



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

**EVALUACIÓN DE LA BIODEGRADABILIDAD DE DIFERENTES FORMULACIONES DE UN
BIOPLÁSTICO SINTETIZADO, A PARTIR DEL ALMIDÓN OBTENIDO DE LA CÁSCARA DE
MANGO (*Mangifera indica* L.) A ESCALA LABORATORIO**

Antonio Adolfo Villalta Estrada

Asesorado por la Inga. Cinthya Patricia Ortiz Quiroa

Guatemala, noviembre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA BIODEGRADABILIDAD DE DIFERENTES FORMULACIONES DE UN
BIOPLÁSTICO SINTETIZADO, A PARTIR DEL ALMIDÓN OBTENIDO DE LA CÁSCARA DE
MANGO (*Mangifera indica* L.) A ESCALA LABORATORIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ANTONIO ADOLFO VILLALTA ESTRADA

ASESORADO POR LA INGA. CINTHYA PATRICIA ORTIZ QUIROA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|--|
| DECANO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| VOCAL I | Ing. Angel Roberto Sic García |
| VOCAL II | Ing. Pablo Christian de León Rodríguez |
| VOCAL III | Ing. José Milton de León Bran |
| VOCAL IV | Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez |
| VOCAL V | Br. Carlos Enrique Gómez Donis |
| SECRETARIA | Inga. Lesbia Magalí Herrera López |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|-------------------------------------|
| DECANO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| EXAMINADOR | Ing. Carlos Salvador Wong Davi |
| EXAMINADOR | Ing. Pablo Enrique Morales Paniagua |
| EXAMINADOR | Ing. Jorge Mario Estrada Asturias |
| SECRETARIA | Inga. Lesbia Magalí Herrera López |

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 LA BIODEGRADABILIDAD DE DIFERENTES FORMULACIONES DE UN BIOPLÁSTICO SINTETIZADO, A PARTIR DEL ALMIDÓN OBTENIDO DE LA CÁSCARA DE MANGO (*Mangifera indica* L.) A ESCALA LABORATORIO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 19 de enero de 2018.

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized initials 'SAV' enclosed within a circular loop, with a horizontal line underneath.

Antonio Adolfo Villalta Estrada

Guatemala, 21 de septiembre 2018

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
Director Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

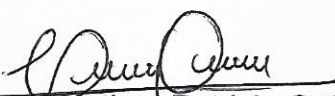
Estimado Ingeniero Wong:

Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y aprobado el informe final del trabajo de graduación titulado: **“EVALUACIÓN DE LA BIODEGRADABILIDAD DE DIFERENTES FORMULACIONES DE UN BIOPLÁSTICO SINTETIZADO, A PARTIR DEL ALMIDÓN OBTENIDO DE LA CÁSCARA DE MANGO (*Mangifera indica* L.) A ESCALA LABORATORIO”**, del estudiante de Ingeniería Química Antonio Adolfo Villalta Estrada, quien se identifica con carné estudiantil número 201404400 y DPI No.2774 49820 0101.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Atentamente.

Cinthy Patricia Ortiz Quiroa
Ingeniera Química Col. No. 1190


Inga. Qca. Cinthy Patricia Ortiz Quiroa
Colegiado No. 1190
Asesora



Guatemala, 08 de octubre de 2018.
 Ref. EIQR.TG-IF.047.2018.

Ingeniero
 Carlos Salvador Wong Davi
 DIRECTOR
 Escuela de Ingeniería Química
 Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQR-PRO-REG-007 correlativo **054-2017** 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
-Modalidad Seminario de Investigación-

Solicitado por el estudiante universitario: **Antonio Adolfo Villalta Estrada**.
 Identificado con el CUI: **2774 49820 0101**.
 Identificado con registro académico: **2014-04400**.
 Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

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 LA BIODEGRADABILIDAD DE DIFERENTES FORMULACIONES DE UN BIOPLÁSTICO SINTETIZADO, A PARTIR DEL ALMIDÓN OBTENIDO DE LA CÁSCARA DE MANGO (*Mangifera indica* L.) A ESCALA LABORATORIO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por la Ingeniera Química: **Cinthy Patricia Ortiz Quiroa**.

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"



Hilda Piedad Palma Ramos de Martini

Inga. Hilda Piedad Palma Ramos de Martini
 COORDINADORA DE TERNA
 Tribunal de Revisión
 Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.046.2018

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 del (la) estudiante, **ANTONIO ADOLFO VILLALTA ESTRADA** titulado: **“EVALUACIÓN DE LA BIODEGRADABILIDAD DE DIFERENTES FORMULACIONES DE UN BIOPLÁSTICO SINTETIZADO, A PARTIR DEL ALMIDÓN OBTENIDO DE LA CÁSCARA DE MANGO (*Mangifera indica* L.) A ESCALA LABORATORIO”**. 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. Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química

FACULTAD DE INGENIERIA USAC
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
DIRECTOR

Guatemala, noviembre de 2018

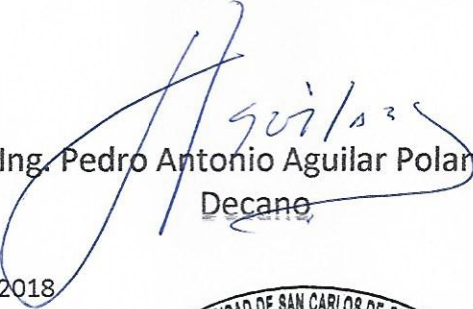
Cc: Archivo
CSWD/ale



DTG. 512.2018

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 LA BIODEGRADABILIDAD DE DIFERENTES FORMULACIONES DE UN BIOPLÁSTICO SINTETIZADO, A PARTIR DEL ALMIDÓN OBTENIDO DE LA CÁSCARA DE MANGO (Mangifera indica L.) A ESCALA LABORATORIO**, presentado por el estudiante universitario: **Antonio Adolfo Villalta Estrada**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, noviembre de 2018

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ayudarme en el transcurso de mi carrea universitaria y poder cumplir esta meta.
- Mis padres** Jose Antonio Villalta (q.e.p.d) y Lesvia Estrada, por su esfuerzo y apoyo; porque siempre creyeron en mí. Su amor siempre será mi inspiración.
- Mi hermano** Jose Ángel Villalta Estrada, por tu apoyo y confianza a lo largo de tu vida.
- Mi abuela** Olga Contreras, por todas sus enseñanzas y cariño.
- Mis padrinos** Carlos Esquivel y Mercedes de Esquivel, por sus consejos y por ser una importante influencia en mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

| | |
|---|---|
| Universidad de San Carlos de Guatemala | Por ser la institución que me brindó una educación integral y oportunidades de crecimiento personal. |
| Facultad de Ingeniería | Por ser el centro de enseñanza que fomentó en mí, responsabilidad, esfuerzo y dedicación. |
| Mis padres | Jose Antonio Villalta (q.e.p.d) y Lesvia Estrada, por el apoyo brindado durante mi desarrollo profesional. |
| Mi hermano | Jose Ángel Villalta, por tu ayuda y motivación. |
| Inga. Cinthya Patricia Ortiz Quiroa | Por el tiempo dedicado para culminar mi formación profesional y apoyo como asesora del trabajo de graduación. |
| Mis amigos | Álvaro Bollat, Carlos Esquivel y Pablo Morán, por su amistad y apoyo en todo momento, por compartir esta etapa conmigo. |
| Amigos de la “U” | Alejandro de León, Josué Fuentes, Juan Carlos Rojas, Juan Oliva, Karla Santa María, Michelle Izaguirre, Rony Vielman y Yuri Osorio, por su confianza y apoyo. |

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES..... | VII |
| LISTA DE SÍMBOLOS | IX |
| GLOSARIO | XI |
| RESUMEN..... | XIII |
| OBJETIVOS..... | XV |
| Hipótesis | XVII |
| INTRODUCCIÓN | XIX |
| | |
| 1. ANTECEDENTES | 1 |
| 1.1. Justificación | 4 |
| 1.2. Determinación del problema | 6 |
| 1.2.1. Definición..... | 7 |
| 1.2.2. Delimitación | 7 |
| | |
| 2. MARCO TEÓRICO | 9 |
| 2.1. Polímeros..... | 9 |
| 2.1.1. Polímeros naturales..... | 10 |
| 2.1.2. Polímeros sintéticos..... | 11 |
| 2.2. Propiedades de los polímeros | 11 |
| 2.2.1. Polímeros termofijos | 11 |
| 2.2.2. Polímeros termoplásticos | 12 |
| 2.2.3. Polímeros elastómeros | 12 |
| 2.3. Aditivos de un plástico | 13 |
| 2.4. Clasificación de los aditivos según su función | 14 |
| 2.4.1. Aditivos que facilitan el procesado..... | 14 |

| | | | |
|--------|----------|--|----|
| | 2.4.1.1. | Estabilizadores..... | 15 |
| | 2.4.1.2. | Lubricantes..... | 15 |
| 2.4.2. | | Aditivos modificadores de propiedades superficiales..... | 16 |
| | 2.4.2.1. | Antiestáticos..... | 17 |
| 2.4.3. | | Aditivos modificadores de propiedades ópticas | 17 |
| | 2.4.3.1. | Colorantes..... | 18 |
| 2.4.4. | | Aditivos modificadores de propiedades mecánicas..... | 18 |
| | 2.4.4.1. | Plastificantes | 18 |
| | 2.4.4.2. | Cargas..... | 19 |
| | 2.4.4.3. | Modificadores de impacto..... | 19 |
| 2.4.5. | | Otros | 20 |
| | 2.4.5.1. | Rellenos | 20 |
| | 2.4.5.2. | Agentes espumantes | 20 |
| 2.5. | | Propiedades de los plásticos..... | 21 |
| | 2.5.1. | Propiedades mecánicas | 21 |
| | 2.5.2. | Propiedades térmicas..... | 22 |
| | 2.5.3. | Propiedades eléctricas | 22 |
| | 2.5.4. | Propiedades químicas..... | 22 |
| 2.6. | | Bioplásticos | 23 |
| 2.7. | | Clasificación de los bioplásticos, según su proceso de síntesis | 23 |
| | 2.7.1. | Síntesis de bioplásticos por biomasa ... | 24 |
| | 2.7.2. | Síntesis química de bioplásticos | 24 |
| | 2.7.3. | Síntesis de bioplásticos por microorganismos | 24 |

| | | | |
|-------|---------|---|----|
| | 2.7.4. | Síntesis de bioplásticos por mezcla de polímeros biodegradables..... | 24 |
| 2.8. | | Almidón como materia prima de elaboración de bioplásticos..... | 25 |
| 2.9. | | Problemática ambiental | 27 |
| 2.10. | | Degradabilidad..... | 29 |
| 2.11. | | Mecanismo de biodegradabilidad | 29 |
| | 2.11.1. | Biodegradabilidad | 29 |
| | 2.11.2. | Compostabilidad | 29 |
| | 2.11.3. | Erodabilidad..... | 30 |
| | 2.11.4. | Hidrobiodegradación y fotobiodegradación | 30 |
| 2.12. | | Asociación Americana de Ensayo de Materiales | 30 |
| | 2.12.1. | Norma ASTM D 638-39 | 31 |
| | 2.12.2. | Norma ASTM D 2240-86 | 31 |
| 3. | | DISEÑO METODOLÓGICO | 33 |
| | 3.1. | Variables..... | 33 |
| | 3.2. | Delimitación del estudio..... | 34 |
| | 3.3. | Etapas de la investigación | 34 |
| | 3.4. | Recursos humanos..... | 34 |
| | 3.5. | Localización del desarrollo de la investigación | 34 |
| | 3.6. | Recursos materiales..... | 35 |
| | 3.6.1. | Equipo | 35 |
| | 3.6.2. | Cristalería | 35 |
| | 3.6.3. | Reactivos..... | 36 |
| | 3.7. | Técnica cuantitativa | 36 |
| | 3.8. | Obtención de materia prima..... | 37 |
| | 3.9. | Recolección y ordenamiento de información | 37 |

| | | |
|----------|---|----|
| 3.9.1. | Preparación de las formulaciones prototipo del bioplástico..... | 38 |
| 3.9.2. | Procedimiento experimental..... | 39 |
| 3.9.2.1. | Procedimiento experimental para la obtención de almidón de la cáscara de mango | 39 |
| 3.9.2.2. | Procedimiento para la elaboración de la formulación 1 del bioplástico | 40 |
| 3.9.2.3. | Procedimiento para la elaboración de la formulación 2 del bioplástico | 40 |
| 3.9.2.4. | Procedimiento para la elaboración de la formulación 3 del bioplástico | 41 |
| 3.9.2.5. | Procedimiento para la evaluación de biodegradabilidad del bioplástico: método de degradabilidad de intemperie | 43 |
| 3.9.2.6. | Procedimiento para la evaluación de biodegradabilidad del | |

| | | |
|-----------|---|----|
| | bioplástico: método de degradabilidad por agua | 43 |
| 3.9.2.7. | Procedimiento para la evaluación de la propiedad mecánica de tensión, según norma ASTM D 638-89 | 45 |
| 3.9.2.8. | Procedimiento para la evaluación de la propiedad mecánica de dureza, según norma ASTM D 2240-86 | 45 |
| 3.10. | Tabulación, ordenamiento y procesamiento de información | 46 |
| 3.10.1. | Tabulación de datos por número de formulación | 46 |
| 3.11. | Análisis estadístico | 48 |
| 3.11.1. | Medidas de tendencia central | 49 |
| 3.11.2. | Medidas de dispersión | 49 |
| 3.12. | Análisis de varianza | 50 |
| 3.13. | Prueba de Duncan | 52 |
| 3.14. | Plan de análisis de los datos | 53 |
| 3.14.1. | Métodos y modelos de los datos, según tipo de variables | 53 |
| 3.14.2. | Programas por utilizar | 53 |
| 3.14.2.1. | Microsoft Word 2016 | 54 |

| | | | |
|----|------------------------------------|---------------------------|----|
| | 3.14.2.2. | Microsoft Excel 2016..... | 54 |
| 4. | RESULTADOS | | 55 |
| 5. | INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS | | 61 |
| | CONCLUSIONES..... | | 65 |
| | RECOMENDACIONES | | 67 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | | 69 |
| | APÉNDICES..... | | 71 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|----|--|----|
| 1. | Tipos de aditivos | 14 |
| 2. | Estructura de la molécula de amilopectina..... | 25 |
| 3. | Estructura de la molécula de amilosa..... | 26 |
| 4. | Recolección y ordenamiento de datos, según formulación del bioplástico | 42 |
| 5. | Recolección y ordenamiento de datos, según ensayos de degradabilidad..... | 44 |

