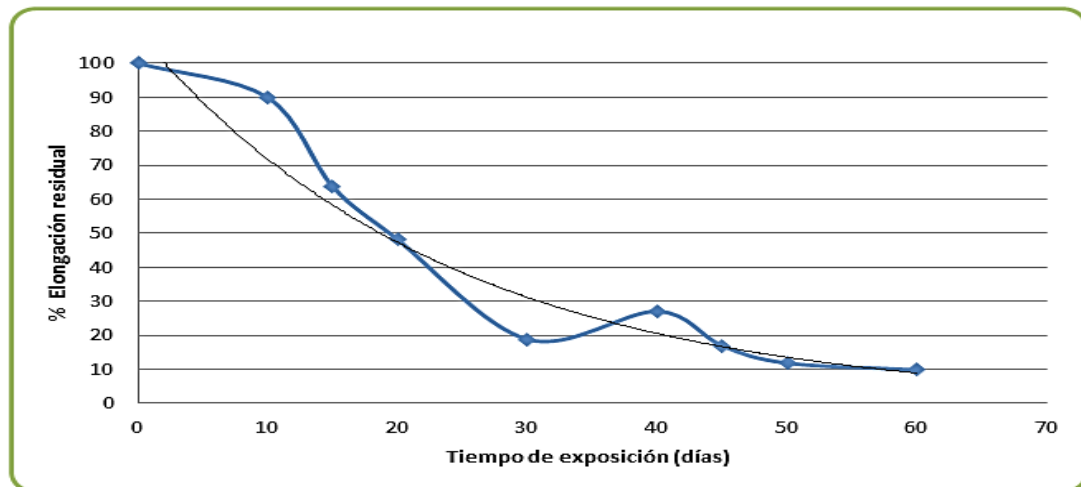
Muestra	Calibre (mils de pulgada)	Sentido	Resistencia en cedencia (lbf/plg ²)	Resistencia en rotura (lbf/plg ²)	Elongación a rotura (%)	Resistencia al rasgado (gf)	Módulo de Young (lbf/plg ²)
Película con resina A	0,85	MD	1 225,3	2 652,55	328,31	159,18	3 7210,59
		CD	1 261,48	2 563,89	600,04	166,44	29 878,28
Película con resina B	2,0	MD	2 078,16	1 480,84	541,34	142,52	100 053,9
		CD	1 434,78	1 796,25	123,00	848,52	79 486,06
Película con resina C	2,0	MD	1 458,26	3 459,49	684,18	119,18	31 969,11
		CD	1 049,80	1 131,30	49,90	846,52	54 488,75
Película con aditivos oxo	2,0	MD	1 958,56	6 722,28	699,71	300,24	35 666,69
		CD	1 630,73	5 044,10	1 073,66	602,00	4 478,25
Película con LDPE	0,85	MD	1 454,89	6 788,19	551,16	59,48	29 862,31
		CD	1 726,94	4 812,46	885,22	535,64	69 624,7

Fuente: elaboración propia.

4.6. Porcentaje de degradabilidad de la película extruida con la resina biodegradable tipo A en función del tiempo de exposición

En la figura 23 se muestra el comportamiento del porcentaje de elongación residual correspondiente a la película extruida con la resina A durante 60 días de exposición.

Figura 23. **Degradación película extruida con resina A**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Modelo matemático de la figura 23**

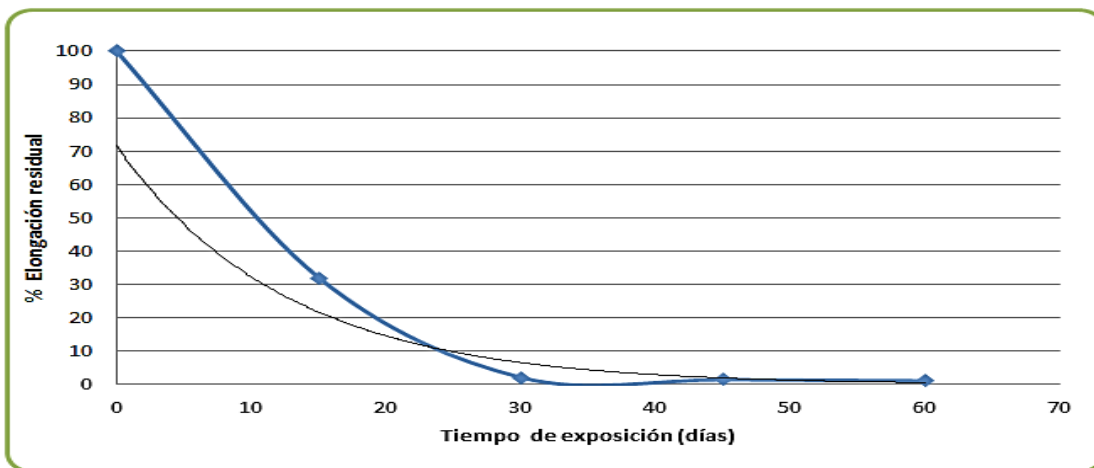
Curva	Modelo matemático	Coefficiente de correlación	Intervalo de validez (días)
	% Elong. Residual = $109,1e^{-0,042 t}$	0,9303	[0,60]

Fuente: elaboración propia.

4.7. Porcentaje de degradabilidad de la película extruida con la resina biodegradable tipo B en función del tiempo de exposición

En la figura 24 se muestra el comportamiento del porcentaje de elongación residual correspondiente a la película extruida con la resina B durante 60 días de exposición.

Figura 24. Degradación película extruida con resina B



Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. Modelo matemático de la figura 24

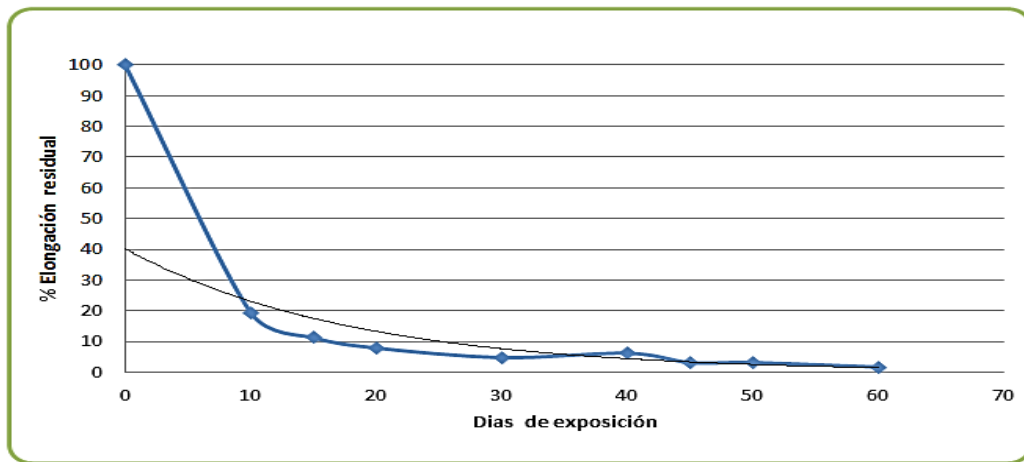
Curva	Modelo matemático	Coefficiente de correlación	Intervalo de validez (días)
	% Elong. Residual = $71,624 e^{-0,079t}$	0,8754	[0,60]

Fuente: elaboración propia.

