



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

**EVALUACIÓN DE LA BIODEGRADABILIDAD, PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE
UNA ESPUMA SÓLIDA A BASE DE CELULOSA Y ALMIDÓN EXTRAÍDO DE DESECHOS
POSCOSECHA DEL BANANO VERDE (*Musa acuminata* L.).**

Juan Carlos Rojas Castillo

Asesorado por la Inga. Cinthya Patricia Ortiz de Pérez

Guatemala, enero de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA BIODEGRADABILIDAD, PROPIEDADES FÍSICAS Y
MECÁNICAS DE UNA ESPUMA SÓLIDA A BASE DE CELULOSA Y ALMIDÓN
EXTRAÍDO DE DESECHOS POSCOSECHA DEL BANANO VERDE (*Musa
acuminata* L.)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JUAN CARLOS ROJAS CASTILLO

ASESORADO POR LA INGA. CINTHYA PATRICIA ORTIZ DE PÉREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, ENERO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Ing. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Gerardo Ordóñez
EXAMINADOR	Ing. Orlando Posadas Valdez
EXAMINADOR	Ing. Erwin Manuel Ortiz Castillo
SECRETARIA	Ing. 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, PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE UNA ESPUMA SÓLIDA A BASE DE CELULOSA Y ALMIDÓN EXTRAÍDO DE DESECHOS POSCOSECHA DEL BANANO VERDE (*Musa acuminata* L.).

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 28 de julio de 2017.



Juan Carlos Rojas Castillo

Guatemala, 24 de Agosto de 2018

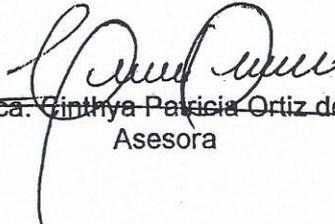
Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Estimado Ingeniero Wong:

Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y dado mi aprobación al informe final del Trabajo de Graduación **“EVALUACIÓN DE LA BIODEGRADABILIDAD, PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE UNA ESPUMA SÓLIDA A BASE DE CELULOSA Y ALMIDÓN EXTRAÍDO DE DESECHOS POSCOSECHA DEL BANANO VERDE (*Musa acuminata* L.)”** del estudiante de Ingeniería Química Juan Carlos Rojas Castillo quien se identifica con el carné número 2013-14496 y CUI 2307505670101.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Atentamente,


~~Inga. Qca. Cinthya Patricia Ortiz de Pérez~~
Asesora

Cinthya Patricia Ortiz Quiroa
Ingeniera Química Col. No. 1190



Guatemala, 08 de octubre de 2018.
Ref. EIQ.TG-IF.046.2018.

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 EIQ-PRO-REG-007 correlativo 014-2017 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: **Juan Carlos Rojas Castillo**.
Identificado con el CUI: **2307 50567 0101**.
Identificado con registro académico: **2013-14496**.
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, PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE
UNA ESPUMA SÓLIDA A BASE DE CELULOSA Y ALMIDÓN EXTRAÍDO DE DESECHOS
POSCOSECHA DEL BANANO VERDE (*Musa acuminata* L.)**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por la Ingeniera Química: **Cinthya 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"

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



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.001.2019

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 estudiante, **JUAN CARLOS ROJAS CASTILLO** titulado: **"EVALUACIÓN DE LA BIODEGRADABILIDAD, PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE UNA ESPUMA SÓLIDA A BASE DE CELULOSA Y ALMIDÓN EXTRAÍDO DE DESECHOS POSCOSECHA DEL BANANO VERDE (*Musa acuminata* L.)"**. 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, enero 2019

Cc: Archivo
CSWD/ale



CAAI

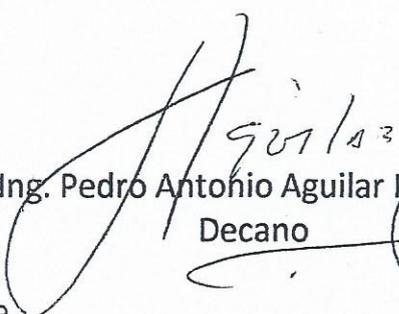




DTG. 011.2019

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, PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE UNA ESPUMA SÓLIDA A BASE DE CELULOSA Y ALMIDÓN EXTRAÍDO DE DESECHOS POSCOSECHA DEL BANANO VERDE (*Musa acuminata* L.)**, presentado el estudiante universitario: **Juan Carlos Rojas Castillo**, 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, enero de 2019

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres

Oscar Estuardo Rojas y María del Rosario Castillo Bekker de Rojas, por dejarme ser y ayudarme a comprender el extraño mundo en el que vivimos; enseñarme de todo a través de viajes y vivencias. Por darle sentido a la palabra hogar, por la naturaleza y lo holístico, a sí y también por todo.

Mis hermanos

Pablo y Alberto, por todas las aventuras, viajes, enseñanzas y risas compartidas. Por los nombres científicos, las fotos “mal enfocadas”, las canciones nuevas y el asiento de la ventana; porque al final de todo, la distancia es relativa.

Mi familia

Siempre presente en mi vida, primos, primas, tíos, abuelas, tías, abuelos, los que se están cerca y los que están lejos, todos marcaron mi vida y me ayudaron a ser lo que hoy en día soy.

Mis amigos

Del colegio, de la Universidad, de la vida, por las risas, las lágrimas, los viajes; en resumen, por estar presentes en los momentos importantes de mi vida. Por compartir o discutir ideales y por pensar que aún se puede salvar el planeta.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser no solo la institución que me brindó estudios y conocimientos para formarme como un profesional, sino que también por brindarme herramientas y experiencias para ser una mejor persona con valores, que puede contribuir con el desarrollo de Guatemala.
Facultad de Ingeniería	Por ser el centro de enseñanza que me brindó las herramientas para desarrollarme como ingeniero y encontrar diversas soluciones a cualquier obstáculo que se atravesara.
Asesora Inga. Cinthya Patricia Ortiz de Pérez	Por su paciencia, consejos, tiempo y experiencias enseñadas, para ayudarme en mi formación profesional y desarrollo de este trabajo.
Laboratorio del Área de Química, Escuela de Ingeniería Química	Por brindarme sus instalaciones y apoyo para realizar la parte experimental de este trabajo de investigación.