TABLAS

| | | |
|------|---|----|
| I. | Variables por manipular..... | 33 |
| II. | Proporción de los reactivos para formulaciones del bioplástico | 38 |
| III. | Ensayo de degradabilidad por método de intemperie y agua, formulación 1..... | 46 |
| IV. | Ensayo de degradabilidad por método de intemperie y agua, formulación 2..... | 47 |
| V. | Ensayo de degradabilidad por método de intemperie y agua, formulación 3..... | 47 |
| VI. | Evaluación de la propiedad mecánica de dureza y tensión para formulación 1..... | 47 |
| VII. | Evaluación de la propiedad mecánica de dureza y tensión, formulación 2..... | 48 |

| | | |
|--------|--|----|
| VIII. | Evaluación de la propiedad mecánica de dureza y tensión, formulación 3 | 48 |
| IX. | Anova | 51 |
| X. | Rendimiento porcentual de las formulaciones del bioplástico..... | 55 |
| XI. | Comparación del porcentaje de degradación de las tres formulaciones del bioplástico por método de intemperie | 55 |
| XII. | Comparación del porcentaje de degradación de las tres formulaciones del bioplástico por método de agua | 56 |
| XIII. | Comparación de prueba de dureza <i>shore</i> para las tres formulaciones del bioplástico | 56 |
| XIV. | Comparación de prueba de tensión para las tres formulaciones del bioplástico | 57 |
| XV. | Análisis de varianza prueba de degradabilidad..... | 57 |
| XVI. | Análisis de varianza prueba de tensión..... | 58 |
| XVII. | Análisis de varianza prueba de dureza <i>shore</i> | 58 |
| XVIII. | Test de duncan para prueba de tensión..... | 59 |
| XIX. | Test de duncan para prueba de dureza <i>shore</i> | 59 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|-----------------|--|
| k | Cantidad de clases |
| cm ² | Centímetro cuadrado |
| CM | Corrección de medias |
| MSE | Corrección de medias de errores |
| MST | Corrección de medias de tratamientos |
| S ² | Cuadrado medio del error de análisis de varianza |
| d | Degradabilidad |
| CO ₂ | Dióxido de carbono |
| °C | Grados Celsius |
| v | Grados de libertad |
| g | Gramos |
| Kg | Kilogramos |
| mo | Masa inicial de muestra |
| mf | Masa final de muestra |
| mL | Mililitro |
| mm ² | Milímetro cuadrado |
| min | Minuto |
| x_i | Muestra i |
| α | Nivel de significancia |
| % | Porcentaje |
| Fcr | Probabilidad crítica análisis de varianza |
| Fcal | Probabilidad determinada análisis de varianza |
| \bar{x}_i | Promedio de muestra i |

| | |
|------------------------------|-----------------------------------|
| SST | Suma de cuadrados de tratamientos |
| SStotal | Suma de cuadrados total |
| Σ | Sumatoria |
| n | Tamaño de clase |
| F | Valor de prueba |
| σ^2 | Varianza |

GLOSARIO

| | |
|---|---|
| Ácido poliláctico | Polímero constituido por moléculas de ácido láctico, con propiedades semejantes a las del tereftalato de polietileno que se utiliza para hacer envases, pero que además es biodegradable. |
| Asociación Americana de Ensayo de Materiales | Organización de normas internacionales que desarrolla y publica acuerdos voluntarios de normas técnicas para una amplia gama de materiales, productos y servicios. |
| Biodegradabilidad | Facultad de algunos productos o sustancias de descomponerse en elementos químicos naturales, en un período relativamente corto. |
| Biomasa | Materia orgánica derivada de animales o vegetales. |
| Bioplástico | Polímeros que provienen de fuentes naturales y renovables. |
| Degradación | Reducción de un compuesto químico a uno menos complejo. |
| Dureza | Propiedad mecánica que mide la resistencia que un material ofrece cuando intenta ser deformado plásticamente. |

| | |
|----------------------|--|
| Hidrofílico | Propiedad de la sustancia que tiene afinidad con el agua. |
| Imbibición | Desplazamiento de un fluido viscoso por otro fluido inmisible con este. |
| Kilopondios | Unidad de fuerza equivalente a la fuerza que actúa sobre la masa de 1 kilogramo sometido a la gravedad normal. |
| Monómero | Molécula que forma la unidad básica de los polímeros. |
| Plastificante | Aditivo que se utiliza para añadir propiedades mecánicas a un material plástico. |
| Polímero | Sustancia compuesta por moléculas de cadena larga en la que se repite una unidad estructural básica. |
| Tensión | Efecto de aplicar una fuerza sobre una forma alargada, aumentando su elongación. |

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se realizó la evaluación de la biodegradabilidad de las distintas formulaciones de un bioplástico sintetizado a partir del almidón obtenido de la cáscara de mango (*Mangifera indica* L.). Las distintas formulaciones del bioplástico se obtuvieron variando la proporción de los aditivos del polímero.

El estudio se realizó en los laboratorios de química de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. La evaluación de la biodegradabilidad de las distintas formulaciones del bioplástico se realizó mediante los métodos de degradabilidad a la intemperie y degradabilidad por agua. Además, se evaluó las propiedades mecánicas de tensión y dureza del polímero obtenido mediante las normas ASTM D 638-89 y ASTM D 2240-86, respectivamente.

En el ensayo de degradabilidad, al someter las formulaciones a la intemperie y agua por un periodo de treinta días, se determinó que las formulaciones perdieron mayor peso al estar en contacto con el agua. Los resultados de degradación por el método de intemperie se obtuvieron dentro de un rango entre 1,330 % y 3,150 %. Mientras que, en el método por contacto en agua, el rango de degradación fue entre 14,25 % y 15,58 %. A partir de la caracterización física de las formulaciones del bioplástico se obtuvo los resultados para las propiedades mecánicas de tensión y dureza. En la prueba de dureza, la formulación uno presentó el resultado más bajo, con un valor de 5,85 Kg/mm², mientras que la formulación tres presentó el resultado mayor, con un valor de 7,86 Kg/mm². Mientras que, en la prueba mecánica de tensión, la

formulación uno logró un esfuerzo de 0,4920 Kg/cm², siendo el valor menor dentro de las todas las formulaciones. Mientras que las formulaciones dos y tres obtuvieron valores de 0,643 y 1,776 Kg/cm², respectivamente.

OBJETIVOS

General

Evaluar la biodegradabilidad de las diferentes formulaciones de un bioplástico, sintetizado a partir del almidón obtenido de la cáscara mango (*Mangifera Indica L.*).

Específicos

1. Sintetizar un polímero biodegradable a partir del almidón de la cáscara de mango a escala laboratorio.
2. Determinar el porcentaje de rendimiento del almidón obtenido de la cáscara de mango.
3. Elaborar tres formulaciones prototipo del polímero biodegradable, sintetizado a partir del almidón obtenido de la cáscara de mango.
4. Comparar la biodegradabilidad de las formulaciones prototipo del bioplástico obtenido mediante dos métodos: degradabilidad a la intemperie y degradabilidad por agua.
5. Examinar la propiedad mecánica de tensión de las formulaciones prototipo del bioplástico obtenido, mediante la norma ASTM D 638-89.

6. Examinar la propiedad mecánica de dureza de las formulaciones prototipo del bioplástico obtenido, mediante la norma ASTM D 2240-86.

Hipótesis

Es posible procesar la cáscara de mango (*Mangifera indica* L.), variando las formulaciones con reactivos que cumplen la función de plastificantes, espesantes, y lubricantes, para obtener un polímero que cumpla con la condición de ser biodegradable.

Hipótesis nulas

- H_{01} : La variación en la formulación del bioplástico, no afecta significativamente la biodegradabilidad del polímero.
- H_{02} : La variación en la formulación del bioplástico, no afecta significativamente la propiedad mecánica de tensión.
- H_{03} : La variación en la formulación del bioplástico, no afecta significativamente la propiedad mecánica de dureza.

Hipótesis alternativas

- H_{11} : La variación en la formulación del bioplástico, afecta significativamente la biodegradabilidad del polímero.
- H_{12} : La variación en la formulación del bioplástico, afecta significativamente la propiedad mecánica de tensión.
- H_{13} : La variación en la formulación del bioplástico, afecta significativamente la propiedad mecánica de dureza.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el plástico es uno de los materiales más abundantes en el planeta, su producción y uso en masa es de preocupación a nivel mundial por la contaminación que produce en el agua, tierra y aire, por acumulación de residuos.

El principal impacto ambiental de los plásticos es la contaminación de los mares y océanos, lo cual pone en peligro la biodiversidad marina. Los plásticos también contribuyen a la emisión de gases que contaminan la atmósfera. Al momento de ser descartados en los rellenos sanitarios, se constituyen como fuente de contaminación, liberando sustancias tóxicas, por ser materiales derivados del petróleo.

El problema principal de los plásticos derivados del petróleo es el período de degradación, el cual es de 200 años, aproximadamente. Por esta razón, es necesario implementar un sustituyente, el cual presente propiedades semejantes, sea fácil de producir y que se degrade rápidamente. Los bioplásticos se presentan como una solución viable a este problema.

Los bioplásticos son polímeros biodegradables sintetizados a partir de fuentes renovables, como desechos o residuos orgánicos. Este tipo de polímero puede sintetizarse a partir de distintas materias primas como: almidón, celulosa, aceites y azúcares; principalmente, los bioplásticos sintetizados a partir de almidón, el cual se puede obtener de tubérculos, semillas, frutas y raíces.

Existen diversas fuentes de almidón, entre ellas el mango. Los esquemas de comercialización de la fruta y las rigurosas normas de exportación, provocan la existencia de importantes volúmenes de mango que no cumplen los requisitos establecidos, por lo que cierta parte de la producción de mango queda sin exportarse. Esta parte puede aprovecharse para fortalecer la economía del país, mediante la implementación de la cáscara de mango para la elaboración de bioplásticos.

El propósito de la investigación es procesar la cáscara de mango, variando las formulaciones con reactivos que cumplen la función de plastificantes, espesantes, y lubricantes, para obtener un polímero que cumpla con la condición de biodegradable, además de evaluar las propiedades mecánicas de dureza y tensión y la biodegradabilidad del polímero obtenido mediante los métodos de degradabilidad a la intemperie y degradabilidad por agua.

1. ANTECEDENTES

En el Centro de Investigaciones Bonaventuriana de la Universidad de San Buenaventura Cali, Colombia, en 2005, M. Morales, R. Yusti y J. Durán desarrollaron un trabajo de investigación titulado: *Formulación para la obtención de un polímero biodegradable a partir de almidón de yuca, variedad MBRA 383*. En esta investigación se propuso la elaboración de un polímero biodegradable a partir de isocianato y el esfuerzo o sustitución de este por almidón de yuca. En este estudio se realizaron dos formulaciones, y a cada una se le realizó tres ensayos. Mediante estos ensayos se evaluó la expansión polimérica. Para lo anterior se determinó la densidad de cada uno de los polímeros obtenidos en cada formulación. A partir de los resultados obtenidos se determinó que la relación entre expansión polimérica y densidad es inversamente proporcional; es decir que, cuanto mayor sea la expansión polimérica, menor será el valor de la densidad.

En 2009, G. Ruiz, C. Montoya, y M. Paniagua desarrollaron en la Universidad EIA, Antioquía, Medellín, un estudio titulado: *Degradabilidad de un polímero de almidón de yuca*. En dicha investigación se evaluó la degradabilidad de un polímero sintetizado a partir de almidón de yuca por diferentes medios, como agua dulce y salda, luz solar y la iluminación de un relleno sanitario. Mediante los resultados, determinaron que la mayor degradación se obtuvo en las muestras expuestas a la simulación del relleno sanitario, lo cual se evidenció por la mayor producción de dióxido de carbono (CO₂), mayor pérdida de peso y presencia de hongos después de terminado el ensayo.

La “Revista Mexicana de Ingeniería Química” en el 2012 publicó el trabajo de investigación desarrollado por: G.I Bolio, L. Veleza, A. Valadez y P. Quintana, denominado: *El intemperismo y la biodegradación de material compuesto de ácido poliláctico reforzado con whiskers de celulosa*. El estudio se basó en el estudio de la biodegradación en suelo del material compuesto de ácido poliláctico reforzado con *whiskers* de celulosa, previamente expuesto a los efectos de radiación UV. Además, se evaluaron los cambios en las propiedades térmicas utilizando la técnica de calorimetría diferencial de barrido y espectroscopía de infrarrojo. Los resultados obtenidos mostraron que existe un efecto sinérgico cuando las muestras del material son expuestas, primero a la intemperie y, posteriormente, a la biodegradación del suelo.

En el trabajo de graduación de Carlos Alberto Iguardia Arrivillaga, perteneciente a la carrera de Química Farmacéutica de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala, realizado en el año 2013, bajo el título: *Síntesis y caracterización de bioplástico a partir de almidón de banano verde (Musa sapientum)*, se propuso determinar si el almidón de banano verde era una materia prima adecuada para la síntesis de un bioplástico. En esta investigación se determinó que una de las formulaciones desarrolladas generó un material útil para aplicaciones industriales, como la fabricación de materiales de empaque, bolsas y cajas.

En 2014, J. López, J. Cuarán, L. Arenas y L. Flórez, estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Occidente de Colombia, desarrollaron un trabajo de investigación titulado: *Usos potenciales de la cáscara de banano, elaboración de un bioplástico*. En esta investigación se propuso sintetizar un bioplástico a partir del almidón obtenido de la cáscara de banano. Se realizó una caracterización morfológica, química y térmica de la cáscara de banano. A partir de los resultados, se determinó que la cáscara de

banano presentó 23,03 % de hemicelulosa, 23,02 % de celulosa y 29,87 % de lignina. El bioplástico sintetizado presentó resultados positivos en cuanto a durabilidad y aspecto físico.

En diciembre de 2014, la revista de Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad del Cauca, publicó la investigación titulada: *Evaluación de propiedades físicas de bioplásticos termo-comprimidos elaborados con harina de yuca*, desarrollada por D. Navia y N. Bejarano. En este trabajo, se estudió el comportamiento de las propiedades mecánicas, densidad y color en bioplásticos elaborados con harina de yuca de variedad MPER-183 gelatinizada, reforzados con fibra de fique. Los bioplásticos obtenidos fueron sintetizados mediante la técnica de moldeo por compresión, variando la presión y temperatura. Se determinó que las variables de presión y temperatura afectaron significativamente las propiedades mecánicas, el color y la densidad.