4.8. Porcentaje de degradabilidad de la película extruida con la resina biodegradable tipo C en función del tiempo de exposición

En la figura 25 se muestra el comportamiento del porcentaje de elongación residual correspondiente a la película extruida con la resina C durante 60 días de exposición.

Figura 25. Degradación película extruida con resina C



Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. Modelo matemático de la figura 25

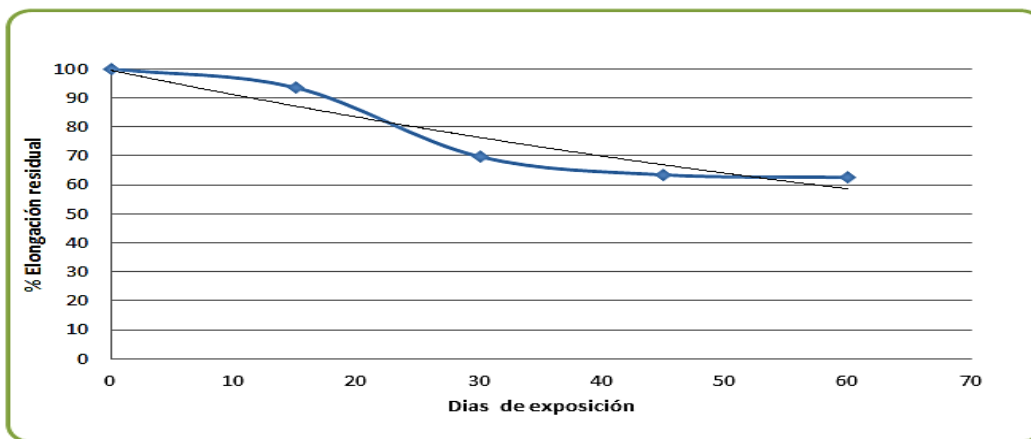
Curva	Modelo matemático	Coefficiente de correlación	Intervalo de validez (días)
	% Elong. Residual = $40,237 e^{-0,055 t}$	0,8517	[0,60]

Fuente: elaboración propia.

4.9. Porcentaje de degradabilidad de la película extruida con aditivos oxobiodegradables en función del tiempo de exposición

En la figura 26 se muestra el comportamiento del porcentaje de elongación residual correspondiente a la película extruida con aditivos oxobiodegradables durante 60 días de exposición.

Figura 26. **Degradación película extruida con aditivos oxobiodegradables**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Modelo matemático de la figura 26**

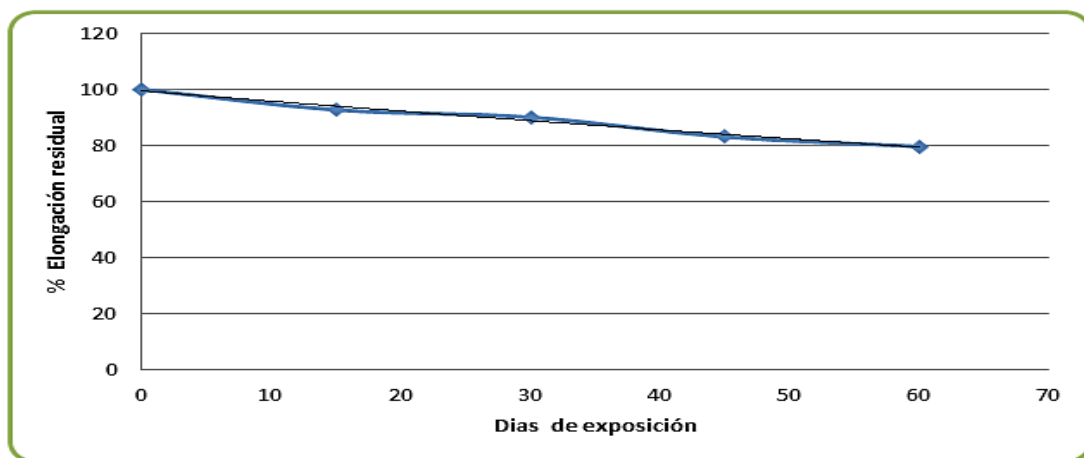
Curva	Modelo matemático	Coefficiente de correlación	Intervalo de validez (días)
	% Elong. Residual = $99,52 e^{-0,009 t}$	0,896	[0,60]

Fuente: elaboración propia.

4.10. Porcentaje de degradabilidad de la película extruida con polietileno de baja densidad en función del tiempo de exposición

En la figura 27 se muestra el comportamiento del porcentaje de elongación residual correspondiente a la película extruida con LDPE durante 60 días de exposición.

Figura 27. **Degradación película extruida con LDPE**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Modelo matemático de la figura 27**