	2.1.2.3	Elastómeros.....	12
	2.1.2.4	Fibras	13
2.2		Banano.....	13
2.3		Almidón	15
2.4		Celulosa	15
2.5		Propiedades del almidón y la celulosa como materia prima para bioplásticos	16
2.6		Degradabilidad	16
	2.6.1	Mecanismos de degradabilidad	17
		2.6.1.1 Biodegradabilidad	17
		2.6.1.2 Hidrobiodegradación y fotodegradación	18
		2.6.1.3 Compostabilidad	18
		2.6.1.4 Erodabilidad.....	18
2.7		Plásticos.....	19
	2.7.1	Tipos de plásticos.....	19
		2.7.1.1 Polietileno tereftalato (1-pet)	19
		2.7.1.2 Polietileno de alta densidad (2-pe-hd)	20
		2.7.1.3 Polivinilo de cloruro (3-pvc).....	20
		2.7.1.4 Polietileno de baja densidad (4-pe-ld)	20
		2.7.1.5 Polipropileno	20
		2.7.1.6 Poliestireno (6-ps).....	21
		2.7.1.7 Poliestireno.....	21
	2.7.2	Propiedades del poliestireno	23
	2.7.3	Tipos de poliestireno	23
		2.7.3.1 Poliestireno cristal.....	23
		2.7.3.2 Poliestireno de alto impacto	24

	2.7.3.3	Poliestireno expandido	24
2.8		Problemática ambiental	25
2.9		Bioplásticos	28
2.10		Espuma sólida	29
	2.10.1	Propiedades de los coloides de espuma	30
3.		DISEÑO METODOLÓGICO	31
	3.1	Localización.....	31
	3.2	Variables	31
	3.3	Delimitación del campo de estudio	33
	3.4	Obtención de las muestras	33
	3.4.1	Obtención de materia prima	33
		3.4.1.1 Recolección de banano verde	33
		3.4.1.2 Recolección de papel para celulosa	34
	3.4.2	Extracción del almidón	34
	3.4.3	Elaboración de la espuma sólida	35
	3.5	Diseño de tratamientos	36
	3.6	Recursos humanos.....	36
	3.7	Recursos materiales	36
	3.7.1	Materia prima.....	37
	3.7.2	Cristalería	37
	3.7.3	Reactivos	37
	3.7.4	Equipo	37
	3.8	Técnicas cuantitativas y cualitativas	38
	3.8.1	Técnicas cualitativas	38
		3.8.1.1 Determinación de la apariencia física...38	38
	3.8.2	Técnicas cuantitativas.....	38
		3.8.2.1 Densidad.....	39
		3.8.2.2 Resistencia al fuego	39

3.8.2.3	Determinación de la compresión y deformación mecánica:.....	39
3.8.2.4	Determinación del rendimiento	39
3.8.2.5	Prueba de esfuerzo	40
3.8.2.6	Determinación de biodegradabilidad....	40
3.8.2.6.1	Degradabilidad en intemperie.....	40
3.8.2.6.2	Degradabilidad por agua	41
3.9	Recolección y ordenamiento de la información	41
3.10	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	43
3.11	Análisis estadístico.....	46
3.11.1	Media muestral.....	46
3.11.2	Varianza	46
3.11.3	Desviación estándar	47
3.11.4	Criterio para análisis de varianzas.....	47
3.12	Plan de Análisis de Datos	48
3.12.1	Programas a utilizar para análisis de datos	48
4.	RESULTADOS	49
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	53
	CONCLUSIONES	61
	RECOMENDACIONES	63
	BIBLIOGRAFÍA	65
	APÉNDICES	71

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Estructura química del poliestireno.....	21
2.	Representación de la macromolécula del poliestireno.....	22
3.	Código de colores de las formulaciones de espuma sólida	50
4.	Rendimiento según la formulación de la espuma sólida	50
5.	Relación entre la compresión y formulación de la espuma sólida... ..	51
6.	Relación entre la deformación y la formulación de espuma sólida.....	51

TABLAS

I.	Determinación de variables del proceso de producción de la espuma sólida.....	32
II.	Formulaciones de espuma sólida en gramos	35
III.	Clasificación y estandarización del banano verde por sus propiedades física	41
IV.	Formulaciones de espuma sólida en gramos	42
V.	Densidad de las espumas obtenidas según su formulación.....	42
VI.	Ensayo de degradabilidad a la intemperie y en agua	43
VII.	Determinación del color, olor, textura, densidad y estabilidad térmica de las diferentes formulaciones de espuma sólida.....	44
VIII.	Determinación de compresibilidad y deformación mecánica de las formulaciones de espuma sólida	44
IX.	Porcentaje de degradabilidad a la intemperie y en agua	45
X.	Determinación del porcentaje de rendimiento de la espuma sólida.....	45

XI.	Criterios para el análisis de varianzas.....	48
XII.	Porcentaje de degradación en agua y a la intemperie	49
XIII.	Características físicas de las formulaciones de espuma sólida....	49
XIV.	Porcentaje de rendimiento de las diversas formulaciones.....	50
XV.	Características mecánicas de formulaciones de la espuma sólida.....	51

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Área
β	Biodegradabilidad
cm	Centímetro
cm²	Centímetro cuadrado
cm³	Centímetros cúbicos
ρ	Densidad
σ	Desviación estándar
F	Valor F de prueba
F_{cri}	Valor de F crítica
°C	Grados Celsius
g	Gramos
Kg	Kilogramo
L	Litro
M	Molaridad [moles/litro]
m	Metro
min	Minutos
mL	Mililitro
mm	Milímetro
α	Nivel de significancia
N	Número de datos
%	Porcentaje
%R	Porcentaje de rendimiento
pH	Potencial de hidrógeno

f	Propiedades físicas
q	Propiedades mecánicas
s	Segundo
Σ	Sumatoria
\bar{x}	Valor promedio
x_i	Valor de la muestra
σ^2	Varianza

GLOSARIO

Almidón	Macromolécula compuesta de dos polisacáridos, la amilosa y la amilopectina. Es el glúcido de reserva de la mayoría de los vegetales.
Amilasa	Enzima hidrolasa que tiene la función de catalizar la reacción de hidrólisis de los enlaces 1-4 entre las unidades de glucosa al digerir el glucógeno y el almidón para formar fragmentos (dextrinas, maltosa) y glucosa libre.
Biodegradabilidad	Capacidad de un material de descomponerse en dióxido de carbono, metano, agua y componentes orgánicos, en donde el mecanismo que predomina es la acción enzimática de microorganismos.
Biomasa	Materia orgánica derivada de animales o vegetales.
Bioplástico	Polímero fabricado con materias primas renovables, y que se degrada bajo condiciones ambientales en un período corto.
Celulosa	Biopolímero compuesto exclusivamente de moléculas de β -glucosa, pues es un homopolisacárido. La celulosa es la biomolécula

orgánica más abundante ya que forma la mayor parte de la biomasa terrestre.

Compostabilidad	Habilidad de un material para degradarse biológicamente produciendo dióxido de carbono, agua, compuestos inorgánicos y biomasa a la misma velocidad que el resto de materia orgánica que se está compostando con éste, sin dejar residuos tóxicos visibles o distinguibles.
Degradación	Reducción de un compuesto químico a uno menos complejo, por separación de grupos de átomos.
Esfuerzo	Resistencia que ofrece un área unitaria de un material al aplicarle una carga externa.
Extrusión	Proceso de moldeado de plástico, en el que un flujo continuo con presión, al pasar por un molde, le da la forma deseada.
Hidrobiodegradación	Degradación identificada por fenómenos hidrolíticos y biológicos, simultáneamente o sucesivamente.
Hidrofílico	Propiedad de un material para atraer moléculas de agua.
Monómero	Átomos individuales o pequeñas moléculas que se unen para formar polímeros.