En 2015, Alma Verónica García Quiñonez realizó en la Escuela de Ingeniería Química, Sede Central Santa Tecla, El Salvador, la investigación denominada: *Obtención de un polímero biodegradable a partir de almidón de maíz*. En dicho trabajo se sintetizó un polímero biodegradable a partir de almidón de maíz, para elaborar dos prototipos de material de empaque: película y bandeja. De acuerdo con los resultados obtenidos se determinó que el almidón de maíz puede ser utilizado como componente esencial para la elaboración de un bioplástico. Además, se comprobó de forma cualitativa que a una temperatura de 21,7 °C y una humedad relativa entre el 82 %, el polímero se degrada en tres meses.

Mónica Charro Espinoza, estudiante de la carrera de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador, desarrolló en noviembre de 2015, el

trabajo de investigación denominado: *Obtención de plástico biodegradable a partir de almidón de patata*. En este estudio se propuso elaborar una película biodegradable a partir de almidón de papa, a la cual se realizó una caracterización física, mecánica y de biodegradabilidad. Para la síntesis de la película del bioplástico se utilizó almidón de papa, el cual fue mezclado con varios plastificantes: glicerina, alcohol polivinílico y bórax, en diferentes concentraciones. A partir de los resultados se determinó que cada una de las propiedades mecánicas y físicas de las películas varían según las concentraciones de almidón y plastificantes.

Finalmente, en 2016, Ana Gabriela Álvarez Arévalo, estudiante de la carrera de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, realizó el trabajo de graduación titulado: *Elaboración de plástico biodegradable a partir del almidón extraído del maíz*. En este estudio se propuso elaborar un plástico degradable mediante el proceso de imbibición, utilizando glicerina y urea como plastificantes. Se realizaron ensayos de degradabilidad de intemperie y por contacto de agua; de esta forma se determinó que la mayor degradación del plástico se obtuvo en las muestras expuestas al contacto con agua

1.1. Justificación

La contaminación por plásticos derivados del petróleo es un problema difícil de tratar en el país, debido a la elevada cantidad de plásticos utilizados diariamente y su acumulación por el bajo nivel de degradabilidad que presentan en el medio ambiente.

El principal impacto ambiental generado por los plásticos en Guatemala es la contaminación en el agua. Los desechos plásticos se acumulan en las

aguas, produciendo efectos adversos. La degradación de las aguas superficiales y subterráneas, por la contaminación de plásticos, ha llegado a convertirse en un poderoso obstáculo para el avance sostenible de Guatemala. La contaminación afecta la salud pública, sobre todo en la población infantil; también el turismo, la pesca y otros sectores, provocando daños ambientales, económicos y sociales que impiden el desarrollo del país; por lo que es necesario implementar alternativas que puedan competir en la industria sin provocar daños al medio ambiente.

La implementación de bioplásticos surge como una tendencia innovadora en los últimos años, la cual pretende contribuir a reducir la contaminación generado, por los plásticos derivados del petróleo. Los bioplásticos se caracterizan por ser productos elaborados con materiales renovables o residuos orgánicos, los cuales no presentan en su totalidad efectos adversos en el medio ambiente al momento de ser desechados. La implementación de los bioplásticos está siendo impulsada por una combinación de distintos factores, entre los cuales destacan el alto precio de las resinas derivadas del petróleo y la conciencia de los consumidores sobre la necesidad de proteger el medio ambiente.

En la síntesis de bioplásticos se busca utilizar desechos o residuos orgánicos con contenido de almidón. Esto, mediante un enfoque que permita obtener un proceso práctico y económico, y un alto rendimiento.

Guatemala es uno de los cinco principales productores de mango a nivel latinoamericano. El mango contiene entre 0,30 % y 10,50 % de almidón. Por lo que es posible destinar un porcentaje para la elaboración de bioplásticos. De esta forma es posible disminuir la contaminación de plásticos dañinos.

En esta investigación se propone procesar la cáscara de mango, variando las formulaciones con reactivos que cumplen la función de plastificantes, espesantes, y lubricantes, para obtener un polímero que cumpla con la condición de ser biodegradable. Es decir, que se degrade en tiempo inferior al plástico elaborado con derivados del petróleo, sin dañar el agua, la tierra, el aire, a los animales y que no genere acumulación. Se realizarán distintas formulaciones para generar un bioplástico con características físicas y cualitativas que pueda utilizarse como sustituto de los plásticos derivados del petróleo y en otras aplicaciones industriales.

1.2. Determinación del problema

El uso de plásticos derivados del petróleo genera un alto grado de contaminación, dado a que estos se degradan en un período aproximado de 200 años, produciendo acumulación. Los plásticos presentan efectos adversos sobre el medio ambiente, contaminando el suelo y aguas. Los plásticos derivados del petróleo, al estar en contacto con el suelo, liberan productos químicos dañinos, que luego se filtran hacia las aguas subterráneas. Además, los plásticos, al no degradarse, resultan dañinos para los animales, poniendo en peligro su especie; por lo que es necesario implementar un sustituyente del plástico, el cual presente propiedades semejantes, sea fácil de producir y que se degrade rápidamente.

1.2.1. Definición

La elaboración de un bioplástico a partir del almidón obtenido de la cáscara de mango que sustituirá a los plásticos derivados del petróleo se realizará mediante de una mezcla con plastificantes para obtener un polímero que presente las mismas características y cumpla con la condición de ser biodegradable, reduciendo la acumulación de residuos.

1.2.2. Delimitación

Se realizará la síntesis de un polímero biodegradable a partir del almidón obtenido de la cáscara de mango, con reactivos que cumplan con la condición de ser plastificantes, espesantes y lubricantes, realizando a su vez, ensayos de degradabilidad. Además de evaluar las propiedades mecánicas de tensión y dureza, para establecer si es posible implementarlo como sustituto de los plásticos derivados del petróleo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Polímeros

Los polímeros se caracterizan por ser un tipo de macromolécula, la cual posee una unidad que se repite a lo largo de la molécula, denominada como monómeros. La unión de los monómeros da lugar a una estructura de constitución repetitiva en el polímero.

La unión de las moléculas de monómero para dar lugar a un polímero se realiza en secuencia, resultando en una estructura molecular de eslabones consecutivos, los cuales se unen mediante enlaces covalentes. La cantidad de eslabones que constituyen la cadena, es decir, el número de moléculas que se han unido de forma consecutiva, se denomina el grado de polimerización. Los monómeros pueden situarse en cadena o de forma ramificada.

Las propiedades en los polímeros pueden variar; estas diferencias de propiedades son el resultado de diferencias en la estructura general de la cadena del polímero. Los tres principales grupos de estructuras son: lineal, ramificado y entrelazado. Sin embargo, existen otros tipos de estructuras, más especializadas: escaleras, estrellas y dendrímeros, que presentan propiedades únicas.

Los polímeros lineales presentan una cadena continua de unidades que se repiten. Las cadenas pueden variar desde el conjunto aleatorio, hasta ordenadas. Los polímeros que pertenecen al extremo aleatorio se denominan amorfos, y los del extremo ordenado, cristalinos.

Los polímeros ramificados presentan ramificaciones que salen de la cadena principal. Por lo general, al aumentar la ramificación en un polímero se reduce la cristalinidad y se alteran las propiedades, como la densidad y peso molecular.

En los polímeros entrelazados, la unión en las cadenas es mediante unidades de enlazamiento, las cuales pueden ser largas o cortas y pueden estar formadas por las mismas unidades presentes en la cadena principal.

Los polímeros se caracterizan por poseer un alto peso molecular. El alto peso molecular permite que las fuerzas entre los enlaces sean lo suficientemente altas, proporcionando propiedades mecánicas como resistencia, estabilidad y elasticidad.

2.1.1. Polímeros naturales

Los polímeros son aquellos que provienen de la naturaleza, entre los cuales destacan el almidón y el algodón, cuyo monómero es la glucosa. Otro ejemplo de polímeros naturales son las proteínas, las cuales se constituyen de aminoácidos.

La lana y seda son otro tipo de polímeros naturales que han sido utilizadas como fibras y telas a lo largo de la historia. Incluso el ácido desoxirribunucleico es un polímero natural, el cual tiene por monómero al ácido nucleico.

2.1.2. Polímeros sintéticos

Los polímeros sintéticos son macromoléculas conformadas por la unión de monómeros, los cuales son obtenidos de forma artificial. Este tipo de polímeros se elaboran con el objetivo de cumplir funciones específicas, por lo cual presentan determinadas características. La mayoría de los polímeros sintéticos se obtienen del petróleo. Aproximadamente el 4 % de la producción mundial de petróleo es destinada a la elaboración de polímeros. Este se realiza mediante un proceso de *cracking* y *reforming*, en donde se obtienen moléculas simples, como etileno y benceno a partir de las cuales comienza la síntesis de polímeros.

Algunos ejemplos de polímeros sintéticos son: nylon, polibutadieno, neopreno, poliestireno, polietileno y policloruro de vinilo.

2.2. Propiedades de los polímeros

Los polímeros se clasifican según su comportamiento físico. Estos se clasifican en tres categorías.

2.2.1. Polímeros termofijos

Son polímeros que no pueden fluir por efecto de la temperatura para ser remodelados, es decir que pasa por un estado líquido, y después se solidifican al ser calentados. El material solidificado, denominado termofijo, se forma por reacciones químicas irreversibles que forman enlaces cruzados al calentar el polímero termofijo. Por su forma molecular son polímeros entrecruzados.

Además, este tipo de polímeros no se pueden reciclar.¹ La baquelita y la melanina son ejemplos de polímeros termofijos.

2.2.2. Polímeros termoplásticos

Los polímeros termoplásticos son los más comunes y pueden deformarse al someterse a calentamientos, mientras que a temperatura ambiente son rígidos. Estos polímeros son lineales, los cuales pueden presentarse como ramificados o no ramificados. Dado que no son polímeros entrecruzados, son solubles en ciertos solventes orgánicos; además son capaces de fundir, por lo que también, son reciclables. Este tipo de polímero cambia de vidrio a flexible y elástico, cuando se encuentra en su temperatura de transición vítrea. Después de ese punto, los polímeros amorfos se transforman de forma gradual en líquido al elevar la temperatura, mientras que los polímeros cristalinos sufren una segunda transición, y solo se licuan cuando llegan a la temperatura de fusión.

Los termoplásticos presentan buenas propiedades mecánicas, son fáciles de procesar y son económicos. Sin embargo, a altas temperaturas, por encima de la temperatura de transición vítrea, comienzan a reblandecer.

2.2.3. Polímeros elastómeros

Los elastómeros poseen cadenas con libertad de movimiento molecular. Este tipo de polímeros son flexibles, pueden estirarse y regresar a su forma original cuando la fuerza de alargamiento cesa. Sin embargo, los entrelazamientos en estos polímeros limitan el grado en que se pueden deformar estos materiales y después regresar a su forma original cuando se les

¹ LÓPEZ, Fabio. *Fundamentos de polímeros*. p. 93.

suelta. Además, presentan dobles enlaces a lo largo de la cadena, pero reticulados en menor extensión.²

Los elastómeros son materiales tenaces, resistentes a aceites y grasas y ozono, también presentan alta flexibilidad a altas temperaturas. Este tipo de polímeros se caracterizan por presentar una temperatura de transición vítrea inferior a la temperatura ambiente. Sin embargo, los elastómeros presentan ciertas desventajas termoestables: no son reciclables y requieren de un proceso lento, lo que necesita grandes cantidades de tiempo y energía.

2.3. Aditivos de un plástico

Los plásticos pueden modificarse para adaptarse a diferentes tipos de aplicaciones industriales. Para que los plásticos se adecuen a las diversas aplicaciones industriales, es necesario agregarles aditivos. Los aditivos son sustancias dispersas en la masa del polímero, los cuales modifican sus propiedades.

Los aditivos se clasifican según su función y no su composición química (figura 1). Los aditivos deben cumplir con ciertos requisitos técnicos. Se espera que estos sean altamente eficientes; es decir, que cumplan con los objetivos propuestos y que sean aceptables económicamente.

La elección final de un aditivo se basa en el comportamiento considerado en su conjunto. Es importante mencionar que un aditivo no debe ser volátil en condiciones del proceso de transformación, es decir que debe de presentar una tensión de vapor baja a temperaturas altas. Además, un aditivo no deber ser

² BESEDNJAK, Adonai. *Materiales compuestos*. p. 20.

tóxico, ni perjudicial para la salud del personal que lo manipule, ni para los usuarios.

Figura 1. **Tipos de aditivos**

| Función del aditivo | Tipo de aditivo |
|---|--|
| Aditivos que facilitan el procesado | Estabilizantes Lubricantes |
| Aditivos que modifican las propiedades mecánicas | Plastificantes Cargas reforzantes Modificadores de impacto |
| Aditivos que disminuyen costos de las formulaciones | Cargas Diluyentes y extendedores |
| Modificadores de propiedades superficiales | Agentes antiestáticos Aditivos antideslizamiento Aditivos antidesgaste Promotores de adhesión |
| Modificadores de propiedades ópticas | Pigmentos y colorantes Agentes de nucleación |
| Aditivos contra el envejecimiento | Estabilizantes contra luz UV Fungicidas |
| Otros | Agentes espumantes Retardantes de llama |

Fuente: BELTRAN, Mario, *Tecnología de polímeros*. p.30.

2.4. Clasificación de los aditivos según su función

Los aditivos se clasifican según función, es necesario que la compatibilidad entre las moléculas del aditivo y el polímero sea alta, es decir un alto grado de miscibilidad a nivel molecular.

2.4.1. Aditivos que facilitan el procesado

A continuación, se describen los aditivos para plastificantes que facilitan el procesado.

2.4.1.1. Estabilizadores

Los estabilizadores también se conocen como antioxidantes, los cuales se emplean para mejorar la estabilidad química de los plásticos. La función principal de estos aditivos es ayudar a inhibir o retardar el mecanismo de oxidación, es decir la degradación de los polímeros. Este tipo de aditivos se dividen en: estabilizadores térmicos, absorbedores de luz y antioxidantes.³

Los estabilizadores térmicos se caracterizan por retardar o inhibir la degradación de los polímeros de las altas temperaturas a las que son sometidos durante los diferentes procesos de transformación, evitando el deterioro de las propiedades físicas del material.

Los plásticos suelen degradarse en diferentes formas al exponerse al sol; las más comunes son el cambio de color y la pérdida de propiedades físicas. Por esta razón se emplean los absorbedores de luz, los cuales estabilizan el color y prologan la duración del material. Los polímeros particularmente susceptibles a este tipo de degradación son las poliolefinas, el poliestireno, el PVC, el ABS, los poliésteres y los poliuretanos.