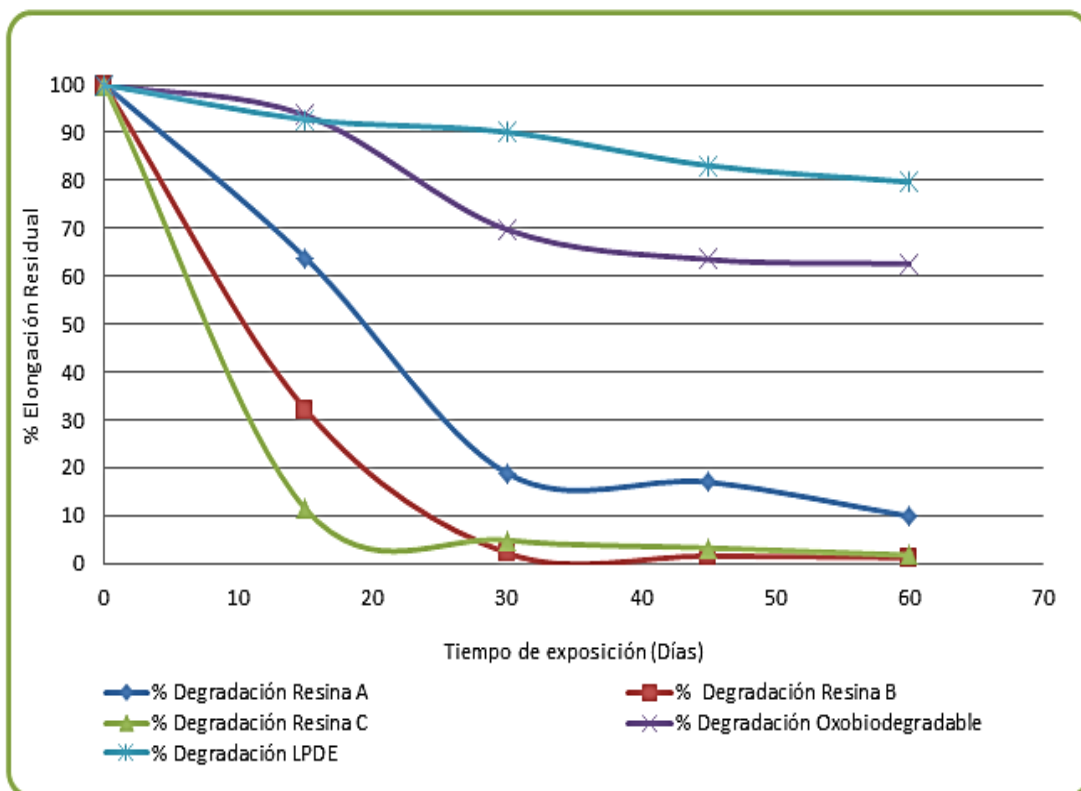
Curva	Modelo matemático	Coefficiente de correlación	Intervalo de validez (días)
	% Elong. Residual = $99,44 e^{-0,004 t}$	0,9835	[0,60]

Fuente: elaboración propia.

4.11. Comparativo del porcentaje de degradabilidad de las películas extruidas con las tres resinas biodegradables, respecto a la película extruida con polietileno de baja densidad y película oxobiodegradable en función del tiempo de exposición

En la figura 28 se muestra los valores de cada propiedad físico-mecánica de cada película extruida con las tres resinas biodegradables, película extruida con LDPE y película extruida con aditivos oxobiodegradables.

Figura 28. Comparativo en porcentaje de degradabilidad de cada película extruida con las diferentes materias primas



Fuente: elaboración propia.

4.12. Comparativo del módulo de Young inicial y final de las películas extruidas con las tres resinas biodegradables, respecto a la película extruida con polietileno de baja densidad y película oxobiodegradable en función del tiempo de exposición

En la tabla XXII se muestran los datos del módulo de Young inicial y final correspondiente a cada película extruida con las diferentes resinas.

Tabla XXII. Comparativo módulo de Young de cada película extruida con las diferentes resinas en función del tiempo de exposición

Días de exposición	Módulo de Young Resina A	Módulo de Young Resina B	Módulo de Young Resina C	Módulo de Young Resina Oxobiodegradable	Módulo de Young Resina LDPE
0	37 210,59	100 053,90	31 969,11	31 969,11	29 862,31
60	51 776,78	173 644,35	39 594,21	76 372,23	32 983,27

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Se evaluaron las propiedades físico-mecánicas de tres resinas biodegradables para la sustitución del polietileno de baja densidad, en la fabricación de películas flexibles para empaque automático.

Se realizaron las pruebas de resistencia a cedencia, resistencia a rotura y elongación a rotura bajo método ASTM D-882-83, resistencia al rasgado según método ASTM D-1922-05, coeficiente de fricción según método ASTM D-1894-93. Los resultados obtenidos en cada uno de los métodos anteriormente descritos, corresponden a los parámetros iniciales de esta investigación.

Para observar la degradabilidad de las películas y para evaluar el porcentaje de elongación residual correspondiente a cada una, se determinó un rango de tiempo establecido en días, con el fin de analizar el comportamiento de degradabilidad de cada película expuesta a intemperie en una estructura metálica, con el fin de exponerlas a condiciones medioambientales. Estas mediciones únicamente fueron realizadas en sentido máquina (MD).

En la tabla XIII, se puede observar el balance de masa general correspondiente al proceso de extrusión de las resinas biodegradables. Para poder desarrollar dicho balance se tomó en cuenta el concepto de conservación de la masa, al mismo tiempo por la pureza de las resinas biodegradables fue inherente tomar en cuenta la acumulación dentro del extrusor, por lo tanto, se tomó como ecuación general: $\text{entrada} = \text{salida} + \text{acumulación}$. Al tomar en un

99 % de pureza del material, se obtuvo una retención por acumulación del material de 1,53 kg/h debido a la impureza de estas resinas.

Estas impurezas retenidas, también afectan al producto final, provocando mala apariencia en el material, en donde se pueden observar grumos, geles y ralladuras en el material. Este tipo de defectos ópticos se observaron en algunos tramos de las resinas extruidas, pero su presencia no afecta significativamente en las propiedades físicomecánicas de cada película extruida.

En el balance de energía se determina la cantidad de calor necesaria para la fundición y mezcla de la materia prima en el proceso de extrusión. El desarrollo de los cálculos para dicho balance, determina que son necesarios 714,5 kJ de calor/kg de resina. Este calor debe ser suministrado específicamente por las resistencias de cada extrusor.

En la tabla XIV, se muestran los resultados de los coeficientes de fricción estáticos y dinámicos obtenidos con la prueba ASTM D1894-93. Se puede observar que para las películas extruidas con las resina A y B se obtuvo el mismo valor de coeficiente estático y dinámico, con valores de 0,37 para la resina A y 0,24 para la resina B. A diferencia de la resina C, esta obtuvo un valor de 0,26 para el coeficiente estático y 0,24 para el coeficiente dinámico, por lo que la resina C presenta un mejor deslizamiento que las resinas A y B.

La tabla XV, muestra los valores de fuerza de selle correspondientes a cada película extruida con las diferentes resinas biodegradables, para ello se estableció una ventana de sellado desde 105 °C hasta 140 °C a 60 psi, variando la temperatura en intervalos de 5 °C. La fuerza de selle se determinó en el equipo universal de ensayos con una celda de 250 N. La temperatura

mínima a la cual la resina A comenzó a sellar en sentido dorso–dorso es de 135 °C con una fuerza de selle de 1,67N. Para la resina B, no se obtuvo fuerza de selle en ninguna temperatura establecida en la ventana de sellado, este comportamiento se debe a que esta película presentaba desprendimiento de capas, lo cual influyó en la determinación de la fuerza de selle. La resina C comenzó a sellar a los 110 °C en sentido dorso-dorso con una fuerza mínima de 1,23 N.