RESUMEN

En la presente investigación a nivel de tesis, se realizó la evaluación de la biodegradabilidad, propiedades físicas y mecánicas de una espuma sólida a base de celulosa y almidón extraído de desechos poscosecha del banano verde (*Musa acuminata* L.), el cual se utilizó como materia prima para extraer el almidón. Mientras que para enriquecer el contenido de celulosa se utilizó hojas recicladas.

La extracción del almidón se realizó por medio de la maceración dinámica y decantación. Para obtener la espuma sólida se utilizaron 4 diferentes formulaciones, variando la relación de celulosa y almidón, siendo el espumante Lauril éter sulfato de sodio, constante en las formulaciones. Estas se mezclaron a alta velocidad y luego se colocaron en moldes donde se secaron durante 6 horas a 60°C. Se tuvo como resultado la formación de 4 formulaciones de espuma sólida. Luego se procedió con la realización de los análisis físicos de olor, color, textura, resistencia al fuego, densidad y rendimiento, también ensayos de compresibilidad, deformación mecánica y degradabilidad a la intemperie y contacto directo con agua.

Se determinó que todas estas características tienen una diferencia significativa de acuerdo a las formulaciones, y que la formulación de espuma sólida con mejores características físicas, de resistencia y mayor biodegradabilidad es la formulación 2 que posee un porcentaje de 62 % de celulosa y 37 % de almidón, cumpliendo así con las características adecuadas para ser una posible sustituta de espumas sólidas no degradables. Por lo que se podría utilizar en la industria para embalaje y como aislante.

OBJETIVOS

General

Evaluar la biodegradabilidad, propiedades físicas y mecánicas de una espuma sólida a base de celulosa y almidón extraído de desechos poscosecha del banano verde (*Musa acuminata* L.).

Específicos

1. Determinar la biodegradabilidad de la espuma sólida a base de celulosa y almidón, proveniente de desechos poscosecha del banano verde.
2. Comparar las propiedades físicas de las diferentes formulaciones de espuma sólida a base de celulosa y almidón, extraído de desechos del banano verde.
3. Identificar el mayor rendimiento obtenido de las diferentes formulaciones de espuma sólida a base de celulosa y almidón, extraído de desechos del banano verde.
4. Comparar las propiedades mecánicas de las diferentes formulaciones de espuma sólida a base de celulosa y almidón, extraído de desechos del banano verde.
5. Indicar la formulación de espuma sólida con mejores características físicas, mecánicas y mayor biodegradabilidad.

HIPÓTESIS

Hipótesis de trabajo

La celulosa proveniente de papel reciclado y el almidón de desechos poscosecha del banano verde (*Musa acuminata L.*) es materia prima adecuada para la síntesis de una espuma sólida biodegradable.

Hipótesis estadística

Hipótesis investigación

Hi1: La biodegradabilidad de la espuma sólida varía significativamente respecto a la cantidad de celulosa y almidón de banano que contenga la formulación.

$$\beta \neq \beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq \dots \beta_n$$

Hi2: El porcentaje de rendimiento obtenido de la espuma sólida varía significativamente respecto a la cantidad de celulosa y almidón de banano que contenga la formulación.

$$\%R \neq \%R_1 \neq \%R_2 \neq \%R_3 \neq \dots \%R_n$$

Hi3: Las propiedades mecánicas de la espuma sólida varían significativamente respecto a la cantidad de celulosa y almidón de banano que contenga la formulación.

$$q \neq q_1 \neq q_2 \neq q_3 \neq \dots q_n$$

Hi4: Las propiedades físicas de la espuma sólida varían significativamente respecto a la cantidad de celulosa y almidón de banano que contenga la formulación.

$$f \neq f_1 \neq f_2 \neq f_3 \neq \dots f_n$$

Hipótesis alternativa

Ho1: La biodegradabilidad de la espuma sólida no varía significativamente respecto a la cantidad de celulosa y almidón de banano que contenga la formulación

$$\beta = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots \beta_n$$

Ho2: El porcentaje de rendimiento obtenido de la espuma sólida no varía significativamente respecto a la cantidad de celulosa y almidón de banano que contenga la formulación.

$$\%R = \%R_1 = \%R_2 = \%R_3 = \dots \%R_n$$

Ho3: Las propiedades mecánicas de la espuma sólida no varían significativamente respecto a la cantidad de celulosa y almidón de banano que contenga la formulación.

$$q = q_1 = q_2 = q_3 = \dots q_n$$

Ho4: Las propiedades físicas de la espuma sólida no varían significativamente respecto a la cantidad de celulosa y almidón de banano que contenga la formulación.

$$f = f_1 = f_2 = f_3 = \dots f_n$$

INTRODUCCIÓN

Los plásticos, actualmente, son un producto que se utiliza para prácticamente toda actividad, generando así una mayor contaminación, ya que los más utilizados son los provenientes del petróleo, generando así, grandes cantidades de este material que contaminan el agua, la tierra, el aire y a los seres vivos. Como se muestra en un estudio publicado por Jambeck en la revista *Science* en el 2015, 275 millones de toneladas métricas de plástico como desecho fueron generados en 192 países costeros en el 2010, con un promedio de ocho millones de toneladas métricas entrando al océano. Sumado a esto se tiene que uno de estos plásticos, el poliestireno, es uno de los principales contaminantes, debido a su casi nula degradación, baja densidad y su bajo costo de producción. Es por esto que se buscan alternativas en elaborar plásticos que se sean biodegradables, utilizando materiales de desecho.

Para la fabricación de los plásticos biodegradables se utilizan distintas materias primas como: celulosas, almidón, aceites, azúcares, entre otras, enfocándose especialmente en el producido por almidón obtenido de tubérculos, raíces, semillas de plantas y frutos, los cuales tienen un alto porcentaje de almidón. Estos materiales solos son perfectos para sustituir algunos tipos de plásticos como el polieuretano, o polietileno, pero el poliestireno, principalmente el inflado presenta una mayor complejidad para ser sustituido por un bioplástico; por lo que se utilizarán diversos materiales para elaborar una espuma sólida mediante el uso de celulosa y almidón proveniente de desechos poscosecha de banano verde (*Musa acuminata* L.).

Es aquí donde entra en escena Guatemala, ya que es un país que cuenta con una gran diversidad natural, tanto de animales como de productos de origen vegetal. Entre estos productos se encuentra que el banano es uno de los productos agrícolas más importantes a nivel nacional, que poseen una gran cantidad de almidón que, dependiendo de la especie y la madurez del mismo, pueden tener entre 50 % a 75 % de almidón.

Además, la producción de banano en Guatemala ha ido aumentando, debido a que es uno de los principales productos de exportación a nivel mundial del país. Esto se muestra claramente en que en el año 2015, de enero a septiembre, las exportaciones de banano, en el país fueron de 580,2 millones de dólares, siendo un volumen de 1 millón 826 kg, según los datos del Banco de Guatemala y la Asociación de Productores Independientes de Banano, siendo además el cuarto máximo ingreso para el país.