2.4.1.2. Lubricantes

Los lubricantes se emplean con el objetivo de disminuir las fuerzas de fricción y reducir el desgaste de dos cuerpos que se rozan entre sí. En el proceso de transformación de los plásticos a nivel industrial, es frecuente que existan problemas por una fricción excesiva. También es frecuente que exista fricción entre el polímero fundido y las piezas metálicas presentes en el

³ SEYMOUR, Benedict. *Introducción a la Química de los Polímeros*. p 463.

proceso. Como una solución a este tipo de problemas se utilizan lubricantes internos y externos.

Los lubricantes internos tienen como objetivo disminuir la fricción presente entre las moléculas del polímero. La característica principal de estos lubricantes es la compatibilidad a altas temperaturas. Si existe compatibilidad a bajas temperaturas, el lubricante debe utilizarse en pequeñas concentraciones.

Los lubricantes externos son utilizados para reducir y controlar las fuerzas de adhesión entre el polímero y las piezas metálicas presentes durante el proceso de transformación. Estos aditivos se caracterizan por presentar baja solubilidad en el polímero. Además, deben de presentar una zona polar y apolar. En el proceso de lubricación la zona polar se orienta hacia la superficie metálica, formando una capa permanente, mientras que la zona apolar se orienta hacia las moléculas del polímero.⁴

Los lubricantes externos más utilizados en la industria son: ácido esteárico, estereato de calcio y plomo, ceras de parafina, ésteres, tales como palmitato de etilo.

2.4.2. Aditivos modificadores de propiedades superficiales

Estos aditivos se caracterizan por variar las propiedades superficiales de los polímeros.

⁴ BELTRÁN, Mario. *Tecnología de Polímeros*. <http://iq.ua.es/TPO/Tema2.pdf>. Consulta: mayo 2018.

2.4.2.1. Antiestáticos

Los agentes antiestáticos son químicos que se añaden a los plásticos con el objetivo de reducir la tendencia de estos a adquirir carga electroestática, es decir que inhiben la acumulación o descarga de la electricidad estática.

Los agentes antiestáticos se agrupan en dos categorías: antiestáticos externos e internos. Los antiestáticos externos se aplican sobre la superficie del material y son fácilmente removidos debido a su breve duración. Mientras que los antiestáticos internos son los que se añaden en la matriz del polímero, por lo que no pueden ser removidos con facilidad y su período de duración es más extenso. Este tipo de antiestáticos presentan características migratorias, las cuales son las responsables de que el material cumpla con la propiedad de disipar la carga estática. Cuando el agente antiestático se encuentra dentro del plástico, el compuesto migra hacia la superficie mediante puentes de hidrógeno y con la humedad del ambiente forma una capa microscópica de agua. Este es el medio a través del cual fluye la carga y se disipa mediante el mecanismo de conducción a lo largo de la superficie o mediante radiación hacia el aire circulante.

Las moléculas presentes en un agente antiestático presentan zonas hidrófilas e hidrofóbicas, similares a las de un agente tensoactivo. La zona hidrofóbica interactúa con la superficie del material, mientras que la zona hidrófila interactúa con la humedad presente en el aire y las moléculas de agua.

2.4.3. Aditivos modificadores de propiedades ópticas

Se describen los aditivos que presentan características para modificar las propiedades ópticas.

2.4.3.1. Colorantes

Los colorantes se caracterizan por presentar colores sólidos a la luz, a la temperatura y a la humedad, pero no deben reducir otras propiedades del polímero, como la resistencia al impacto y la resistencia al microagrietamiento. Los colorantes se dividen en pigmentos y tintes.

Los pigmentos pueden ser materiales orgánicos o inorgánicos, que son prácticamente insolubles en el polímero donde estén dispersos. Además, se caracterizan por ser de fácil dispersión, poseer resistencia a la temperatura de proceso y elevada opacidad. Este tipo de aditivos se utilizan para dar color a los plásticos. Los pigmentos más utilizados son: óxido de titanio y el óxido de hierro.

Los tintes son colorantes solubles en el polímero que se encuentran dispersos en la matriz de este. Esto significa que no hay partículas visibles en el material, presentando transparencia.

2.4.4. Aditivos modificadores de propiedades mecánicas

Estos tipos de aditivos permiten modificar y aumentar las cargas e impactos que los polímeros pueden percibir.

2.4.4.1. Plastificantes

Este tipo de aditivo no se encuentra unido químicamente al polímero, sino que actúa como lubricante interno, reduciendo las fuerzas de van der Waals presentes entre las cadenas del polímero y separándolas para evitar que se entrelacen. Los plastificantes se utilizan para reducir la temperatura vítrea

mejorar las propiedades mecánicas de flexibilidad y elasticidad de los plásticos. Por lo general, este tipo de materiales son polares e hidrofílicos y presentan pesos moleculares bajos.

Los plastificantes son importantes para el PVC, dado que presenta una temperatura de transición vítrea por encima de la temperatura ambiente. Los plastificantes más utilizados a nivel industrial son: epóxidos, ftalatos y fosfatos.

2.4.4.2. Cargas

Las cargas son aditivos sólidos que se añaden a las formulaciones de los plásticos con el objetivo de reducir costes. La característica principal de las cargas se basa en no intervenir con las propiedades del polímero, también debe dispersarse en el polímero con facilidad, proporcionando una distribución adecuada.

A nivel industrial suelen utilizarse cargas orgánicas e inorgánicas. Entre las cargas orgánicas se encuentran el almidón y celulosa. Para las cargas inorgánicas se utilizan minerales como: carbonato de calcio, sulfatos de metales alcalinotérreos, silicatos y sílices.

Los materiales cargados no presentan buenas propiedades mecánicas y problemas de blanqueamiento al aplicar algún esfuerzo, es por esto por lo que únicamente se emplean para aplicaciones de bajo requerimiento.

2.4.4.3. Modificadores de impacto

El objetivo de añadir este tipo de aditivo en los polímeros es la de mejorar la resistencia al impacto a bajas temperaturas. Este se obtiene al mezclar

polímeros, por lo general una mezcla de un polímero termo plástico con un elastómero, de tal forma que se obtienen polímeros con un alto espectro de propiedades.

Para aumentar la resistencia al impacto en un polímero es esencial que exista una estructura multifase. Esta estructura resulta como consecuencia de una cierta incompatibilidad entre la fase rígida y la fase elástica. Cuando un polímero con estas propiedades es sometido a un impacto, la energía mecánica es absorbida por la fase rígida. Sin embargo, para evitar una fractura en el material, la energía debe transmitirse a la fase elástica. Si esta energía no puede transmitirse a la fase elástica, permanecerá en la fase rígida creando tensión, lo cual produce fracturas en el material.

2.4.5. Otros

Existen otros aditivos los cuales agregaran características especiales a los polímeros.

2.4.5.1. Rellenos

Los rellenos se utilizan para mejorar las propiedades mecánicas de dureza, resistencia, rigidez y tenacidad. Los rellenos más frecuentes son la sílice, carbonato de calcio y la arcilla.⁵

2.4.5.2. Agentes espumantes

Estos aditivos se emplean para generar estructuras celulares en los polímeros, es decir estructuras que contengan proporciones de celdillas finas

⁵ SCHMID, S. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. p. 38.

llenas de gas. Estas celdillas pueden ser abiertas o cerradas, esto depende de las propiedades físicas del material.

Al agregar agentes espumantes en los polímeros, se obtienen modificaciones en las propiedades de densidad, conductividad térmica, propiedades dieléctricas y disipación acústica y mecánica.

Los agentes espumantes se clasifican en físicos y en químicos, esto depende si el gas generado en las celdillas es por un proceso físico, como sublimación o evaporación, o por un medio químico. Los agentes espumantes físicos, por lo general son líquidos, con un punto de ebullición bajo. Estos agentes ejercen su acción cuando se incrementa la temperatura o se reduce la presión del sistema. Mientras que los agentes químicos son sustancias químicas, las cuales que encuentran dispersas en el polímero, que se descomponen a la velocidad requerida en el intervalo de temperatura. Los agentes químicos más comunes son: azodicarbonamidas, benceno-sulfonil hidracina y azobisbutironitrilo.

2.5. Propiedades de los plásticos

Las propiedades de los plásticos se clasifican como: mecánicas, térmicas, eléctricas y químicas.

2.5.1. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas del plástico se basan principalmente en su composición, así como en su estructura molecular, tanto a nivel molecular como supermolecular. Las propiedades mecánicas de interés de los plásticos son:

dureza, resistencia y flexibilidad. Estas propiedades describen el modo en que este responde a la aplicación de una fuerza o carga.

La resistencia es la propiedad que describe el máximo esfuerzo que un material puede resistir por ambos lados antes de presentar una rotura por estiramiento. La dureza es la resistencia que presenta un material a ser penetrado por otro cuerpo sólido. La flexibilidad consiste en la habilidad que presentan los plásticos de recuperar su tamaño y forma, después de aplicarse un esfuerzo o carga.

2.5.2. Propiedades térmicas

Las propiedades térmicas indican el comportamiento de los plásticos frente la acción de calor. Los plásticos se caracterizan por presentar baja conductividad térmica. Cuando estos polímeros sufren un calentamiento pueden alcanzar temperaturas de trabajo mayores a las admitidas teóricamente.

2.5.3. Propiedades eléctricas

Los plásticos son materiales no conductores de electricidad; es decir que presentan propiedades dieléctricas. Estos materiales suelen utilizarse como aislantes eléctricos.

2.5.4. Propiedades químicas

Las propiedades químicas de los plásticos dependen del tipo de molécula básica en la cadena del polímero. Al escoger un plástico para una aplicación industrial específica, es necesario determinar el medio en el cual se aplicará.

2.6. Bioplásticos

Los bioplásticos son polímeros elaborados a partir de recursos renovables. A diferencia de los plásticos derivados del petróleo, los bioplásticos resultan más ecológicos, dado que presentan una huella de carbono reducida y un uso reducido de los combustibles fósiles. El costo de los bioplásticos no es dependiente del precio del petróleo, convirtiéndolos en una alternativa segura y viable. La característica principal de estos polímeros se basa en la degradación, la cual se da bajo condiciones ambientales y en un corto tiempo. Además, los bioplásticos cumplen con las mismas características que los plásticos convencionales como: flexibilidad, resistencia, ductilidad y capacidad de barrera a la humedad.

La biodegradación de los bioplásticos se basa en la degradación de sustratos complejos por parte de microorganismos por medio de vías metabólicas catalizadas por enzimas segregadas por estos, con el objetivo de obtener sustancias sencillas, básicamente agua, dióxido de carbono y biomasa, fácilmente asimilables por el medio ambiente. La degradación de los bioplásticos en un compostaje natural se da en aproximadamente 90 días, mientras que en ambientes húmedos entre 28 y 60 días.⁶

2.7. Clasificación de los bioplásticos, según su proceso de síntesis

Los bioplásticos pueden sintetizarse mediante distintos procesos. Los procesos más utilizados son:

- Síntesis por biomasa
- Síntesis química

⁶ GÁLVEZ Ana. *Elaboración de un plástico biodegradable a partir del almidón extraído del maíz*. p. 48.

- Síntesis por microorganismos
- Síntesis por mezcla de polímeros biodegradables

2.7.1. Síntesis de bioplásticos por biomasa

La síntesis por biomasa se realiza mediante extracción o remoción directa de la biomasa de los polisacáridos como el almidón o celulosa y de proteínas como queratina, colágeno y caseína.

2.7.2. Síntesis química de bioplásticos

Este tipo de síntesis se lleva a cabo mediante una síntesis química clásica a partir de monómeros de fuentes renovables, como los poliácidos glicoles y el ácido poliláctico.

2.7.3. Síntesis de bioplásticos por microorganismos

Son sintetizados mediante la aplicación de bacterias productoras nativas o modificadas de forma genética, entre estos destacan el polihidroxicanoatos y poli-3 hidroxibutarano.

2.7.4. Síntesis de bioplásticos por mezcla de polímeros biodegradables

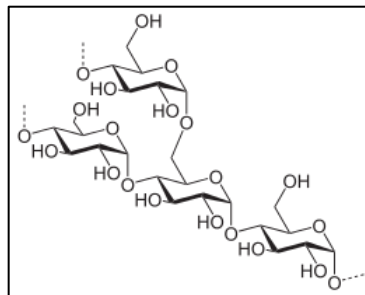
Los bioplásticos pueden sintetizarse mediante la mezcla de dos o más polímeros biodegradables, por ejemplo, el polivinilalcohol y las policaprolactonas.

2.8. Almidón como materia prima de elaboración de bioplásticos

El almidón es un polisacárido vegetal constituido por amilosa y amilopectina. Esta macromolécula se encuentra presente en raíces, tubérculos, frutas y semillas. A diferencia de los demás hidratos de carbono, el almidón se presenta en forma de gránulos y cumple la función de reserva energética de los carbohidratos vegetales. El almidón está constituido por dos compuestos de diferente estructura:

- Amilopectina: representa entre el 70 y 75 % del almidón, este polisacárido está compuesto por α -D-glucopiranosas. Se caracteriza por presentar un peso molecular elevado, dado que cada molécula suele poseer de 2 000 a 200 000 unidades de glucosa.

Figura 2. Estructura de la molécula de amilopectina

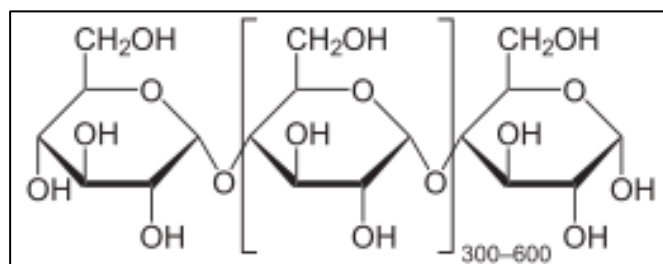


Fuente: MEDINA, Jorge. *Caracterización morfológica del almidón*. p. 49.

- Amilosa: se considera como un producto resultante de la condensación de D-glucopiranosas por medio de enlaces glucosídicos. Este compuesto establece cadenas lineales entre 200 y 250 unidades, con pesos moleculares hasta de un millón. La amilosa adquiere una conformación

tridimensional helicoidal, cada hélice esta conformada por seis moléculas de glucosa. Además, constituye entre el 25 y 30 % de almidón.⁷

Figura 3. **Estructura de la molécula de amilosa**



Fuente: MEDINA, Jorge. *Caracterización morfológica del almidón*. p. 50.