Para definir una resina como sustituto en el proceso de extrusión, es necesario que las propiedades físicomecánicas se asemejen en sentido MD como en sentido CD. En la tabla XVI, se detallan las propiedades físicomecánicas de todas las películas extruidas. Siendo comparadas según el objetivo principal de esta investigación.

- Para la resistencia a cedencia de las películas extruidas con las diferentes resinas biodegradables y la película extruida con el LDPE, se observó que la resina B tiene mayor ventaja sobre esta propiedad mecánica que las películas extruidas con las resinas A y C, la cual obtuvo un valor en MD de 2 078,16 lbf/plg², el cual es 1,43 veces mayor que la del LDPE, y un valor en CD de 1 434,78 lbf/plg², el cual es ligeramente menor en un 17 % que la del LDPE.
- Para la propiedad de resistencia a rotura se observó que ninguna de las tres películas extruidas con las diferentes resinas biodegradables se asemeja a los valores correspondientes del LDPE. Para la película con resina A, se obtuvo una variación de 61 % en sentido MD y un 46,7 % en sentido CD; para la película con resina B se obtuvo una variación de 78,2 % en sentido MD y 62,7 % en sentido CD; para la película con

resina C se obtuvo una variación de 49,04 % en sentido MD y 76,5 % en sentido CD.

- En las mediciones obtenidas del porcentaje de elongación a rotura se observó que las películas extruidas con las resinas B y C, obtuvieron valores ligeramente mayores o similares al porcentaje de elongación del LDPE en sentido MD, en donde la película con resina B es ligeramente menor en un 1,8 %, mientras que la película con resina C es 1,24 veces mayor que la del LDPE, lo cual determina un mejor desempeño en elongación para la película extruida con resina C en sentido MD.
- A diferencia de los valores obtenidos de porcentajes de elongación en sentido CD correspondientes a las tres películas extruidas A, B y C, ninguna se asemeja con los valores obtenidos para el LDPE, obteniendo variaciones de 32,2 % para A, 86,1 % para B y 99,9 % para C, ya que se obtuvieron valores por debajo de lo esperado, con las variaciones porcentuales descritas anteriormente.
- Al comparar la resistencia al rasgado con las películas extruidas con las diferentes resinas biodegradables y la película extruida con el LDPE, se observó que las películas con resinas B y C tienen mayor ventaja sobre esta propiedad mecánica que la película extruida con la resina A; en donde se obtuvo un valor en MD de 142,52 gf para B y 119,18 gf para C, el cual es 1,43 veces mayor que la del LDPE, en sentido CD, se obtuvo un valor de 848,52 gf para B y 846,52 gf para C.
- Al comparar el módulo de Young, se observó que la película extruida con resina B, obtuvo valores muy altos comparados con los del LDPE, con un valor de 100 053,90 lbf/plg² en sentido MD y 79 486,06 lbf/plg², lo

cual indica que está película es más rígida y resistente al alargamiento respecto a la película extruida con LDPE.

Para determinar la degradación en las tres películas extruidas con las diferentes resinas biodegradables, se procedió a tomar mediciones en un intervalo de tiempo. Estas mediciones fueron realizadas en el equipo universal de ensayos, en el cual se determinó el porcentaje de elongación a rotura correspondiente a cada intervalo de tiempo. Estas mediciones fueron utilizadas para determinar el porcentaje de elongación residual en cada película extruida con el fin de obtener la degradabilidad de cada una de ellas.

- En la figura 23, se puede observar el comportamiento de la degradabilidad de la película extruida con la resina A, en la cual se obtuvo un 9,85 % de elongación residual a los 60 días de exposición, lo cual corresponde a un 90,15 % de degradación de la película.
- El comportamiento de la degradabilidad de la película extruida con la resina B se puede observar en la figura 24, para la cual se obtuvo 98,82 % de degradación de la película, correspondientes al 1,18 % de elongación residual a los 60 días de exposición.
- La figura 25, se puede observar el comportamiento de la degradabilidad de la película extruida con la resina C, la cual obtuvo 1,7 % de elongación residual a los 60 días de exposición, correspondiente a un 98,3 % de degradabilidad de la película extruida.
- El comportamiento de la degradabilidad de la película extruida con aditivos oxobiodegradables se puede observar en la figura 26, en la cual

se determinó un 37,39 % de degradabilidad a los 60 días de exposición, correspondiente a un 62,61 % de elongación residual en dicha película.

- La figura 27 simula el comportamiento de degradabilidad correspondiente al LDPE a los 60 días de exposición, en el cual se determinó un 20,32 % de degradabilidad de la película extruida con este material.
- La figura 28 permite visualizar un comparativo de los porcentajes de degradabilidad de cada película extruida con resina biodegradable expuestas durante 60 días, en donde se observa que dichas películas alcanzan valores de degradabilidad de 90,15 % para A, 98,8 % para B y 98,3 % para C, mientras que para la película extruida con aditivos oxobiodegradables se obtuvo un porcentaje de degradabilidad del 37,4 % y para la película extruida con LDPE fue de 20,32 %.
- En la tabla XXII, se puede observar la variación del módulo de Young correspondiente a cada película extruida con las diferentes resinas, en donde se determina un aumento correspondiente a cada película de: 139,14 % para la película con resina A, 173,55 % película con resina B, 123,85 % película con resina C, 238,89 % película con aditivos oxobiodegradables y 110,45 % película con LDPE. Este aumento en el módulo de Young determina la pérdida de elasticidad en cada película extruida conforme el tiempo de exposición, y el aumento de la rigidez de cada película extruida con las diferentes resinas respecto a las condiciones medioambientales.

CONCLUSIONES

1. De acuerdo al balance de masa establecido en el proceso de extrusión, la acumulación de material es de 1,53 kg/h para un flujo de alimentación de 153 kg/h.
2. De acuerdo al balance de energía establecido en el proceso de extrusión, el calor necesario para fundir y mezclar las resinas biodegradables es de 714,5 kJ/kg de resina.
3. El coeficiente de fricción estático y dinámico obtenido para la película extruida con la resina biodegradable "A" fue de 0,37.
4. El coeficiente de fricción estático y dinámico obtenido para la película extruida con la resina biodegradable "B" fue de 0,24.
5. Para la película extruida con la resina biodegradable "C" los coeficientes fueron diferentes, se obtuvo 0,26 para el coeficiente estático y 0,24 para el coeficiente dinámico.
6. La fuerza de selle obtenida para la película extruida con la resina biodegradable "A" fue de 1,67 N a 135 °C.
7. Para la película extruida con la resina biodegradable B no se obtuvo fuerza de selle debido al desprendimiento de capas que observó al realizar la medición.