Uno de los problemas en las plantas empacadoras es que se rechaza entre el 15 % y el 20 % del banano, debido a que no cumple con los estándares para ser exportado. Al ser Guatemala el tercer mejor exportador de Latinoamérica en cuanto a producción, existen aproximadamente 250,000 kg de banano que es rechazado en un año, lo que representa una gran pérdida para el país, de forma que se busca utilizar los bananos de rechazo y así aprovechar este producto vegetal hasta lo máximo posible.

Las principales ventajas que se pueden tener de los plásticos biodegradables son que la producción no genera contaminación y estos pueden degradarse en el medio ambiente, sirviendo de nutrientes para el mismo, de manera rápida y sin provocar daños; teniendo como principal desventaja, el alto precio del producto final en comparación con el plástico

elaborado con petróleo, lo cual se solucionaría con el aumento de la producción y uso.

Ya que existen muy pocos materiales que pueden utilizarse en lugar de algunos tipos de plásticos como el poliestireno inflado, que sean biodegradables y ecoamigables, el propósito de esta investigación es obtener una formulación de una espuma sólida biodegradable a partir de almidón y celulosa, caracterizándolos físicamente, observando sus propiedades cualitativas y analizando la degradación presentada en un período de treinta días para cada formulación.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1 Antecedentes

El tema de la elaboración de bioplásticos es de importancia a nivel mundial, de manera que la investigación en este ámbito se ha ido incrementando, al igual que el de la utilización de desechos para la elaboración de nuevos productos. Esto se ha presentado debido a la necesidad de innovación tanto de productos finales amigables con el medio ambiente, como de la reutilización de otros productos de desecho como materia prima. De forma que se han realizado diversos estudios del proceso de extracción de almidón de frutas y sus aplicaciones. Asimismo se han desarrollado muchas investigaciones en la formulación de plásticos a través de diversos materiales que son biodegradables. Por lo cual se puede decir que esta investigación se divide en dos temas principales para solucionar estos conflictos; la extracción del almidón de una fuente de desecho y la elaboración de un plástico de alta biodegradabilidad.

Entre los estudios relacionados con la extracción de un almidón a partir de un desecho, está la investigación en el 2010 de Ángela Elizabeth Méndez de la Cruz, que con la ayuda del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYT) de Guatemala elaboró un proyecto llamado: *Evaluación de la extracción de almidón del banano verde (Musa sapientum Variedad Gran Enano) producto de desecho de las industrias bananeras y evaluación de su función como excipiente en la formulación de comprimidos*, donde trabajó con la evaluación de la extracción del almidón del banano verde para su desarrollo, en la formulación de comprimidos; concluyendo que el almidón de banano es

funcional para la industria farmacéutica como agente aglutinante y desintegrante pero, no es funcional como agente antiadherente y relleno. Por lo tanto, el banano verde, producto de desecho de las industrias bananeras, es una fuente alternativa aprovechable para la extracción del almidón en Guatemala.

Ese mismo año en México, Rodolfo Rendón-Villalobos, Edgar García-Hernández, Marisol Güisado-Rodríguez, Rene Salgado- Delgado y Norma A. Rangel- Vázquez realizaron la investigación con el nombre: *Obtención y caracterización de almidón de plátano (Musa paradisiaca L.) acetilado a diferentes grados de sustitución*, donde se tuvo como objetivo la modificación química del almidón con anhídrido acético, variando la concentración del catalizador con el fin de obtener un material biodegradable para su potencial aplicación en diversas industrias, concluyendo que el almidón modificado es una materia prima útil para aplicaciones técnicas, así como también como aditivo o polímero base en la industria química, debido principalmente a su carácter hidrofóbico producto de la acetilación.

En el año 2008, se realizó un estudio titulado *Obtención de almidón a partir de residuos poscosecha del plátano dominico hartón (Musa AAB Simmonds)* elaborada por Miguel Mazzeo, Angela Alzate y Marino Marín en Colombia, donde su principal objetivo fue determinar el mejor método de obtención de extracción de almidón de los residuos poscosecha del banano dominico Hartón (*Musa AAB Simmonds*), comparando los rendimientos obtenidos utilizando los métodos de extracción en seco y otro en vía húmeda, determinando que el método que posee mejor método de extracción fue el húmedo, aunque este tiene mayor costo de inversión en áreas y equipos de proceso, y un mayor impacto ambiental.

En la elaboración de un bioplástico y su nivel de biodegradabilidad está el estudio de Ana Gabriela Gálvez Arévalo de 2016, *Elaboración de plástico biodegradable a partir de almidón extraído del maíz* en el cual elaboró un plástico biodegradable a partir del almidón obtenido del maíz, mediante un proceso de imbibición, utilizando glicerina y urea, que actúan como plastificantes. En este trabajo se varió la proporción de los componentes y la temperatura de trabajo, concluyendo que la temperatura era inversamente proporcional al tiempo de formación del bioplástico. Por otro lado, también se determinó que la mezcla con mayor porcentaje de urea hacía que este plástico tuviera una vida útil más larga, dejando claro que este bioplástico puede competir con los plásticos hechos a base de petróleo como el polietileno, polipropileno y el poliestireno, por las características cualitativas y físicas estudiadas.

En Venezuela en 2013, Maylen Ferrer García, Shirley Marfisi Valladares, José Angel Dangelad Flores, Laura Ceconello y Blanca Rojas de Gáscue desarrollaron la investigación, *Producción de espumas sólidas de celulosa y almidón de yuca*, en la cual se elaboró una espuma sólida de estos materiales, con diversas formulaciones; luego de realizar las pruebas necesarias se concluyó que las propiedades del producto obtenido hacen competitivas las espumas obtenidas a partir del almidón de yuca y papel reciclado, respecto a las espumas importadas disponibles comercialmente, haciendo factible su uso como excelente material aislante y absorbente para diversas aplicaciones en construcción, embalaje y relleno.

También se encuentra la investigación de graduación realizada por Carlos Humberto Iaguardia Arrivillaga realizada en la Universidad de San Carlos de Guatemala en el 2013 llamada *Síntesis y caracterización de bioplástico a partir*

de almidón de banano verde (Musa sapientum variedad Cavendish)., en el cual se determinó que la formulación de un bioplástico a base de almidón, agua destilada, glicerina, carboximetilcelulosa y carbonato de calcio, es la más promisorio de su investigación, debido a que posee características aceptables para realizar un plástico y posee un mayor porcentaje promedio de rendimiento frente al almidón, por lo que se aprovecha más este recurso.

Julie P. Merchán, Diego Ballesteros, Isabel C. Jiménez, Jorge A. Medina y Oscar Álvarez también en Venezuela en el 2009 realizaron un estudio llamado: *Estudio de la biodegradación aerobia de almidón termoplástico (TPS)*. En el cual se analiza la variación de la biodegradación de un plástico a base de almidón variando el porcentaje de plastificante y área superficial, utilizando la norma ASTM D5988-03, determinando que las muestras con mayor contenido de glicerina como plastificante y con mayor área superficial, presentan un mayor porcentaje de degradación durante el tiempo de análisis observado.