En la naturaleza, el almidón se presente en forma de gránulo. El gránulo del almidón se caracteriza por ser denso e insoluble en agua. Sin embargo, estos gránulos pueden contener agua al aumentar la temperatura, a este proceso se le conoce como gelatinización. Al final de este fenómeno se genera una pasta en la que existen cadenas de amilosa de bajo peso molecular altamente hidratadas que rodean a los agregados, también hidratados, de los restos de los gránulos.

La semicristalinidad es una de las propiedades más importantes del almidón. Esta propiedad permite al polímero presentar dos regiones definidas en estado sólido. Una de estas regiones es amorfa y la otra es cristalina. La región cristalina, está conformada por amilopectina, en la mayoría de los almidones. Mientras que la región amorfa se conforma por ramificaciones de amilosa y amilopectina.

⁷ GARCÍA, Benjamín. *Estructura y función de los dominios de fijación del almidón*. p. 76.

Las propiedades comerciales del almidón como resistencia mecánica y flexibilidad dependen de la naturaleza de la región cristalina del almidón. Sin embargo, esta región se basa en la relación entre amilosa y amilopectina, distribución del peso molecular, grado de ramificación y del proceso de conformación de cada componente presente en el polímero.

El almidón presenta propiedades termoplásticas. La presencia de amilosa en un 70 % proporciona una estructura fuerte y flexible. La estructura ramificada de la amilopectina generalmente aporta a la película pobres propiedades mecánicas. Los compuestos de los almidones hidroxipropilados son usados para la preservación de caramelos, pasas, nueces y dátiles para evitar la rancidez oxidativa. Estas características permiten que el almidón sea materia prima para la elaboración de bioplásticos.⁸

2.9. Problemática ambiental

Los plásticos son materiales versátiles, dado que presentan varias posibilidades de uso. Sin embargo, representan un problema ambiental global creciente. Los impactos ambientales generados por los plásticos son acumulativos y de largo plazo. El uso de los plásticos genera acumulación por residuos, los cuales resultan difíciles de manejar. La problemática ambiental de los plásticos se basa en cuatro aspectos fundamentales: la materia prima es no renovable, el petróleo; algunos de los productos químicos utilizados en la síntesis de los plásticos son tóxicos; la degradación es lenta y la producción de plásticos y acumulación de residuos es creciente, la cual incrementa año tras año.

⁸ IGUARDIA, Carlos. *Síntesis y caracterización de un bioplástico a partir de almidón de banano verde (Musa sapientum variedad Cavendish)*. p. 52.

A nivel mundial, el principal impacto ambiental de los plásticos es la contaminación en los mares y los océanos por acumulación de residuos. Este problema es acumulativo y creciente, dado que la producción de plásticos aumenta año tras año.

La acumulación de residuos plásticos pone en peligro la biodiversidad marina. Los animales pueden quedar atrapados en estos, resultar heridos, inmóviles o inclusive muertos. Los movimientos de las olas pueden fragmentar los plásticos y como consecuencia pueden ser ingeridos por las especies marinas. La ingestión de plásticos puede provocar la muerte o modificar el organismo de la especie de forma interna. Según el estudio realizado por Allsopp, Walters, Santillo y Johnston en 2006, se han encontrado aproximadamente 267 especies que han ingerido estos residuos, incluyendo pájaros, tortugas, focas, leones marinos, ballenas y pescados.⁹ También se han encontrado cantidades significativas de residuos plásticos contaminando hábitats marinos, desde los polos al ecuador y desde costas remotas inhabitadas hasta costas altamente pobladas.

Otro factor que influye en la acumulación de residuos plásticos es el bajo costo de producción, siendo una ventaja para la distribución y consumo de los plásticos.

⁹ TELLEZ, Alejandra. *La complejidad de la problemática ambiental de los residuos plásticos: una aproximación al análisis narrativo de política pública en Bogotá*. p. 76

2.10. Degradabilidad

Se conoce como la capacidad por descomposición química o biológica de un material. La degradabilidad de un material depende principalmente de su estructura química y las condiciones a las cuales el material se encuentre.

2.11. Mecanismo de biodegradabilidad

La desintegración de un material biodegradable en el medio ambiente puede ser mediante cuatro mecanismos:

- Biodegradabilidad
- Compostabilidad
- Erodabilidad
- Hidrobiodegradación y fotobiodegradación

2.11.1. Biodegradabilidad

Este tipo de degradación es causada por microorganismos como bacterias, algas y hongos, lo cuales producen cambios químicos en la estructura del material, convirtiéndolos en productos simples.

2.11.2. Compostabilidad

Este proceso se conoce como oxidación biológica, el material se coloca dentro un contenedor metálico por un periodo de doce semanas a una temperatura de 50 °C.

2.11.3. Erodabilidad

Se produce en el medio ambiente por disolución en agua o descomposición fotolítica, por los rayos ultravioleta provocados por la radiación solar en un período de tiempo determinado. En este mecanismo no intervienen microorganismos.

2.11.4. Hidrobiodegradación y fotobiodegradación

La hidrobiodegradación se define como degradación identificada por fenómenos hidrolíticos y biológicos, simultáneamente o sucesivamente. Mientras que la fotobiodegradación es la desintegración de un material por cambios químicos resultantes de la absorción de luz que reducen las propiedades del material.

2.12. Asociación Americana de Ensayo de Materiales

La Asociación Americana de Ensayo de Materiales, por sus siglas en inglés ASTM, es una organización sin ánimo de lucro que establece, desarrolla y publica acuerdos voluntarios de normas técnicas de ensayo estándar para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios.

Los valores que fomenta la organización son: eficiencia de la gestión, actualización constante, trabajo en equipo y procedimientos éticos e integrales, con los cuales se ha convertido en uno de los principales ejecutores en la política de ensayos de materiales a nivel mundial.

La Asociación Americana de Ensayo de Materiales establece, normas para la evaluación de las propiedades mecánicas de tensión y dureza de los plásticos. La evaluación de la propiedad mecánica de tensión se realiza bajo la norma ASTM D 638-89, mientras que la evaluación de la propiedad de dureza se realiza a través de la norma ASTM D 2240-86.

2.12.1. Norma ASTM D 638-89

La norma ASTM D 638-89 especifica los métodos para probar la resistencia a la tracción de plásticos y otros materiales de resina, para determinar sus propiedades mecánicas. También describe los requisitos de precisión para los marcos de prueba y los accesorios usados.

Las muestras para evaluar se deben ajustar las especificaciones de la norma. Para todos los materiales con un espesor mayor que 0,28 pulgadas (7 mm) pero no más de 0,55 pulgadas (14 mm) la longitud total será de 9,7 pulgadas (246 mm) y el ancho total será de 1,13 pulgadas (29 mm). El ancho del estrecho será de 0,75 pulgadas (19 mm) y la distancia entre mordazas será de 4,5 pulgadas (115 mm). La longitud de la sección estrecha será de 2,25 pulgada (57 mm).

2.12.2. Norma ASTM D 2240-86

Este método de ensayo permite mediciones de dureza basadas en cualquier depresión inicial o depresión realizada después de un período específico, o ambas.

Este método se basa en la medida de la depresión causada por una punta de penetración específica, la cual, bajo condiciones de ensayo

especificadas, es forzada a penetrar en el material. La dureza medida por depresión guarda una relación inversamente proporcional respecto a la penetración, y es un valor que depende del módulo de elasticidad y del comportamiento viscoelástico del material que se ensaya.

La muestra de plástico a evaluar debe estar compuesto por varias piezas planas unidas previamente una sobre otra para obtener el espesor requerido. Las medidas laterales de la muestra de prueba deben ser lo suficientemente adecuada para permitir realizar las mediciones a no menos de 12 mm (0.5 pulgadas) de distancia de cualquiera de los bordes. La superficie de prueba debe tener suficiente área plana para que permita al pedal presionador hacer contacto con el espécimen sobre un área que tenga un radio de por lo menos 6,0 mm (0,25 pulgadas) medido desde la punta de penetración.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Se describen las variables dependientes e independientes involucradas en la investigación.

Tabla I. Variables por manipular

| Variable | Dimensional | Constante | Variable | Dependiente | Independiente |
|-----------------------------|--------------------|-----------|----------|-------------|---------------|
| Temperatura | °C | X | | | X |
| Tiempo de secado | min | | X | X | |
| Masa del almidón | g | X | | | X |
| Masa de los reactivos | g | | X | | X |
| Masa de agua | g | X | | | X |
| Tiempo de degradación | Día | X | | X | |
| Masa inicial de bioplástico | g | | X | | X |
| Masa final de bioplástico | g | | X | X | |
| Dureza | Kg/mm ² | | X | X | |
| Esfuerzo | Kg/cm ² | | X | X | |

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del estudio

El trabajo de investigación es de carácter cuantitativo. El estudio se limitó a procesar la cáscara de mango para obtener el almidón, para tratarlo con agua y reactivos que cumplieran con la función de ser lubricantes, espesantes y plastificantes, con el propósito de obtener un polímero que cumpla la condición de ser biodegradable.

3.3. Etapas de la investigación

- Obtención de materia prima.
- Obtención de reactivos con empresas proveedoras.
- Determinación del porcentaje de almidón de la cáscara de mango.
- Elaboración de las muestras del bioplástico.
- Evaluación de las propiedades mecánicas de tensión y dureza de las muestras del bioplástico obtenido.
- Elaboración de ensayos de biodegradabilidad de las muestras del bioplástico obtenido.

3.4. Recursos humanos

Investigador
Asesor

Br. Antonio Adolfo Villalta Estrada
Inga. Cinthya Patricia Ortiz Quiroa

3.5. Localización del desarrollo de la investigación

- Laboratorio de Fisicoquímica, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, edificio T-5, tercer nivel, Ciudad Universitaria zona 12, Guatemala.

3.6. Recursos materiales

Descripción de los recursos físicos que fueron utilizados durante la fase experimental de la investigación.

3.6.1. Equipo

- Balanza analítica ohaus 2000
- Estufa eléctrica
- Trituradora
- Refrigeradora
- Soporte Universal
- Pinzas

3.6.2. Cristalería

- *Beakers* de volúmenes variables:
 - 50 mL
 - 100 mL
 - 200 mL
 - 500 mL
 - 1000 mL
- Probetas de volúmenes variables:
 - 10 mL
 - 25 mL
 - 50 mL
- Balones aforados de volúmenes variables:
 - 500 mL
 - 1000 mL

- Termómetro de mercurio
- Varilla de agitación
- Vidrio reloj
- Ampolla de decantación

3.6.3. Reactivos

- Ácido ascórbico 4 %
- Agua desmineralizada de uso industrial
- Carbonato de calcio
- Carboximetilcelulosa
- Cloruro de calcio
- Glicerina
- Sodio fosfato dibásico dihidratado
- Sodio fosfato básico anhídrido

3.7. Técnica cuantitativa

La síntesis del bioplástico a partir del almidón obtenido de la cáscara de mango, se realizó mediante un diseño de mezclas que incluyen agua, plastificantes y almidón.

Se elaboraron tres formulaciones prototipo del bioplástico. De cada formulación se realizaron tres repeticiones. La elaboración de las formulaciones prototipo se realizaron entre 70 y 80 °C.

Luego de la elaboración de las muestras del bioplástico se procedió a realizar la evaluación de las propiedades mecánicas de tensión y dureza. La evaluación de la propiedad mecánica de tensión se realizó mediante la norma

ASTM D 638-89, mientras que la propiedad mecánica de dureza se examinó mediante la norma ASTM D 2240-86.

La propiedad de biodegradabilidad del bioplástico se evaluó mediante dos métodos: degradabilidad a la intemperie y degradabilidad por agua. El período para evaluar dicha propiedad fue de 30 días para ambos métodos.

3.8. Obtención de materia prima

La materia prima, cáscara de mango (*Mangifera indica* L.), se obtuvo de un lugar dedicado a la elaboración y venta de bebidas naturales ubicado en el mercado Roosevelt. La materia prima se trasladó hacia el laboratorio para su evaluación, la cual se debe lavar para eliminar cualquier tipo de contaminante.

3.9. Recolección y ordenamiento de información

Se describen los métodos utilizados para la recolección y ordenamiento de la información.

3.9.1. Preparación de las formulaciones prototipo del bioplástico

Se elaboraron tres formulaciones prototipo del bioplástico, con distinta proporción de los reactivos en porcentaje masa/masa. Las proporciones de los reactivos para las formulaciones se muestran en la tabla II.

Tabla II. **Proporción de los reactivos para formulaciones del bioplástico**

| Formula | Reactivo | Porcentaje (%) |
|----------------|----------------------|-----------------------|
| 1 | Almidón | 20 |
| | Glicerina | 45 |
| | Agua | 35 |
| 2 | Almidón | 5 |
| | Glicerina | 20 |
| | Agua | 70 |
| | Carboximetilcelulosa | 3 |
| | Carbonato de calcio | 2 |
| 3 | Almidón | 5 |
| | Glicerina | 20 |
| | Agua | 70 |
| | Carboximetilcelulosa | 3 |
| | Cloruro de calcio | 2 |

Fuente: elaboración propia.

3.9.2. Procedimiento experimental

Se describen los procesos utilizados en la fase de experimentación de la investigación.