8. La fuerza de selle obtenida para la película extruida con la resina biodegradable "C" fue de 1,23 N a 110 °C, presentando esta una amplia ventana de sellado en comparación a las resinas A y B.
9. Las propiedades físicomecánicas obtenidas de las tres películas extruidas utilizando resinas biodegradables A, B y C, presentan diferencias significativas en cuanto a resistencia a cedencia, rotura, rasgado, porcentaje de elongación y módulo de Young respecto a las propiedades físicomecánicas de la película extruida de LDPE.
10. Las propiedades físicomecánicas obtenidas de las tres películas extruidas utilizando resinas biodegradables A, B y C, presentan diferencias significativas en cuanto a resistencia a cedencia, rotura, rasgado, porcentaje de elongación y módulo de Young respecto a las propiedades físicomecánicas de la película extruida con aditivos oxobiodegradables.
11. El porcentaje de degradabilidad para las películas extruidas con las resinas biodegradables A, B y C es inversamente proporcional al tiempo de exposición.
12. Los porcentajes de degradabilidad de cada película extruida expuesta durante 60 días, fueron de: 90,15 % para A, 98,8 % para B y 98,3 % para C, 37,4 % para la película extruida con aditivos oxobiodegradables y película extruida con LDPE fue de 20,32 %.

RECOMENDACIONES

1. Fabricar una estructura metálica que permita exponer los materiales en un solo ángulo de contacto respecto a la luz solar, con el fin de evitar alteraciones en la medición de degradabilidad, debido a la posición del Sol a diferentes horas del día.
2. Realizar ensayos de las películas extruidas utilizando resinas biodegradables para las aplicaciones agrícolas como acolchados y en empaques secundarios (reempaques) para alimentos y artículos de uso común, debido que para estos usos, las propiedades físicomecánicas tienden a valores bajos respecto a las películas utilizadas para aplicaciones de empaque primario automático.
3. Realizar ensayos de degradabilidad enterrando las películas extruidas en el suelo, con el fin de determinar la incidencia de éste en la degradación de las películas extruidas con las resinas biodegradables.
4. Realizar ensayos de compostaje de las películas extruidas con resinas biodegradables que permitan confirmar la biodegradación de dichos materiales plásticos.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALARCÓN SALAS, Xavier Alberto. *Estudio de la relación entre las estructura, procesamiento, propiedades mecánicas y transferencia de vapor de agua en películas multicapa de polietileno utilizadas en empaques alimenticios*. Trabajo de graduación. Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la producción, 2005. 191 p.
2. BILLMEYER, Fred. *Ciencia de los polímeros*. España: Reverté, 1975. 610 p.
3. BLANCA GALLUR, Miriam. *Presente y futuro de los biopolímeros como material de envase*. Barcelona: Instituto Tecnológico del embalaje, transporte y logística, 2010. [en línea]. <<http://www.easyfairs.com/fileadmin/groups/10/MIRIAM%20GALLUR.pdf>>. [Consulta: 15 de enero de 2013].
4. CHANG, R. *Química*. 11a ed México: McGraw-Hill, 2013. 1085 p.
5. DÍAZ SERRANO, Teresa; et al. *Los filmes plásticos en la producción agrícola*. España: Repsol YPF- Mundi Prensa, 2011. 320 p.
6. GROOVER, Mikell. *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. México: Pearson Prentice Hall, 1997. 1053 p.

7. KERN, Donald Q. *Procesos de transferencia de calor*. México: Continental, 1999. 980 p.
8. MERE MARCOS, Javier. *Estudio del procesado de un polímero termoplástico basado en almidón de patata amigable con el medio ambiente*. Tesis de grado. Universidad Carlos III de Madrid, Facultad de Ingeniería, 2009. 176 p.
9. POZUELO DE DIEGO, Javier. *Materiales metálicos, cerámicos y polímeros*. [en línea]. <<http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/quimica-de-lomateriales/Material-de-clase/tema-6.-materiales-metalicos-ceramicos-y-polimeros-iii>>. [Consulta: 15 de enero de 2013].
10. QUINTANA PANCAAY, Jorge Luis. *Análisis y diseño de empaques flexibles laminados para envasar alimentos*. Tesis de grado. Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la producción, 2007. 249 p.
11. RAMOS DEL VALLE, Luis Francisco. *Extrusión de plásticos: principios básicos*. México: Limusa, 1994. 188 p.
12. SORDO REBOLLO, Laura. *Proceso de fabricación de un masterbatch biodegradable*. Tesis de grado. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, Escuela Universitaria de Ingeniería técnica industrial, 2014. 108 p.
13. *Tecnología de los plásticos*. [en línea]. <<http://teconologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/04/extrusion-de-pelicula-soplada.html>>. [Consulta: 15 de enero de 2013].