En el año 2009, en la Universidad Carlos III de Madrid se realizó un trabajo de graduación titulado: *Estudio del procesado de un polímero termoplástico basado en el almidón de patata amigable con el medio ambiente*. por el estudiante de Ingeniería Técnica Industrial, Javier Meré Marcos, en el que se desarrolla una metodología para obtener el bioplástico a partir del almidón de papa, utilizando cinco distintos plastificantes, los cuales se distribuyeron en treinta y seis mezclas que variaban su composición y las condiciones de trabajo; obteniendo de todas ellas un biopolímero termoplástico opaco y poco flexible.

En Colombia para el año 2007, Juliana Meneses, Catalina María Corrales y Marco Valencia desarrollaron la investigación, *Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca* en el cual se sintetizó

un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca con base en la implementación de la metodología Taguchi como herramienta de diseño de experimentos, determinando que es viable utilizar el almidón de yuca para realizar un producto que no requiera una resistencia a la tracción muy alta y que no deba estar expuesto al agua ni a unas condiciones de humedad elevadas: como recubrimientos plásticos (como cápsulas) o la fabricación de bolsas plásticas, con el fin de tratar de solucionar la no biodegradabilidad de los plásticos convencionales.

Por otro lado, también P. Cinelli, E. Chiellini, J. W. Lawton y S.H. Iman en Estados Unidos para el año 2005 publicaron la investigación con el nombre de *Foamed articles based on potato starch, corn fibers and poly(vinyl alcohol)* cuya traducción es *Artículos espumosos a base almidón de papa, fibras de maíz y alcohol polivinílico*, donde se elaboraron productos espumados a base de almidón de papa, fibras de maíz y alcohol polivinílico, tales como platos; concluyendo que las fibras de maíz añadidas al almidón incrementaron el tiempo de preparación y el volumen de las bandejas de almidón producidas, al igual que redujeron las propiedades mecánicas. Pero el acetato de polivinilo añadido disminuyó las propiedades de tensión e incrementó la fuerza, flexibilidad, y la resistencia al agua de las bandejas preparadas a base de almidón.

M.C. Katiushka Arevalo Niño(1993) llevo a cabo la investigación llamada *Elaboración de bioplásticos a partir de polisacáridos y de la biodegradación de estos a nivel laboratorio y campo*, donde se utilizaron de 5 diversos grupos de polisacáridos que contenían almidón, quitina, pululan, pectina y polietileno de baja densidad (PEBD) y etileno ácido copolímero (EAA). Las propiedades físico-mecánicas de porcentaje de elongación y fuerza de tensión de estas membranas no fueron comparables con los controles, donde se obtuvo

membranas poco flexibles y débiles para el grupo de almidón, suaves y débiles para quitina y duras y quebradizas para pectina. Pero el polietilenglicol incrementó el porcentaje de elongación, sin afectar el porcentaje de biodegradabilidad. Este porcentaje se midió en tres sistemas: laboratorio, río y en el suelo, mediante la pérdida de peso, espectroscopía de infrarrojo, microscopía electrónica de barrido y resonancia magnética nuclear. Donde se obtuvo que la que mayor degradación obtenida era del grupo de la pectina seguido del almidón y la quitina.

1.2 Justificación

La contaminación ambiental es uno de los principales problemas que se están enfrentando en la actualidad, que dentro de sus efectos pueden mencionarse, a nivel económico, el alto costo del tratamiento de los contaminantes; como a nivel ambiental, el deterioro de los ecosistemas naturales debido a la persistencia de los contaminantes y sus derivados a lo largo del tiempo, principalmente en las fuentes de agua. Sus consecuencias han ido incrementando en los últimos años, principalmente por el desmedido uso plásticos y combustibles fósiles en la elaboración de casi cualquier material. De manera que es necesario encontrar diversas formas para reducir los contaminantes y tratar de crear nuevos productos que sean menos contaminantes del ambiente.

Partiendo de que en la actualidad los plásticos son la principal forma de contaminación de sólidos en el ambiente, siendo el poliestireno uno de los contaminantes principales debido al bajo costo de producción, al tiempo de degradación, que puede llegar a cientos de años, y la dificultad que existe reutilizar este material, la utilización de materiales biodegradables para la fabricación de plásticos se ha convertido en una tendencia que busca la

innovación de combinar la creación de productos para las comodidades de las poblaciones, de fácil degradación y que contribuyan a la conservación de los recursos naturales. De esta forma se pretende reducir la contaminación generada por el uso desmedido de estos materiales contaminantes y de una sociedad que aún no practica y comprende del todo la cultura de reciclaje y reutilización.

De forma que esta investigación busca elaborar un producto que tenga las características necesarias y sea amigable con el medio ambiente. Se buscó un material para reducir y reutilizar los residuos sólidos, a partir del aprovechamiento de los desechos poscosecha del banano verde para la elaboración de una espuma sólida, usando esa materia prima debido a su alto porcentaje de almidón de hasta 75 % y que hay aproximadamente un 20 % de banano rechazado en la producción en Guatemala, debido a que presentan una alternativa viable por el potencial ahorro en energía, agua potable y materias primas indispensables para favorecer una economía sostenible.

1.3 Determinación del problema

La elaboración de una espuma sólida biodegradable a base de celulosa y almidón extraído de desechos poscosecha del banano verde se presenta como una posible solución a un problema muy grande de contaminación que envuelve a todo el mundo, por lo que se delimitará de una forma más específica a continuación.

1.3.1 Definición

La contaminación es uno de los mayores problemas que han ido incrementando con el desarrollo de la tecnología y la industrialización, donde en

cada avance tecnológico también incrementa la contaminación, tanto en los continentes como en los océanos y fuentes de agua, siendo los plásticos la principal forma de contaminación de sólidos en el ambiente, situando al poliestireno inflado como uno de los mayores contaminantes. Uno de los mayores inconvenientes que tiene, es su tiempo de degradación ya que puede tardar cientos de años en degradarse; a pesar de esto, es altamente utilizado debido a sus características físicas y mecánicas, que junto a su bajo costo lo hacen prácticamente irresistible. Pero este material no solo tarda en degradarse, sino que también su reciclaje es casi nulo, por el volumen que ocupa respecto a su peso y el alto costo que esto conlleva. Por lo que el problema de la contaminación aumenta existiendo muy pocos materiales alternativos para disminuir el uso de este tan contaminante material.