3.9.2.1. Procedimiento experimental para la obtención de almidón de la cáscara de mango

- Se cortó la cáscara de mango de 2 o 3 cm de largo y pesarlos
- Se colocaron los pedazos en un *beaker* de 1000 mL y se añadió la solución de ácido ascórbico al 4 %
- Se colocó la cáscara de mango cortada en la licuadora con la solución de ácido ascórbico y triturar
- Se colocó la muestra licuada en un beaker de 500 mL a la mitad, a la otra mitad se añadió agua destilada
- Se agitó la muestra durante 5 minutos
- Se refrigeró durante 1 hora
- Se decantó el sobrante
- Se repitió el paso anterior, hasta que la muestra se clarificó
- Se añadió a la muestra la solución *buffer* de sodio salino
- Se procedió a refrigerar la muestra por 24 horas
- Se decantó el sobrante
- Se añadió agua destilada y se agitó durante 5 minutos
- Se refrigeró por 1 hora
- Se procedió a decantar el sobrante
- Se repitió el paso anterior hasta que la mezcla se clarificó y el precipitado presentó color blanco

- Se colocó el precipitado dentro de horno entre 60 y 70 °C de temperatura, hasta obtener una pasta sólida
- Se convirtió la pasta sólida en polvos finos
- Se añadieron los polvos dentro de horno entre 60 y 70 °C durante 10 minutos

3.9.2.2. Procedimiento para la elaboración de la formulación 1 del bioplástico

- Se colocó almidón obtenido en un *beaker* de 500 mL, y se disolvió utilizando agua destilada
- Se añadió glicerina
- Se calentó entre 70 y 80°C hasta la formación de una pasta
- Se añadió la pasta en el molde

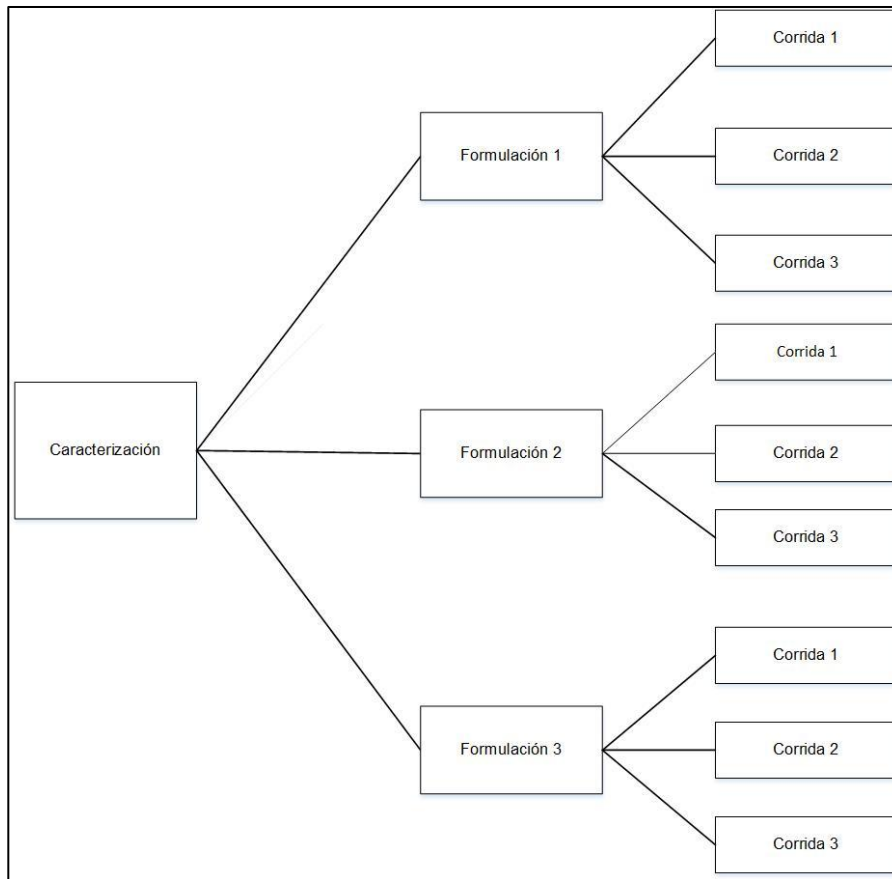
3.9.2.3. Procedimiento para la elaboración de la formulación 2 del bioplástico

- Se añadió el almidón obtenido en un *beaker* de 500 mL y se disolvió utilizando agua destilada
- En un *beaker* de 100 mL se disolvió carboximetilcelulosa con agua destilada
- En un *beaker* de 200 mL se disolvió el almidón con agua y se añadió carbonato de calcio y se mezcló
- A la solución del paso anterior se añadió glicerina
- En un *beaker* de 500 mL se añadieron las mezclas del paso 2 y 3
- Se calentó entre 70 y 80°C hasta la formación de una pasta
- Se acoplo la pasta en el molde

3.9.2.4. Procedimiento para la elaboración de la formulación 3 del bioplástico

- Se añadió el almidón obtenido en un *beaker* de 500 mL, y se disolvió utilizando agua destilada
- En un *beaker* de 100 mL se disolvió carboximetilcelulosa con agua destilada
- En un *beaker* de 200 mL se disolvió el almidón con agua y se añadió carbonato de calcio y se mezcló
- A la solución del paso anterior se añadió glicerina
- En un *beaker* de 500 mL se añadieron las mezclas del paso 2 y 3
- Se calentó entre 70 y 80 °C, hasta la formación de una pasta
- Se añadió la pasta en el molde

Figura 4. **Recolección y ordenamiento de datos, según formulación del bioplástico**



Fuente: elaboración propia.

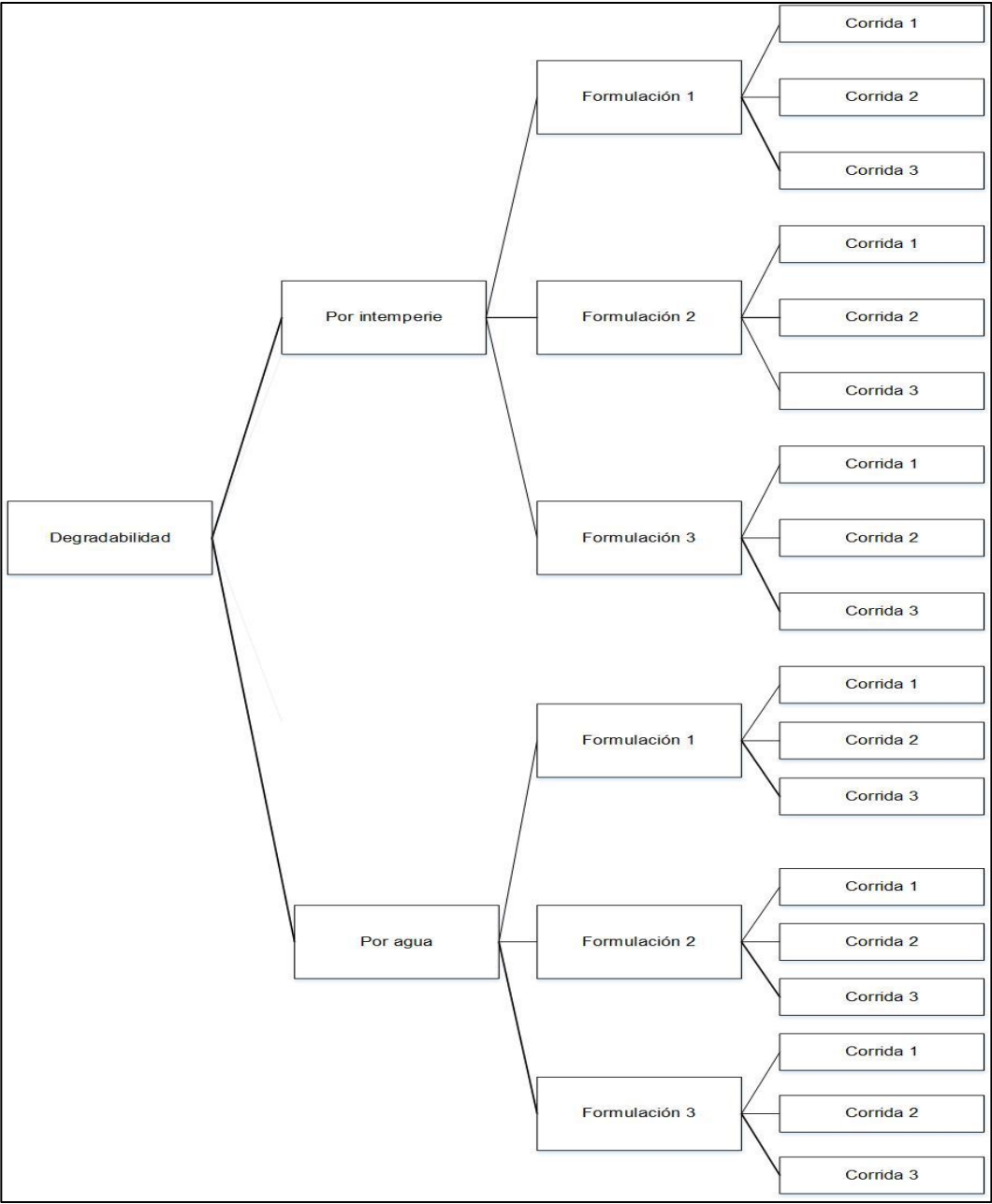
3.9.2.5. Procedimiento para la evaluación de biodegradabilidad del bioplástico: método de degradabilidad de intemperie

- Se pesaron las muestras del bioplástico en la balanza
- Se ubicaron las muestras en un recipiente sin tapadera
- Se colocaron los recipientes al aire libre
- Las muestras se dejaron en los recipientes al aire libre por un período de 30 días. Para esta etapa es necesario tener en monitoreo las condiciones: temperatura del medio, presión atmosférica y humedad relativa
- Se pesaron las muestras
- Se obtuvo el porcentaje de degradabilidad

3.9.2.6. Procedimiento para la evaluación de biodegradabilidad del bioplástico: método de degradabilidad por agua

- Se pesaron las muestras del bioplástico en la balanza
- Se colocaron las muestras en un recipiente
- Se llenaron los recipientes con agua hasta la mitad
- Se tapó el recipiente
- Las muestras se dejaron en los recipientes por un período de tiempo de 30 días
- Se pesaron las muestras
- Se obtuvo el porcentaje de degradabilidad

Figura 5. **Recolección y ordenamiento de datos, según ensayos de degradabilidad**



Fuente: elaboración propia.

3.9.2.7. Procedimiento para la evaluación de la propiedad mecánica de tensión, según norma ASTM D 638-89

- Se midió el espesor de las muestras
- Se ubicó la muestra del bioplástico en la máquina de ensayo
- Se fijó el indicador de extensión de la máquina de ensayo
- Se registró la curva de carga-extensión de la muestra
- Se registró la carga y la extensión en el límite elástico (si existe)
- Se registró la extensión en el momento de la ruptura

3.9.2.8. Procedimiento para la evaluación de la propiedad mecánica de dureza, según norma ASTM D 2240-86

- Se ubicó la muestra de ensayo en una superficie horizontal
- Se sujetó el durómetro en posición vertical con la punta de penetración a no menos de 12 mm de cualquiera de los bordes de la muestra
- Se aplicó el pedal presionador a la muestra de prueba, tan rápidamente como fue posible, sin golpear el espécimen y manteniendo el pedal paralelamente a la superficie del espécimen
- Se realizaron 5 mediciones de dureza, cada una en una posición diferente sobre la muestra
- Se determinó el valor de media aritmética de las mediciones realizadas

3.10. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de información

Se tomaron datos cuantitativos de las distintas formulaciones del bioplástico sintetizado a partir de la mezcla de almidón, agua y los plastificantes en distintas proporciones, analizando su degradabilidad utilizando el método de intemperie y contacto con agua, por un período de treinta días. También se realizó el análisis de las propiedades mecánicas de tensión y dureza. Para cada ensayo se realizaron tres corridas.

3.10.1. Tabulación de datos por número de formulación

Las tablas III, IV, V, VI, VII y VIII se utilizarán para la tabulación de los datos obtenidos.

Tabla III. **Ensayo de degradabilidad por método de intemperie y agua, formulación 1**

| Corrida | Por intemperie | | Por agua | |
|---------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| | Masa inicial (g) | Masa final (g) | Masa inicial (g) | Masa final (g) |
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Ensayo de degradabilidad por método de intemperie y agua, formulación 2**

| Corrida | Por intemperie | | Por agua | |
|---------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| | Masa inicial (g) | Masa final (g) | Masa inicial (g) | Masa final (g) |
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Ensayo de degradabilidad por método de intemperie y agua, formulación 3**

| Corrida | Por intemperie | | Por agua | |
|---------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| | Masa inicial (g) | Masa final (g) | Masa inicial (g) | Masa final (g) |
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Evaluación de la propiedad mecánica de dureza y tensión para formulación 1**

| Corrida | Dureza (Kg/mm ²) | Tensión (Kg/cm ²) |
|---------|------------------------------|-------------------------------|
| 1 | | |
| 2 | | |
| 3 | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Evaluación de la propiedad mecánica de dureza y tensión, formulación 2**

| Corrida | Dureza (Kg/mm ²) | Tensión (Kg/cm ²) |
|---------|------------------------------|-------------------------------|
| 1 | | |
| 2 | | |
| 3 | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Evaluación de la propiedad mecánica de dureza y tensión, formulación 3**

| Corrida | Dureza (Kg/mm ²) | Tensión (Kg/cm ²) |
|---------|------------------------------|-------------------------------|
| 1 | | |
| 2 | | |
| 3 | | |

Fuente: elaboración propia.

3.11. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los datos cuantitativos se utilizaron las medidas de tendencia central y las medidas de dispersión, con el objetivo de sintetizar y determinar la variabilidad que presentan los datos obtenidos. De esta forma fue posible determinar la confiabilidad de los datos que se presentaron y si los valores centrales fueron representativos.

Para determinar qué hipótesis se acepta y cuál se rechaza, se utilizó la diferencia entre medias, mediante el análisis de varianza (ANOVA).

3.11.1. Medidas de tendencia central

De las medidas de tendencia central se determinó la media aritmética. La media aritmética presentará el dato central de las corridas de cada uno de los ensayos a realizarse.

- Media aritmética

$$\bar{x} = \frac{\sum_I^N X_I}{N}$$

(Ecuación No. 1)

Donde:

\bar{x} = media

$\sum_I^N X_I$ = sumatoria de valores

N = número de datos

3.11.2. Medidas de dispersión

Se determinó la desviación estándar y la varianza. La desviación estándar permitió establecer el grado de dispersión de los datos respecto a la media aritmética. La varianza se definió como la media del cuadrado de las desviaciones respecto a la media aritmética, representado la variabilidad de los resultados.

- Desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (xi - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

(Ecuación No. 2)

Donde:

σ = desviación estándar

\bar{x} = valor promedio

x_i = valor de la muestra

N = número de datos

- Varianza

$$\sigma^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N - 1}$$

(Ecuación No. 3)

Donde:

σ^2 = varianza

x = valor promedio

x_i = valor de la muestra

N = número de datos

3.12. Análisis de varianza

La prueba de hipótesis se realizó por medio del análisis de varianza, a partir de la diferencia entre medias. Se asume que las varianzas son iguales de las k poblaciones. Se utiliza la tabla de ANOVA.

Tabla IX. **ANOVA**

| Fuentes | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadrados medios | F (prueba) | Fcrítica |
|--------------|-------------------|--------------------|------------------|------------|--------------------------------|
| Tratamientos | SST | k-1 | MST | MST/MSE | F (α , k-1, n-1) |
| Error | SSE | n-k | MSE | | |
| Total | SStotal | n-1 | | | |

Fuente: WALPOE, Ronald E. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. p. 56.