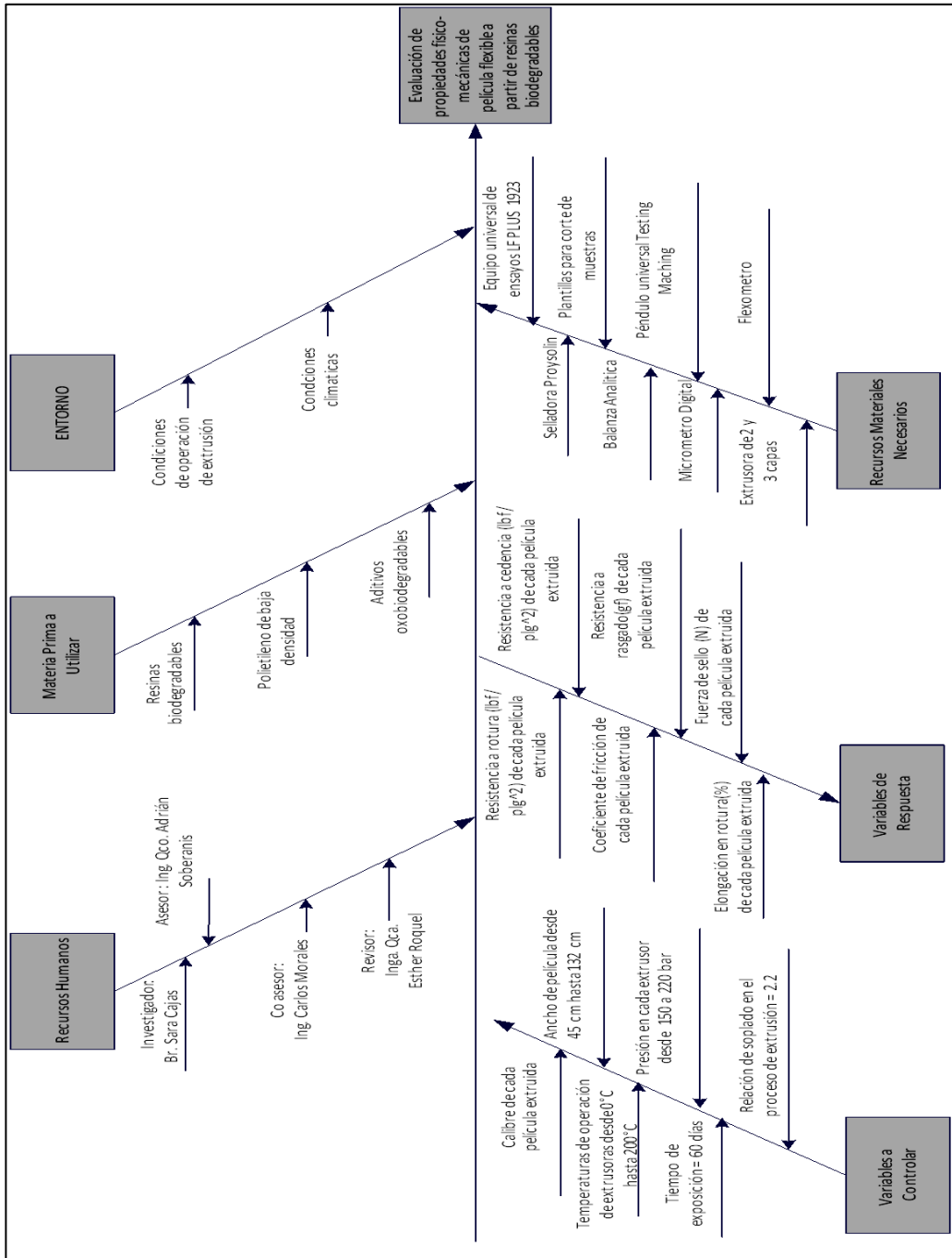
APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**

Área de Estudio	Cursos	Temas Particulares
Área de Química	Química 3 Química 4 Análisis Cuantitativo Química orgánica 1 Química orgánica 2	Nomenclatura química Propiedades de la materia Mezclas Estequiometría Disoluciones Métodos analíticos Compuestos orgánicos Polímeros
Área de Operaciones Unitarias	Balance de Masa y Energía Flujo de fluidos Transferencia de calor Transferencia de masa Transferencia de masa en unidades continuas	Balance de masa y energía en los equipos de producción. Perdidas de energía por calor Transferencia de calor por conducción, convección y radiación Transferencia de masa
Área de Operaciones complementarias	Operaciones unitarias complementarias Procesos Químicos Industriales	Manejo de sólidos Transporte de sólidos Mezcladores Proceso Estudio de capacidad Sistemas de calidad
Área de Fisicoquímica	Fisicoquímica	Propiedades fisicoquímicas
Área de ciencias básicas	Matemática Estadística	Desviación lineal Medidas de tendencia central

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Datos calculados**

Tabla 3.1. **Coeficiente de fricción estático y dinámico obtenido para cada corrida correspondiente**

Tipo de Resina	Número de corrida	COF Estático Dorso-Dorso	COF Dinámico
Resina A	1	0,374	0,363
	2	0,375	0,364
	3	0,383	0,384
	4	0,369	0,363
	5	0,371	0,360
	Promedio	0,375	0,367
Resina B	1	0,261	0,260
	2	0,238	0,235
	3	0,224	0,231
	4	0,257	0,245
	5	0,229	0,234
	Promedio	0,242	0,241
Resina C	1	0,271	0,258
	2	0,267	0,247
	3	0,242	0,202
	4	0,251	0,239
	5	0,263	0,241
	Promedio	0,259	0,237

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.2. **Ventana de sellado para la película extruida con resina A**

	TEMPERATURA (°C)	CARGA MÁXIMA (N)
RESINA A	105	0
	110	0
	115	0
	120	0
	125	0
	130	0
	135	1,66

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.3. **Ventana de sellado para la película extruida con resina B**

	TEMPERATURA (°C)	CARGA MÁXIMA (N)
RESINA B	105	0
	110	0
	115	0
	120	0
	125	0
	130	0
	135	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.4. **Ventana de sellado para la película extruida con resina C**

	TEMPERATURA (°C)	CARGA MÁXIMA (N)
RESINA C	105	0
	110	1,23
	115	5,21
	120	6,56
	125	4,47
	130	6,14
	135	6,94
	140	5,20

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.5. **Fuerza y temperatura de selle para las películas extruidas con las resinas A, B y C**

Tipo	Temperatura de inicio de selle (°C)	Fuerza de selle (N)	Lado versus lado
Resina A	135	1,67	Dorso-Dorso
Resina B	135	0,00	
Resina C	110	1,23	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.6. **Compilado de las propiedades físicomecánicas en sentido MD de las películas extruidas con las resinas A, B y C**

Tipo de Resina	CORRIDA	Sentido	Resistencia en cedencia (lbf/plg ²)	Resistencia en rotura (lbf/plg ²)	Módulo de Young (lbf/iplg)	Elongación a rotura (%)	Resistencia al rasgado
Película con resina A	1	MD	1 213,98	2 227,74	37 754,19	349,98	176,10
	2	MD	1 112,37	2 581,44	31 237,85	312,84	149,90
	3	MD	1 284,66	3 041,52	42 632,68	340,62	137,80
	4	MD	1 308,01	2 994,99	47 207,05	331,65	164,00
	5	MD	1 207,83	2 417,04	27 221,17	306,45	168,10
	Promedio	MD	1 225,37	2 652,55	37 210,59	328,31	159,18
Película con resina B	1	MD	2 218,54	1 498,72	101 687,61	585,85	121,40
	2	MD	2 052,33	1 499,96	65 993,20	520,77	160,00
	3	MD	2 037,59	1 501,38	111 228,47	524,69	160,00
	4	MD	2 042,18	1 426,92	110 792,31	551,96	133,70
	5	MD	2 040,15	1 477,25	110 567,88	523,41	137,50
	Promedio	MD	2 078,16	1 480,84	100 053,90	541,34	142,52
Película con resina C	1	MD	1 618,64	4 010,98	19 678,22	721,21	127,00
	2	MD	1 530,33	2 801,94	66 086,54	745,34	125,00
	3	MD	1 091,42	3 100,90	13 057,10	721,72	118,10
	4	MD	1 601,73	3 822,89	35 143,64	597,00	103,70
	5	MD	1 449,16	3 560,76	25 880,03	635,62	122,10
	Promedio	MD	1 458,26	3 459,49	31 969,11	684,18	119,18