1.3.2 Delimitación

El estudio se limita a la extracción del almidón proveniente de desechos poscosecha del banano verde producido en Guatemala y la realización de las pruebas de densidad, rendimiento, biodegradabilidad, compresibilidad, deformación mecánica, estabilidad térmica, densidad y porosidad, para la caracterización física y mecánica de la espuma sólida realizada de celulosa y el almidón extraído del desecho poscosecha del banano verde.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Polímeros

Estos son macromoléculas, formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros, que se distinguen por tener un alto peso molecular. Los polímeros poseen alto peso molecular debido a que este se debe multiplicar por su grado de polimerización, obteniendo que los polímeros utilizados comúnmente en la industria lleguen a tener un peso molecular de hasta 1 000 000. Estos forman largas cadenas que se unen entre sí por fuerzas de Van der Waals, puentes de hidrógeno o interacciones hidrofóbicas. Por lo general, la unidad que se repite es equivalente al monómero del que se forma el polímero.

Las propiedades de estos difieren bastante de las pequeñas moléculas comunes, esto y el alto peso molecular permite que tengan fuerzas entre los enlaces suficientemente grandes que generan las principales características como la resistencia, la estabilidad y otras propiedades mecánicas.

2.1.1 Clasificación de los polímeros

Un polímero puede clasificarse de diferentes formas, ya sea según el tipo de reacción, la estructura, el crecimiento de la macromolécula y sus propiedades.

2.1.1.1 Polímeros según el tipo de reacción

- Polímeros por condensación: Los monómeros que reaccionan tienen un grupo funcional reactivo en cada extremo de la molécula y la unión entre los monómeros requiere la pérdida de una molécula pequeña, normalmente agua.
- Polímeros de adición: Se genera una partícula reactiva a partir de un monómero y esta se adiciona a otro monómero repetitivamente hasta formar el polímero deseado.

2.1.1.2 Polímeros según su estructura

- Polímeros lineales: en estos las unidades monoméricas se unen a otras formando cadenas sencillas, por lo cual son cadenas muy largas y delgadas.
- Polímeros ramificados: polímeros cuya cadena principal está conectada lateralmente con otras cadenas secundarias, tiene una gran cantidad de moléculas unidas, pero sus cadenas son más cortas y gruesas debido a que están conectadas lateralmente.
- Polímeros dendrímeros: estos polímeros están constituidos por moléculas esféricas que se sintetizan por etapas para formar capas de funcionalidad orgánica similares a las de una cebolla. Cada una de las capas sucesivas tiene un número mayor de sitios funcionales para unirse a otras moléculas.¹

¹ SKOOG, Donald. *Química Analítica*. p. 95

- Polímeros en escalera: Son polímeros que están formados por una secuencia de anillos interconectados, dejando poco lugar de esta forma a la rotación debido a los enlaces y las restricciones estéticas, de manera que el resultado son moléculas rígidas.
- Polímeros con entrelazamiento: Son polímeros en donde se unen transversalmente, gracias a enlaces covalentes, cadenas lineales adyacentes, dando lugar a formas que aparentan un entrelazamiento, surgiendo de allí su nombre.
- Polímeros en estrella: varias cadenas de polímero están unidas a un mismo centro, que puede ser un solo átomo o un grupo químico. Se sintetiza con un indicador polifuncional o por reacción de un polímero preformado de grupos reactivos terminales con una molécula multifuncional.

2.1.1.3 Polímeros según el crecimiento de la macromolécula

- Polímeros por crecimiento en cadena: Son producidos mediante la polimerización de una reacción en cadena, donde se adiciona un iniciador a un enlace doble carbono – carbono de un sustrato insaturado para producir un intermediario reactivo que reacciona con una segunda molécula.
- Polímeros de crecimiento por pasos: Se da una reacción por crecimiento en etapas, donde las cadenas en crecimiento reaccionan entre sí para formar cadenas más largas.

2.1.2 Propiedades de los polímeros

Los polímeros no difieren mucho de otras moléculas orgánicas. La química de los polímeros es similar a la de la unidad repetitiva, mientras que las propiedades físicas son la diferencia principal entre las moléculas orgánicas pequeñas y las grandes. Los polímeros se clasifican generalmente en cuatro categorías según su comportamiento físico, los cuales se explican a continuación:

2.1.2.1 Termoplásticos

Son los polímeros que permiten una deformación cuando son calentados varias veces; es decir, que se reblandecen por efecto de la temperatura, pudiéndose conformar varias veces por efecto de la presión y de la temperatura. Cuando están a temperatura ambiente son rígidos. Estos materiales pueden ser reciclables.

2.1.2.2 Termoestables

Son los polímeros que al ser moldeados ya no permiten cambiar su forma, es decir, que al ser calentados ya no permiten deformación, debido a que molecularmente están entrecruzados. Estos materiales no se pueden reciclar.

2.1.2.3 Elastómeros

Son polímeros amorfos con dobles enlaces a lo largo de la cadena, pero reticulados en menor extensión, por lo que pueden sufrir deformaciones elásticas fácilmente sin que se modifique su estructura. El ejemplo más común es el hule natural.

2.1.2.4 Fibras

Son hebras delgadas producidas por extrusión de un polímero fundido a través de pequeños orificios en una matriz; después se enfrían y extraen. Tienen una alta resistencia a la tensión. Por ejemplo el nylon y el dacrón.²

2.2 Banano

Se le considera originario de las regiones tropicales y húmedas de Asia. Según la variedad de la planta del banano alcanza de 3 hasta 7 metros de altura; constituye una planta herbácea, perenne. Su tallo está formado por pecíolos de hojas curvadas y comprimidas, dispuestas en bandas en espiral que desde el centro van formándose sucesivamente nuevas hojas y al extenderse comprimen hacia el exterior las bases de las hojas más viejas. Al emerger las hojas por la parte superior del tallo, se van desarrollando hasta alcanzar 2 o más metros de largo, 60 centímetros o más de ancho, con una nervadura central que divide la hoja en dos láminas.

A los 10 meses después de sembrados los rizomas aparece el botón floral, entre el cilindro de hojas y su largo pedúnculo se arquea completamente. Este botón floral puede estar formado por flores femeninas y masculinas, abortivas, es decir, que no hay fecundación, formándose los frutos por ensanchamiento del ovario. Puede haber hasta 400 o más flores en un botón floral, estando dispuestas en grupos (manos) de 6 a 20, formándose hasta 10 o más grupos por racimo. Al principio, las flores están dispuestas hacia abajo y conforme se van desarrollando los frutos se curvan hacia arriba. De acuerdo con la variedad un racimo puede llegar a tener 100 a 400 frutos; cada uno llega

² GÁLVEZ ARÉVALO, Ana Gabriela. *Elaboración de plástico biodegradable a partir de almidón extraído del maíz*. p. 7

a tener de 8 a 20 centímetros de largo con un peso entre 1 y 4 onzas. A los 14 meses después de la siembra de los rizomas o 4 meses después de aparecer la yema floral, los racimos están listos para ser cosechados.