- Diferencia entre tratamientos

$$SST = \sum_{i=1}^k \frac{x_i}{n_1} - CM$$

(Ecuación No. 4)

- Corrección de media

$$CM = \frac{1}{n} (\sum_i \sum_j x_{ij})^2$$

(Ecuación No. 5)

- Varianza total

$$SStotal = \left(\sum_{i=1}^k \frac{x_i}{n_1} \right) - CM$$

(Ecuación No. 6)

- Diferencia dentro de cada tratamiento

$$SSE = SS_{total} - SST$$

(Ecuación No. 7)

- Corrección de la media de tratamientos

$$MST = \frac{SST}{k - 1}$$

(Ecuación No. 8)

- Corrección de la media de errores

$$MSE = \frac{SSE}{n - k}$$

(Ecuación No. 9)

3.13. Prueba de Duncan

El método de Duncan se utiliza en ANOVA para crear intervalos de confianza para todas las diferencias en parejas, entre las medias de los niveles de los factores mientras se controla la tasa de error por familia en un nivel especificado. El método se basa en la distribución del rango estudentizado. El punto apropiado del percentil es una función de α , k y v = grados de libertad para s^2 . La expresión del método de Duncan es la siguiente:

$$q(\alpha, k, v) \sqrt{\frac{s^2}{n}}$$

(Ecuación No. 10)

Donde:

q= valor de Duncan en función α , k y v

α = nivel de confianza

k= tratamientos

v= grados de libertad

n= observaciones por tratamiento

s^2 = cuadrado medio del error del análisis de varianza

3.14. Plan de análisis de los datos

Se describen los métodos y programas mediante los cuales se analizaron los resultados para determinar conclusiones objetivas.

3.14.1. Métodos y modelos de los datos, según tipo de variables

Los datos obtenidos se analizaron de forma matemática y estadística, de esta forma se determinó objetivamente si el almidón obtenido de la cáscara de mango es adecuado para sintetizar un bioplástico con características adecuadas y de rápida degradación.

3.14.2. Programas por utilizar

A continuación, se establecen los programas utilizados en el trabajo de investigación.

3.14.2.1. Microsoft Word 2016

Mediante este programa se editó y presentó el informe de los resultados obtenidos en el trabajo de investigación.

3.14.2.2. Microsoft Excel 2016

Hoja electrónica que permite automatizar diversas operaciones matemáticas y parámetros estadísticos como media aritmética, desviación estándar y varianza. Además, este programa permite realizar el análisis de varianza de un factor, para la evaluación de las hipótesis.

4. RESULTADOS

Tabla X. Rendimiento porcentual de las formulaciones del bioplástico

| Formulación | Rendimiento porcentual (%) | Desviación estándar |
|-------------|----------------------------|---------------------|
| 1 | 66,91 | 4,771 |
| 2 | 48,69 | 5,355 |
| 3 | 52,87 | 1,823 |

Fuente: elaboración propia, con base en datos calculados en el apéndice.

Tabla XI. Comparación del porcentaje de degradación de las tres formulaciones del bioplástico por método de intemperie

| Formulación | Degradación (%) | Desviación estándar |
|-------------|-----------------|---------------------|
| 1 | 3,150 | 1,101 |
| 2 | 2,350 | 0,973 |
| 3 | 1,330 | 0,614 |

Fuente: elaboración propia, con base en datos calculados en el apéndice.

Tabla XII. **Comparación del porcentaje de degradación de las tres formulaciones del bioplástico por método de agua**

| Formulación | Degradación (%) | Desviación estándar |
|--------------------|------------------------|----------------------------|
| 1 | 15,58 | 0,687 |
| 2 | 15,51 | 1,454 |
| 3 | 14,25 | 0,324 |

Fuente: elaboración propia, con base en datos calculados en el apéndice.

Tabla XIII. **Comparación de prueba de dureza *shore* para las tres formulaciones del bioplástico**

| Formulación | Dureza (Kg/mm²) | Desviación estándar |
|--------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| 1 | 5,855 | 0,3421 |
| 2 | 7,167 | 0,5232 |
| 3 | 7,862 | 0,2121 |

Fuente: elaboración propia, con base en datos calculados en el apéndice.

Tabla XIV. **Comparación de prueba de tensión para las tres formulaciones del bioplástico**

| Formulación | Tensión (Kg/cm²) | Desviación estándar | Presión (Mpa) | Desviación estándar |
|--------------------|------------------------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|
| 1 | 0,4920 | 0,011 | 0,054 | 0,0021 |
| 2 | 0,6431 | 0,028 | 0,065 | 0,0029 |
| 3 | 1,776 | 0,076 | 0,147 | 0,0037 |

Fuente: elaboración propia, con base en datos calculados en el apéndice.

Tabla XV. **Análisis de varianza prueba de degradabilidad**

| Fuentes | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | Fcal | Probabilidad | Fcr |
|---------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------|---------------------|------------|
| Tratamientos | 2,8480 | 2 | 1,4240 | 4,5921 | 0,3298 | 3,9322 |
| Error | 2,6013 | 3 | 0,8671 | | | |
| Total | 5,4493 | 5 | | | | |

Fuente: elaboración propia, con base en datos calculados en el apéndice.

Tabla XVI. **Análisis de varianza prueba de tensión**

| Fuentes | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | Fcal | Probabilidad | Fcr |
|---------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------|---------------------|------------|
| Tratamientos | 2,7025 | 2 | 1,3513 | 6,0459 | 0,3046 | 3,9322 |
| Error | 2,2355 | 3 | 0,7452 | | | |
| Total | 4,9381 | 5 | | | | |

Fuente: elaboración propia, con base en datos calculados en el apéndice.

Tabla XVII. **Análisis de varianza prueba de dureza *shore***

| Fuentes | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | Fcal | Probabilidad | Fcr |
|---------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------|---------------------|------------|
| Tratamientos | 0,6410 | 2 | 0,3205 | 8,5521 | 0,4850 | 3,9322 |
| Error | 1,0339 | 3 | 0,3446 | | | |
| Total | 1,6749 | 5 | | | | |

Fuente: elaboración propia, con base en datos calculados en el apéndice.

Tabla XVIII. **Test de Duncan para prueba de tensión**

| Comparación | Análisis |
|--------------------|-----------------|
| 3 vrs 2 | 5,86 > 3,73 |
| 3 vrs 1 | 4,12 > 3,13 |
| 2 vrs 1 | 0,71 < 2,05 |

Fuente: elaboración propia, con base en datos calculados en el apéndice.

Tabla XIX. **Test de Duncan para prueba de dureza *shore***

| Comparación | Análisis |
|--------------------|-----------------|
| 3 vrs 2 | 1,01 > 0,96 |
| 3 vrs 1 | 0,44 < 0,64 |
| 2 vrs 1 | 0,87 > 0,61 |

Fuente: elaboración propia, con base en datos calculados en el apéndice.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En la tabla X se mostró el rendimiento porcentual obtenido de las distintas formulaciones del bioplástico elaborado. Se observó que la primera formulación presentó el mayor rendimiento, con un valor de 66,91 % promedio de rendimiento, a diferencia de la segunda formulación, la cual presentó un 48,69 % de rendimiento promedio. La diferencia entre los porcentajes se debió a pérdidas ocasionadas por los remanentes de los materiales que se quedaron en los recipientes en los cuales fueron elaborados las distintas formulaciones. También la pérdida de agua y glicerina ocasionada por el proceso de secado al que se sometieron las formulaciones, influyó en la diferencia entre los rendimientos porcentuales de las formulaciones.

La degradación del almidón se debe a los enlaces glucosídicos presentes. La enzima encargada del proceso de degradación es la amilasa, la cual hidroliza los enlaces para posteriormente liberar sacarosa. Para poder evaluar la propiedad de degradación de las formulaciones del bioplástico se realizaron los métodos de intemperie y contacto en agua. En las tablas XI y XII se mostró los resultados obtenidos de las formulaciones por ambos métodos. Los resultados de degradación por el método de intemperie se obtuvieron dentro de un rango entre 1,330 % y 3,150 %. Mientras que en el método por contacto en agua el rango de degradación fue entre 14,25 % y 15,58 %. La diferencia entre los porcentajes de degradación en ambos métodos se basó en que las propiedades del bioplástico dependen de la humedad del ambiente, al estar en contacto con agua de forma permanente y por completo, las muestras tienden a liberar amilosa, lo cual permitió que la acción enzimática ocurriera rápidamente. A diferencia de las muestras en el método de intemperie, las cuales únicamente

están en contacto con aire, se promueve un acceso complicado a la amilosa para la degradación. La degradabilidad por intemperie se produjo por efecto de fotodegradación debido a la combinación de luz solar y radiación ultravioleta que afectó a los aditivos presentes en las formulaciones.

Existen normas internacionales que regulan y miden la velocidad de los procesos de degradación y de biodegradación, tanto en Estados Unidos como en Europa. En Estados Unidos se utiliza la norma ASTM D6400-99, mientras que en Europa se emplea la norma EN 13432. Estas normas establecen que un material puede ser considerado como bioplástico si presenta un porcentaje mínimo de degradación del 15 % a la intemperie, durante un período de 70 días. En la investigación, los resultados de degradación por el método de intemperie del bioplástico elaborado se obtuvieron dentro de un rango entre 1,330 % y 3,150 %. Cabe mencionar que el período de evaluación en este estudio fue de 30 días, por lo que se recomienda extender el período de evaluación para poder relacionar los resultados con las normas anteriormente mencionadas. Esta comparación se realiza con el propósito de proporcionar antecedentes a futuras investigaciones sobre bioplásticos.¹⁰

En la tabla XIII se presentaron los resultados obtenidos para la prueba mecánica de dureza *shore* para las tres formulaciones del bioplástico según normas ASTM. Esta prueba establece la cantidad de kilopondios necesarios para que exista fragmentación exterior en las fibras de una muestra de 1 Kg. La formulación uno presentó el resultado más bajo con un valor de 5,855 Kg/mm², mientras que la formulación tres presentó el resultado mayor con un valor de 7,862 Kg/mm². La formulación dos presentó un valor de 7,167 Kg/mm², la cual no presenta una variación alta con relación a la formulación tres. La diferencia de los valores obtenidos de la formulación dos y tres con respecto a la

¹⁰ LASVISTIDA. *Degradación de materiales plásticos*. p. 17.

formulación uno resulta en la adición de aditivos de CaCO_3 y CaCl_2 , respectivamente. Estos compuestos aumentan la rigidez del bioplástico; por lo tanto, para las formulaciones fue necesario mayor cantidad de kilopondios y establecer una fragmentación exterior en las fibras.

En la tabla XIV se mostraron los resultados de la prueba de tensión o tracción según normas ASTM de las tres formulaciones del bioplástico elaborado; se presentaron los resultados de esfuerzo en dos diferentes dimensionales (Kg/cm^2) y Mpa). Se observó que la formulación uno logró un esfuerzo de $0,4920 \text{ Kg/cm}^2$, siendo el valor menor dentro de las todas las formulaciones. Mientras que las formulaciones dos y tres obtuvieron valores de $0,6431$ y $1,776 \text{ Kg/cm}^2$, respectivamente. Es decir que la tendencia a ruptura de las formulaciones dos y tres fue menor al añadir aditivos que aumentan la resistencia al impacto.

Según las normas ASTM las formulaciones del bioplástico sintetizado presentaron características mínimas de resistencia y rigidez. De acuerdo la norma el valor mínimo de resistencia para los plásticos $0,35 \text{ Kg/cm}^2$, mientras que la rigidez mínima es de $4,50 \text{ Kg/mm}^2$. Dado que las formulaciones cumplen con la norma, estos pueden considerarse para ser utilizados como materiales de empaque. Por ejemplo, para sustituir las bolsas de empaque empleadas en los supermercados.

En la tabla XV se mostraron los resultados del análisis de varianza de la prueba de degradabilidad. Se observó que el valor P es menor que el nivel de significación establecido ($\alpha = 0,05$) y por lo tanto las medias de las formulaciones difieren y las distintas formulaciones tienen efectos significativos en la degradabilidad. De igual manera en la tabla XVI y en la tabla XVII se presentaron los resultados del análisis de varianza de la prueba de dureza y de

tensión, respectivamente. Se mostró que el valor P es menor que el nivel de significación establecido y, por lo tanto en ambas, las medias de las formulaciones difieren, indicando que las formulaciones presentaron efectos significativos en la dureza y en tensión.

Dado que se verificó que las medias de las formulaciones difieren en las pruebas realizadas, se procedió a realizar pruebas de intervalos múltiples de Duncan, con el propósito de identificar las diferencias entre las medias. En la tabla XVIII se mostró los resultados del test de Duncan para la prueba de tensión y se observó que el valor de las diferencias de las medias dos y uno resultó menor que el mínimo intervalo significativo correspondiente, lo cual estableció que no existe diferencias significativas entre las medias de las formulaciones uno y dos. Sin embargo, las demás diferencias de medias presentan un valor P menor a 0,05 (nivel de significación) por lo que resultaron ser mayores que el mínimo intervalo significativo correspondiente; es decir que existen diferencias significativas entre sus medias.

Por último, en la tabla XIX se mostró los resultados obtenidos del test de Duncan para la prueba de dureza *shore*. Se observó que el valor de las diferencias de medias de las formulaciones tres y uno fueron menores que los mínimos intervalos significativos correspondientes. Por lo tanto, no existe diferencia significativa entre dichas medias. A diferencia de las otras medias que presentaron un valor mayor que el mínimo del intervalo significativo correspondiente.

CONCLUSIONES

1. Utilizando tres formulaciones elaboradas a partir del almidón de la cáscara de mango se logró sintetizar un bioplástico con un tiempo de degradación aproximadamente de 30 días.
2. Se determinó un porcentaje de rendimiento del almidón de la cáscara de mango de 66,91 %.
3. El porcentaje de degradación del bioplástico al estar en contacto con agua es mayor que al estar en contacto únicamente con aire, independientemente de la formulación.
4. Se determinó que la propiedad mecánica de dureza del bioplástico aumenta al añadir aditivos como cloruro de calcio y carbonato de calcio, sin presentar diferencia significativa uno del otro.
5. Se determinó a partir del test de Duncan para la prueba de dureza *shore* que el valor de las diferencias de medias de las formulaciones tres y uno fueron menores que los mínimos intervalos significativos correspondientes, por lo que no existe diferencia significativa entre dichas medias.
6. Las diferencias de las medias de los esfuerzos obtenidos de las tres formulaciones son significativas según la prueba de Fisher. La variación en la formulación del bioplástico afecta significativamente la propiedad mecánica de tensión.

7. Se determinó que la diferencia entre los porcentajes de rendimiento de las formulaciones del bioplástico resultó por la pérdida de agua y glicerina ocasionada por el proceso de secado al que se sometieron.