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.7. **Compilado de las propiedades físicomecánicas en sentido MD de las películas extruidas con aditivos oxobiodegradables y resina LDPE**

Tipo de resina	CORRIDA	Sentido	Resistencia en cedencia (lbf/plg ²)	Resistencia en rotura (lbf/plg ²)	Módulo de Young (lbf/plg ²)	Elongación a rotura (%)	Resistencia al rasgado
Película con aditivos oxobiodegradables	1	MD	1 952,86	6 726,41	32 392,16	712,15	276,00
	2	MD	1 927,65	6 714,12	36 222,97	696,92	264,50
	3	MD	1 942,21	6 542,16	33 704,36	693,58	256,70
	4	MD	1 995,45	6 861,24	39 335,77	704,35	308,00
	5	MD	1 974,64	6 767,49	36 678,19	691,53	396,00
	Promedio	MD	1 958,56	6 722,28	35 666,69	699,71	300,24
Película con LDPE	1	MD	1 309,40	6 486,31	27 492,89	571,47	64,00
	2	MD	1 549,31	7 158,98	30 609,66	557,68	56,20
	3	MD	1 419,44	6 981,50	30 585,61	549,20	49,80
	4	MD	1 529,33	6 372,05	29 403,75	541,99	61,00
	5	MD	1 466,97	6 942,11	31 219,67	535,47	66,40
	Promedio	MD	1 454,89	6 788,19	29 862,31	551,16	59,48

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.8. **Compilado de las propiedades físico-mecánicas en sentido CD de las películas extruidas con las resinas A, B y C**

Tipo de resina	CORRIDA	Sentido	Resistencia en cedencia (lbf/plg ²)	Resistencia en rotura (lbf/plg ²)	Módulo de Young (lbf/plg ²)	Elongación a rotura (%)	Resistencia al rasgado
Película con Resina A	1	CD	1 351,75	2 850,04	34 035,04	622,54	180,10
	2	CD	1 269,68	2 499,79	23 525,07	613,02	168,10
	3	CD	1 224,20	2 615,01	32 360,81	615,03	160,00
	4	CD	1 220,51	2 215,21	26 650,37	531,04	151,90
	5	CD	1 241,27	2 639,40	32 820,11	618,58	172,10
	Promedio	CD	1 261,48	2 563,89	29 878,28	600,04	166,44
Película con Resina B	1	CD	1 479,72	1 768,74	81 747,78	232,37	873,40
	2	CD	1 552,82	1 861,09	83 248,70	138,20	763,00
	3	CD	1 104,33	1 831,28	75 672,94	104,46	881,80
	4	CD	1 511,38	1 749,15	74 639,86	91,95	839,90
	5	CD	1 525,66	1 771,00	82 121,01	48,02	884,50
	Promedio	CD	1 434,78	1 796,25	79 486,06	123,00	848,52
Película con Resina C	1	CD	1 163,57	1 244,82	28 744,93	66,09	878,60
	2	CD	903,92	1 006,67	42 900,44	60,16	889,70
	3	CD	1 055,52	1 119,82	78 559,70	55,08	766,70
	4	CD	1 182,69	1 229,65	50 293,02	40,25	810,70
	5	CD	943,33	1 055,56	71 945,66	27,93	886,90
	Promedio	CD	1 049,80	1 131,30	54 488,75	49,90	846,52

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.9. **Compilado de las propiedades físico-mecánicas en sentido CD de las películas extruidas con aditivos oxobiodegradables y resina LDPE**

Tipo de resina	CORRIDA	Sentido	Resistencia en cedencia (lbf/plg ²)	Resistencia en rotura (lbf/plg ²)	Módulo de Young (lbf/plg ²)	Elongación a rotura (%)	Resistencia al rasgado
Película con aditivos oxobiodegradables	1	CD	1 510,30	4 815,40	39 626,95	1 082,34	590,00
	2	CD	1 662,22	5 084,70	48 449,05	1 055,11	600,00
	3	CD	1 633,53	5 090,68	41 933,19	1 077,61	538,00
	4	CD	1 780,20	5 466,19	61 990,11	1 112,22	590,00
	5	CD	1 567,41	4 763,54	31 936,97	1 041,04	692,00
	Promedio	CD	1 630,73	5 044,10	44 787,25	1 073,66	602,00
Película con LDPE	1	CD	1 848,60	4 941,10	67 623,89	830,00	555,80
	2	CD	1 741,00	5 204,10	70 376,00	860,00	545,00
	3	CD	1 785,50	4 677,20	69 644,51	939,60	515,00
	4	CD	1 543,60	4 527,90	68 711,90	901,50	512,40
	5	CD	1 716,00	4 712,00	71 767,22	895,00	550,00
	Promedio	CD	1 726,94	4 812,46	69 624,70	885,22	535,64

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.10. **Porcentaje de elongación a rotura a diferentes intervalos de tiempo para las películas extruidas con resina A y C**

Tiempo de exposición (días)	Porcentaje de elongación a rotura película con resina A	Porcentaje de elongación a rotura película con resina C
0	349,98	721,21
0	312,84	745,34
0	340,62	721,72
0	331,65	597,00
0	306,45	635,62
PROMEDIO	328,31	684,18
10	340,24	153,83
10	287,05	107,92
10	298,70	118,01
10	286,65	161,44
10	263,23	123,46
PROMEDIO	295,17	132,93
15	191,80	60,31
15	221,03	81,77
15	221,03	75,04
15	195,07	90,08
15	218,05	79,44
PROMEDIO	209,40	77,33
20	191,76	51,25
20	107,74	63,10
20	165,66	68,94
20	130,56	42,24
20	195,07	45,42
PROMEDIO	158,16	54,19

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.11. **Porcentaje de elongación a rotura a diferentes intervalos de tiempo para las películas extruidas con resina B, aditivos oxobiodegradables y LDPE**

Tiempo de exposición (días)	Porcentaje de elongación a rotura película con resina B	Porcentaje de elongación a rotura película con aditivos oxobiodegradables	Porcentaje de Elongación a rotura película con LDPE
0	585,85	712,15	571,47
0	520,77	696,92	557,68
0	524,69	693,58	549,20
0	551,96	704,35	541,99
0	523,41	691,53	535,47
PROMEDIO	541,34	699,71	551,16
15	162,21	628,28	523,98
15	184,95	662,58	525,86
15	188,17	664,54	492,10
15	173,27	668,33	492,25
15	160,03	651,01	521,33
PROMEDIO	173,72	654,95	511,10
30	10,11	445,88	500,42
30	11,01	493,84	485,70
30	13,74	502,18	507,19
30	12,15	488,17	515,77
30	11,66	510,37	473,86
PROMEDIO	11,73	488,09	496,59
45	6,22	420,43	436,80
45	7,98	450,77	447,72
45	10,08	460,91	485,20
45	9,57	445,88	474,85
45	7,34	443,23	445,93
PROMEDIO	8,24	444,24	458,10
60	5,96	512,28	447,19
60	8,31	418,34	420,25
60	5,24	439,32	424,24
60	6,72	407,83	434,54
60	5,83	412,53	469,71
PROMEDIO	6,41	438,06	439,19