El mercado de banano en el mundo es el de consumo en fresco. Una cantidad mínima se destina a procesos industriales para la obtención de productos alimenticios. En general el banano puede ser utilizado industrialmente como materia prima para la obtención de productos como bananos pasos o bananos deshidratados, o secados, en almíbar, cremas, postres, pulpas, purés, compotas, mermeladas, conservas, harinas, hojuelas, fritos, jarabe, confitados y congelados, liofilizados, etanol, jaleas, bocadillo, néctares, jarabe de glucosa y fructosa, saborizantes y aromatizantes, dulce elaborado de su cáscara, alimento para el ganado y otros animales. Los deshechos fibrosos del cultivo también sirven como materia prima para la elaboración de pulpas celulósicas, almidón y productos químicos.

Los subproductos o abonos orgánicos que proceden del vástago se incorporan a la plantación y los residuos que se generan en la cosecha, fibras y papel a base de los pseudo tallos, alcohol, aguardiente, vino, vinagre de la fermentación de la fruta. En otros países se está manejando el uso de los residuos de cosecha para la elaboración de gas biológico, láminas de cartón, material para embalaje y pita.

El banano es una fruta para consumo fresco. El área de producción en Guatemala se estima 16 100 a 17 800 Hectáreas al año por una producción de 940 388 toneladas métricas en el año 2 003. Aunque se cosecha durante todo el año, los meses de mayor producción son febrero, marzo, abril y mayo. Izabal y Escuintla son los departamentos con mayor producción en el país.

La producción de banano constituye uno de los rubros de importancia económica para Guatemala en materia de exportación como generador de divisas. La producción exportada a los mercados de Estados Unidos, Europa y Arabia Saudita en el año 2 002 alcanzo los US \$ 217 427 000; ocupando el sexto lugar mundial en exportaciones de este producto. Esta producción proviene especialmente de empresas agroexportadoras ubicadas en Izabal y la Costa Sur. Además de que pequeñas unidades productoras abastecen el mercado local para consumo interno y centroamericano.

2.3 Almidón

El almidón es un compuesto de almacenamiento que se localiza en raíces, tubérculos, frutas y semillas de las plantas. Es un polisacárido sintetizado a partir del dióxido de carbono (CO_2) que toman las plantas de la atmósfera y del agua que toman del suelo, formado por una mezcla de dos sustancias; amilasa y amilopectina.³

2.4 Celulosa

La celulosa es el principal componente de las paredes celulares de los árboles y otras plantas. Es una fibra vegetal cuya longitud y espesor varía según el tipo de árbol o planta, al igual que el contenido de celulosa varía según el tipo de árbol o planta que se considere.

Desde el punto de vista bioquímico, la celulosa $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ con un valor mínimo de número de carbono (n) igual a 200, es un polímero natural, constituido por una larga cadena de carbohidratos polisacáridos. La estructura

³ MENESES, Juliana; CORRALES, Catalina María; VALENCIA, Marco. *Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca*. p.60

de la celulosa se forma por la unión de moléculas de β -glucosa a través de enlaces β -1,4-glucosídico, lo que hace que sea insoluble en agua. La celulosa tiene una estructura lineal o fibrosa, en la que se establecen múltiples puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de distintas cadenas yuxtapuestas de glucosa, haciéndolas muy resistentes e insolubles al agua. De esta manera, se originan fibras compactas que constituyen la pared celular de las células vegetales, dándoles así la necesaria rigidez.⁴

2.5 Propiedades del almidón y la celulosa como materia prima para bioplásticos

El almidón es una materia prima que tiene propiedades termoplásticas cuando se realiza la disrupción estructural a nivel molecular. La estructura ramificada de la amilopectina generalmente le da 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. La síntesis de la copolimerización e injertación de monómeros tales como acrilonitrilo, generan un precursor de fibras acrílicas utilizadas en la preparación de compuestos de almidón más polímero, los cuales son también biodegradables.⁵

2.6 Degradabilidad

Es la capacidad de descomposición química o biológica de una sustancia o materia, ya sea orgánica o inorgánica. La degradabilidad depende tanto de los

⁴ CARREÑO VELASCO, Solly Margareth. *Obtención de acetato de celulosa a partir de residuos celulósicos postconsumo*. p.25.

⁵ IGUARDIA ARRIVILLAGA, Carlos Humberto. *Síntesis y caracterización de bioplástico a partir de almidón de banano verde (Musa sapientum variedad Cavendish)*. p. 9.

factores ambientales como de la estructura química de la materia prima y del producto final.

2.6.1 Mecanismos de degradabilidad

Existen muchos casos en los que a distintos tipos de materiales, se les añade algún plastificante o antioxidante durante su fabricación para obtener propiedades específicas deseadas. Esta desintegración o degradación de los materiales en el medio ambiente se da principalmente por alguno de los cuatro principales mecanismos de degradabilidad.

2.6.1.1 Biodegradabilidad

La biodegradabilidad es definida en la norma ASTM D como la capacidad de un material de descomponerse en dióxido de carbono, metano, agua y componentes orgánicos, en donde el mecanismo que predomina es la acción enzimática de microorganismos. Un polímero es biodegradable si su degradación resulta de la acción natural de microorganismos como bacterias, hongos o algas.

Existen dos tipos de biodegradación, la aerobia y la anaerobia. La biodegradación anaerobia es la que no necesita oxígeno, de forma que sus productos resultantes son biomasas, metabolitos intermedios, metano y compuestos inorgánicos. Mientras la biodegradación aerobia es la que se da cuando hay oxígeno presente, tiene productos resultantes dióxido de carbono, agua, biomasas y compuestos inorgánicos.

El grado de biodegradación de cada material depende de muchos diversos factores, los principales mencionables son: presencia de microorganismos, aire,

humedad y minerales necesarios, con una temperatura agradable variable para cada tipo de microorganismo (entre 20 °C y 60 °C) y un valor neutro de pH aproximadamente entre 5,5 y 8.

2.6.1.2 Hidrobiodegradación y fotodegradación

Estos polímeros tienen en común su descomposición en dos fases, una hidrólisis inicial en el caso de los hidro-biodegradables y una fotodegradación inicial en el caso de los foto-biodegradables. A esta primera fase le sigue un proceso posterior de biodegradación.⁶

2.6.1.3 Compostabilidad

La compostabilidad es un proceso de oxidación biológica de un material en el que se coloca el material en contenedores metálicos por un período de tiempo de doce semanas y una temperatura de 50 °C, en el cual ha de cumplir varios requisitos, referidos a su composición (límites en el contenido de metales pesados y otras sustancias tóxicas), biodegradabilidad (degradación química), capacidad de desintegración (degradación física) y calidad del compost obtenido para poder ser tomado como un material compostable.

2.6.1.4 Erodabilidad

Algunos plásticos no son degradados por acción biológica. La desintegración en este caso se puede producir en el medio ambiente por disolución en agua, llamada descomposición oxidativa o por descomposición

⁶ MENESES, Juliana; CORRALES, Catalina María; VALENCIA, Marco. *Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca*. p.61.

fotolítica por los rayos UVA provocados por la radiación solar. Estos son procesos abióticos, producidos al margen de seres vivos.