RECOMENDACIONES

1. Realizar los ensayos de degradación durante un periodo de cuarenta y cinco días, con el objetivo de observar mayor degradación en las formulaciones
2. Utilizar distintos aditivos, los cuales presenten diferentes características para obtener distintos resultados en las pruebas mecánicas de tensión y dureza *shore*.
3. Realizar ensayo de degradabilidad mediante método de contacto con ácido de sulfúrico, para evaluar la degradación de las formulaciones en un medio ácido y comparar los resultados con los métodos de intemperie y contacto en agua.
4. Disminuir el porcentaje de glicerina en las formulaciones en un 8 %, lo cual aumentaría la propiedad mecánica de dureza.
5. Elaborar prototipos de vasos y bolsas de las formulaciones que contienen los aditivos de carboximelticelulosa, carbonato de calcio y cloruro de calcio, y evaluar su uso.

BIBLIOGRAFÍA

1. BILLMEYER, Fred. *Ciencia de los polímeros*. España: Reverté, 2004. 581p.
2. BROWN, Roger. *Polymer Testing*. Brasil: ELSEVIER, 2008. 199 p.
3. CAREY, Francis. *Química orgánica*. 6a ed. México: McGraw-Hill, 2006. 1108 p.
4. Centro Guatemalteco de Producción más Limpia. *Reporte nacional de manejo de residuos en Guatemala*. Guatemala: PROARCA, 2004. 33 p.
5. GÁLVEZ AREVALO, Ana Gabriela. *Elaboración de plástico biodegradable a partir del almidón extraído del maíz (Zea mays)*. Trabajo de graduación de Ingeniera Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2016. 461 p.
6. IGUARDIA ARRIVILLAGA, Carlos Humberto. *Síntesis y caracterización de bioplástico a partir de almidón de banano verde (Musa sapientum variedad Cavendish)*. Trabajo de graduación de Químico Farmacéutico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, 2013. 115 p.

7. MCGILVERY, Robert. *Conceptos bioquímicos*. España: Reverté, 1986. 597 p.
8. McMURRY, John. *Química orgánica*. 6a ed. México: Thomson Learning, 2004. 1284 p.
9. MERÉ MARCOS, Javier. *Estudio del procesado de un polímero termoplástico basado en almidón de patata amigable con el medio ambiente*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánico. Universidad Carlos III de Madrid, Facultad de Ingeniería, 2009. 176 p.
10. WALPOLE, Ronald. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. 6ta ed. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1999. 752 p.
11. ZEAPLAST. *Productos biodegradables*. [en línea] <<http://www.zeaplast.cl/plasticos-biodegradables/historia-de-losbioplasticos+-20>> [Consulta: 13 de junio de 2017].

APÉNDICES

Apéndice 1. Metodología de cálculo

A continuación, se describe la metodología de cálculo utilizada para la obtención de los resultados de interés para la experimentación.

- Promedio

Este cálculo se utiliza para calcular la magnitud de valores promedio de una serie de corridas repetitivas.

$$\bar{x} = \frac{\sum_I^N X_I}{N}$$

- Ejemplo: Determinar el promedio de rendimiento porcentual de la formulación uno con los siguientes datos:

x1=71,94 %

x2= 68,29%

x3= 60,51 %

$$\bar{x} = \frac{71,94\% + 68,29\% + 60,51\%}{3}$$

$$\bar{x} = 60,91 \%$$

Continuación apéndice 1.

- Desviación estándar

Este cálculo fue utilizado para determinar la variación entre los valores dados de corridas repetitivas.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (xi - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

- Ejemplo: Determinar la desviación estándar del porcentaje de rendimiento de la formulación uno con los siguientes datos:

$$x_1 = 71,94 \%$$

$$x_2 = 68,29\%$$

$$x_3 = 60,51 \%$$

$$\bar{x} = 60,91 \%$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(71,94 - 60,91)^2 + (68,29 - 60,91)^2 + (60,51 - 60,91)^2}{3 - 1}}$$

$$\sigma = 4,77$$

Continuación apéndice 1.

- Varianza

Representa la variabilidad de una serie de datos respecto a su media.

$$\sigma^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}$$

- Ejemplo: Determinar la varianza de los siguientes datos para la formulación uno del bioplástico.

$x_i = 71,94 \%$

$\bar{x} = 60,91\%$

$n = 3$

$$\sigma^2 = \frac{(71,94 - 60,91)^2 + (68,29 - 60,91)^2 + (60,51 - 60,91)^2}{3 - 1}$$

$$\sigma^2 = 22,75$$

- Rendimiento porcentual

El rendimiento porcentual se determinó de la siguiente forma:

$$\%r = \frac{R_{real}}{R_{teórico}} * 100$$

- Ejemplo: determinar el rendimiento porcentual de la formulación uno del bioplástico con los siguientes datos:

Continuación apéndice 1.

Rteórico= 100 gramos

Rreal= 71,94 gramos

$$\%r = \frac{71,94}{100} * 100$$

$$\%r = 71,94 \%$$

- Porcentaje de degradación

El porcentaje de degradación se determinó de la siguiente forma:

$$\%d = \frac{m_o - m_f}{m_o} * 100$$

- Ejemplo: Determinar el porcentaje de degradación de la formulación uno del bioplástico con los datos obtenidos a partir del método de intemperie.

m_o = 71,94 gramos

m_f = 70,10 gramos

$$\%d = \frac{71,94 \text{ g} - 70,10 \text{ g}}{71,94 \text{ g}} * 100$$

$$\%d = 2,56 \%$$

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Rendimiento porcentual de la formulación uno del bioplástico**

| Formulación #1 | | | |
|-----------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| Corrida | Peso experimental (g) | Peso teórico (g) | Rendimiento porcentual (%) |
| 1 | 71,94 | 100 | 71,94 |
| 2 | 68,29 | 100 | 68,29 |
| 3 | 60,51 | 100 | 60,51 |
| Promedio | 66,91 | - | 66,91 |
| Desviación | 4,77 | - | 4,77 |
| Varianza | 22,72 | - | 22,72 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Rendimiento porcentual de la formulación dos del bioplástico**

| Formulación #2 | | | |
|-----------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| Corrida | Peso experimental (g) | Peso teórico (g) | Rendimiento porcentual (%) |
| 1 | 68,16 | 150 | 45,44 |
| 2 | 84,36 | 150 | 56,24 |
| 3 | 66,60 | 150 | 44,43 |
| Promedio | 73,04 | - | 48,69 |
| Desviación | 8,03 | - | 5,35 |
| Varianza | 64,48 | - | 28,66 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Rendimiento porcentual de la formulación tres del bioplástico**

| Formulación #3 | | | |
|-----------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| Corrida | Peso experimental (g) | Peso teórico (g) | Rendimiento porcentual (%) |
| 1 | 76,54 | 150 | 51,03 |
| 2 | 83,01 | 150 | 55,34 |
| 3 | 78,37 | 150 | 52,25 |
| Promedio | 79,31 | - | 52,87 |
| Desviación | 2,72 | - | 1,82 |
| Varianza | 7,42 | - | 3,30 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Degradabilidad de la formulación uno del bioplástico por método de intemperie**

| Formulación #1 | | | |
|-----------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Corrida | Peso inicial (g) | Peso final (g) | Degradabilidad (%) |
| 1 | 71,94 | 70,1 | 2,56 |
| 2 | 68,29 | 66,78 | 2,21 |
| 3 | 60,51 | 57,67 | 4,69 |
| Promedio | 66,91 | 64,85 | 3,15 |
| Desviación | 4,77 | 4,55 | 1,10 |
| Varianza | 22,72 | 20,71 | 1,20 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Degradabilidad de la formulación dos del bioplástico por método de intemperie

| Formulación #2 | | | |
|-----------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Corrida | Peso inicial (g) | Peso final (g) | Degradabilidad (%) |
| 1 | 68,16 | 67,45 | 1,04 |
| 2 | 84,36 | 82,14 | 2,63 |
| 3 | 66,6 | 64,36 | 3,36 |
| Promedio | 73,04 | 71,32 | 2,35 |
| Desviación | 8,03 | 6,72 | 0,97 |
| Varianza | 64,48 | 45,12 | 0,94 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. Degradabilidad de la formulación tres del bioplástico por método de intemperie

| Formulación #3 | | | |
|-----------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Corrida | Peso inicial (g) | Peso final (g) | Degradabilidad (%) |
| 1 | 76,54 | 76,01 | 0,69 |
| 2 | 83,01 | 81,23 | 2,14 |
| 3 | 78,37 | 77,46 | 1,16 |
| Promedio | 79,31 | 78,23 | 1,33 |
| Desviación | 2,72 | 1,91 | 0,61 |
| Varianza | 7,42 | 3,63 | 0,37 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Degradabilidad de la formulación uno del bioplástico por método contacto en agua**

| Formulación #1 | | | |
|-----------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Corrida | Peso inicial (g) | Peso final (g) | Degradabilidad (%) |
| 1 | 58,04 | 48,77 | 15,97 |
| 2 | 62,25 | 52,19 | 16,16 |
| 3 | 66,57 | 56,83 | 14,63 |
| Promedio | 62,29 | 52,60 | 15,59 |
| Desviación | 3,48 | 2,86 | 0,68 |
| Varianza | 12,13 | 8,18 | 0,46 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Degradabilidad de la formulación dos del bioplástico por método contacto en agua**

| Formulación #2 | | | |
|-----------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Corrida | Peso inicial (g) | Peso final (g) | Degradabilidad (%) |
| 1 | 66,26 | 55,43 | 16,34 |
| 2 | 64,71 | 53,89 | 16,71 |
| 3 | 80,83 | 69,94 | 13,47 |
| Promedio | 70,60 | 59,75 | 15,51 |
| Desviación | 7,26 | 6,26 | 1,45 |
| Varianza | 52,77 | 39,21 | 2,09 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Degradabilidad de la formulación tres del bioplástico por método contacto en agua**

| Formulación #1 | | | |
|-----------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Corrida | Peso inicial (g) | Peso final (g) | Degradabilidad (%) |
| 1 | 70,35 | 60,07 | 14,61 |
| 2 | 74,56 | 63,89 | 14,31 |
| 3 | 67,21 | 57,91 | 13,84 |
| Promedio | 70,71 | 60,62 | 14,25 |
| Desviación | 3,01 | 2,14 | 0,32 |
| Varianza | 9,07 | 4,58 | 0,10 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Formación pasta de bioplástico**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Físicoquímica, Facultad de Ingeniería.

Apéndice 12. **Pasta de bioplástico**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Físicoquímica, Facultad de Ingeniería.

Apéndice 13. **Evaluación de bioplástico por método de intemperie**



Fuente: elaboración propia, Facultad de Ingeniería.

Apéndice 14. **Evaluación de bioplástico por método de contacto en agua**



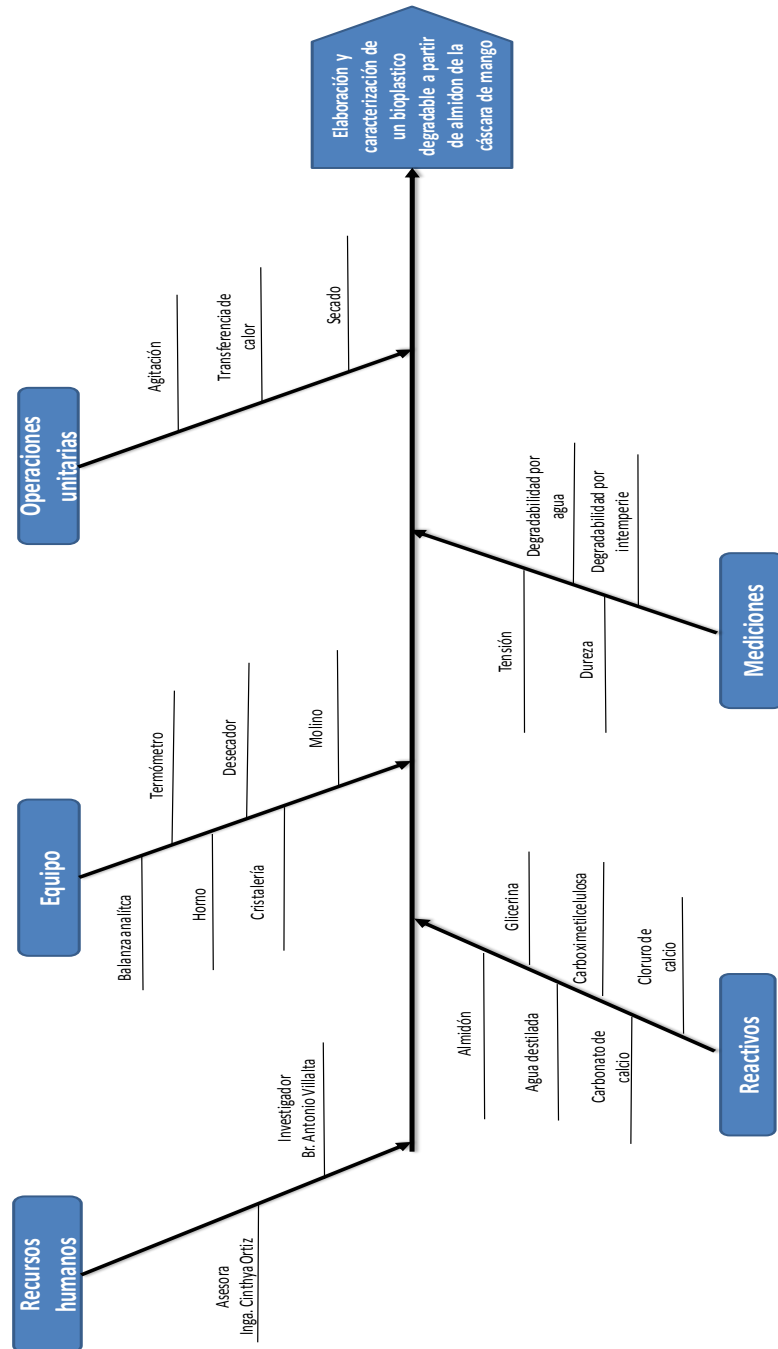
Fuente: elaboración propia, Facultad de Ingeniería.

Apéndice 15. Requisitos académicos

| Carrera | Área | Curso | Temática |
|-------------------------------|-----------------|---------------------------|---|
| Ingeniería Química | Área de Química | Química 4 | Porcentaje masa/masa |
| | | Química orgánica | Nomenclatura de polímeros |
| | | Bioingeniería | Biotecnología |
| | | IQ 5 | Operación unitaria de secado |
| | | Química ambiental | Contaminación ambiental por usos de polímeros |
| | Complementarias | Estadística 1 | Estadística descriptiva |
| | | Ciencia de los Materiales | Propiedades mecánicas de los polímeros |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. Diagrama de causa y efecto Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