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.12. **Porcentaje de elongación a rotura, porcentaje de degradación y elongación residual a diferentes intervalos de tiempo para las películas extruidas con resina A**

Días expuestos	Porcentaje de elongación en rotura	Porcentaje de degradación	Elongación residual
0	328,31	0	100
10	295,17	10,09	89,91
15	209,40	36,22	63,78
20	158,16	51,83	48,17
30	61,80	81,18	18,82
40	88,84	72,94	27,06
45	55,70	83,03	16,97
50	38,99	88,12	11,88
60	32,33	90,15	9,85

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.13. **Porcentaje de elongación a rotura, porcentaje de degradación y elongación residual a diferentes intervalos de tiempo para las películas extruidas con resina B**

Días expuestos	Porcentaje de elongación en rotura	Porcentaje de degradación	Elongación residual
0	541,34	0	100
15	173,72	67,91	32,09
30	11,73	97,83	2,17
45	8,24	98,48	1,52
60	6,41	98,82	1,18

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.14. **Porcentaje de elongación a rotura, porcentaje de degradación y elongación residual a diferentes intervalos de tiempo para las películas extruidas con resina C**

Días expuestos	Porcentaje de elongación en rotura	Porcentaje de degradación	Elongación residual
0	684,18	0	100
10	132,93	80,57	19,43
15	77,33	88,70	11,30
20	54,19	92,08	7,92
30	32,90	95,19	4,81
40	42,54	93,78	6,22
45	21,87	96,80	3,20
50	21,62	96,84	3,16
60	11,65	98,30	1,70

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.15. **Porcentaje de elongación a rotura, porcentaje de degradación y elongación residual a diferentes intervalos de tiempo para las películas extruidas con aditivos oxobiodegradables**

Días expuestos	Porcentaje de elongación en rotura	Porcentaje de degradación	Elongación residual
0	699,71	0	100
15	654,95	6,40	93,60
30	488,09	30,24	69,76
45	444,24	36,51	63,49
60	438,06	37,39	62,61

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.16. **Porcentaje de elongación a rotura, porcentaje de degradación y elongación residual a diferentes intervalos de tiempo para las películas extruidas con LDPE**

Días expuestos	Porcentaje de elongación en rotura	Porcentaje de degradación	Elongación residual
0	551,16	0	100
15	511,10	7,27	92,73
30	496,59	9,90	90,10
45	458,10	16,88	83,12
60	439,19	20,32	79,68

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.17. **Comparativo en porcentaje de degradación para las películas extruidas con resina A, B, C, aditivos oxobiodegradables y LDPE respecto al tiempo de exposición**

Días expuestos	Porcentaje de degradación				
	Resina A	Resina B	Resina C	Oxo-biodegradable	LDPE
0	100	100	100	100	100
15	63,78	32,09	11,30	93,60	92,73
30	18,82	2,17	4,81	69,76	90,10
45	16,97	1,52	3,20	63,49	83,12
60	9,85	1,18	1,70	62,61	79,68

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.18. **Comparativo módulo de Young para las películas extruidas con resina A, B, C, aditivos oxobiodegradables y LDPE respecto al tiempo de exposición**

Días expuestos	Módulo de Young				
	Resina A	Resina B	Resina C	Oxo-biodegradable	LDPE
0	37 210,59	100 053,90	31 969,11	31,969,11	29 862,31
60	51 776,78	173 644,35	39,594,21	76,372,23	32 983,27

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.19. **Datos obtenidos del análisis estadístico anova para las propiedades físico-mecánicas de la película extruida con resina A comparada con la película extruida con LDPE**

Sentido	Distribución F	Crítico para F	VARIANZAS				
			Resistencia a cedencia (lbf/plg ²)	Resistencia a rotura (lbf/plg ²)	Módulo de Young (lbf/plg ²)	Elongación a rotura (%)	Resistencia al rasgado (gf)
CD	324,66	2,61	67 275,49	1 459 486,00	449 146 190,00	24 036,03	38 101,36
MD	6,33	2,61	21 363,95	4 859 030,00	45 425 254,95	14 033,24	2 884,18

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.20. **Datos obtenidos del análisis estadístico anova para las propiedades físico-mecánicas de la película extruida con resina B comparada con la película extruida con LDPE**

			VARIANZAS				
Sentido	Distribución F	Crítico para F	Resistencia a cedencia (lbf/plg ²)	Resistencia a rotura (lbf/plg ²)	Módulo de Young (lbf/plg ²)	Elongación a rotura (%)	Resistencia al rasgado (gf)
CD	33,33	2,61	44 981,13	2 559 121,96	35 026 984,20	164 285,90	28 534,47
MD	67,23	2,61	114,771,83	7 876 295,33	1 537 713 558,00	460,67	2 063,82

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.21. **Datos obtenidos del análisis estadístico anova para las propiedades físico-mecánicas de la película extruida con resina C comparada con la película extruida con LDPE**

			VARIANZAS				
Sentido	Distribución F	Crítico para F	Resistencia a cedencia (lbf/plg ²)	Resistencia a rotura (lbf/plg ²)	Módulo de Young (lbf/plg ²)	Elongación a rotura (%)	Resistencia al rasgado
CD	2,40	2,61	140 188,24	3 800 061,32	253 502 907	194 708,34	28 384,53
MD	0,22	2,61	24 800,67	3 241 198,99	193 303 176,1	6 833,37	1 047,74

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Imágenes

Imagen 1. **Extrusión por soplado de una película biodegradable**



Fuente: Technofilms, S. A., abril de 2014.

Imagen 2. **Materiales colocados en estructura metálica en exposición a condiciones mediambientales**



Fuente: Technofilms, S. A., abril de 2014.

ANEXOS

Anexo 1. Pruebas ASTM utilizadas para la obtención de las propiedades físico-mecánicas

PROPIEDAD	MÉTODO ASTM
Resistencia a cedencia	D-882-83
Resistencia a rotura	D-882-83
Elongación a rotura	D-882-83
Resistencia a rasgado	D-1922-05
Coefficiente de fricción	D1894-93

Fuente: Normas ASTM.