2.7 Plásticos

Se define a un plástico como aquel material que se fabrica a partir de un polímero (obtenido del petróleo), por lo general haciéndolo fluir bajo presión. Los plásticos son típicamente ligeros y químicamente inertes y pueden ser fabricados para ser rígidos, flexibles e impermeables. Como resultado de estas características, los plásticos han reemplazado al papel, vidrio y metal en muchas aplicaciones, además, estos tienen una larga vida y son resistentes a la degradación en ambientes naturales.⁷

2.7.1 Tipos de plásticos

Los plásticos por lo general son sintéticos derivados de la industria petro química, aunque también hay alternativas, plásticos parcialmente naturales, biodegradables que son más respetuosos con el medio ambiente. A continuación se mencionan los principales provenientes de la industria petroquímica:

2.7.1.1 Polietileno tereftalato (1-pet)

Es un plástico de alta calidad que se utiliza en embotellado y envasado, siendo prácticamente el único cuyo reciclaje es rentable. Se utiliza principalmente para elaboración de botellas de refrescos.

⁷ AREVALO NIÑO, Katiushka. *Elaboración de plásticos biodegradables a partir de polisacáridos y su estudio de biodegradación a nivel laboratorio y campo*. p.100.

2.7.1.2 Polietileno de alta densidad (2-pe-hd)

Es un plástico de gran resistencia y durabilidad en forma laminar, ideal para productos de vida media-larga. Su reciclaje es viable pero tiene un alto costo. Se utiliza principalmente para elaborar botellas de detergentes, productos en forma de láminas y bolsas.

2.7.1.3 Polivinilo de cloruro (3-pvc)

Posee una gran capacidad de combinación con diversos productos químicos, lo que lo hace útil para casi todo tipo de usos. Una de sus principales desventajas es que es muy difícil de reciclar. Se utiliza principalmente para la elaboración de recipientes domésticos y de comida, tuberías, etc.

2.7.1.4 Polietileno de baja densidad (4-pe-ld)

Es un plástico duro y resistente, pero de calidad baja. Su principal problema es que no es reciclable. Se utiliza mayormente para la elaboración de cajas para botellas, valijas, tapas y etiquetas.

2.7.1.5 Polipropileno

Es un plástico semirrígido, traslúcido, con buena resistencia química, duro y buena resistencia al calor. Se utiliza en la elaboración de bandejas de comida, envases microondas, envases alimentarios, fibras para alfombras, revestimientos de paredes y tapicería.

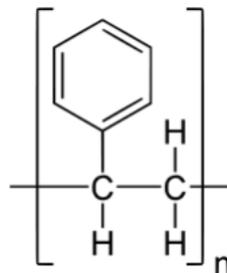
2.7.1.6 Poliestireno (6-ps)

Es plástico liviano ideal como aislante térmico y acústico. Este no es reciclable, lo que lo hace un gran contaminante al ambiente. Sus usos principales van desde envases de yogur, cubiertos de plástico, embalajes de protección para productos electrónicos, material aislante en la construcción, hasta artículos moldeados por inyección.⁸

2.7.1.7 Poliestireno

El Poliestireno se designa con las siglas PS., estructuralmente, es una cadena larga de carbono e hidrógeno, con un grupo fenilo unido cada dos átomos de carbono. Es producido por una polimerización vinílica de radicales libres a partir del monómero de estireno. A temperatura ambiente, el poliestireno es un sólido termoplástico que puede ser derretido a altas temperaturas para moldearlo por extrusión y después resolidificarlo. El monómero utilizado como base en la obtención del poliestireno es el estireno (vinilbenceno). La fórmula del poliestireno es:

Figura 1. Estructura química del poliestireno

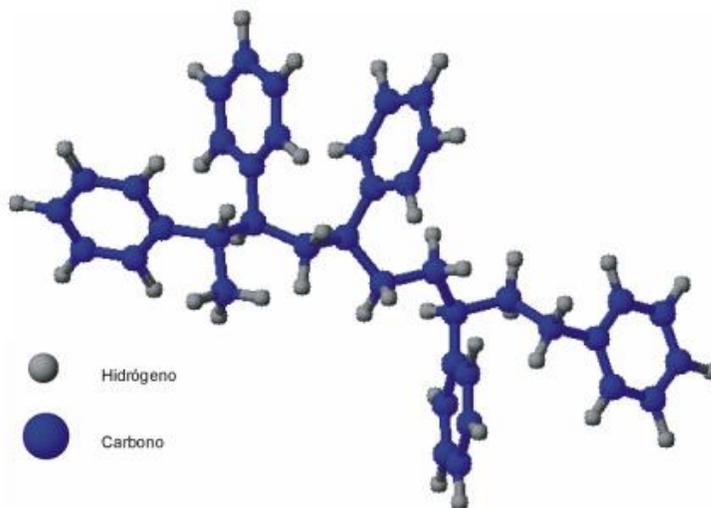


Fuente: PARRES, Francisco. *Investigación de las variables limitantes en la recuperación de residuos de poliestireno procedentes del sector envase*. p. 17.

⁸ AREVALO NIÑO, Katiushka. *Elaboración de plásticos biodegradables a partir de polisacáridos y su estudio de biodegradación a nivel laboratorio y campo*. p.101.

Es un polímero orgánico termoplástico que se obtiene a partir de la polimerización del estireno. Existen 4 tipos principales: el PS cristal, que es transparente, rígido y quebradizo; el poliestireno de alto impacto, resistente y opaco, el poliestireno expandido, muy ligero, y el poliestireno extrusionado similar al expandido pero más denso e impermeable. Las aplicaciones principales del PS choque y el PS cristal, son la fabricación de envases mediante extrusión-termoformado, y de objetos diversos mediante moldeo por inyección. Las formas expandidas y extruidas se emplean principalmente como aislantes térmicos en construcción.⁹

Figura 2. **Representación de la macromolécula del poliestireno**



Fuente: PARRES García, Francisco. *Investigación de las variables limitantes en la recuperación de residuos de poliestireno procedentes del sector envase*. p. 17.

⁹ CÓRDOVA RECIÑOS, Oscar Giovanni. *Elaboración de una resina de intercambio iónico a partir de la sulfonación y entrecruzamiento de poliestireno expandido reciclado para la separación de iones metálicos en solución*. p. 120

2.7.2 Propiedades del poliestireno

El poliestireno presenta enlaces covalentes que mantienen unidas a las moléculas de los monómeros, también suelen producirse interacciones intermoleculares e intramoleculares que influyen en las propiedades físicas del polímero, las cuales difieren a las presentadas en la molécula del estireno inicial. El poliestireno tiene muchas características que lo hacen atractivo para su uso en múltiples situaciones, como elasticidad, cierta resistencia al ataque químico, buena resistencia mecánica, térmica y eléctrica, además de una baja densidad. Es un polímero termoplástico, por lo que se ve reflejado en sus fuerzas intermoleculares, las cuales son muy débiles y, al calentar las cadenas, pueden moverse unas con relación a otras y el polímero puede moldearse. Cuando el polímero se enfría, vuelven a establecerse las fuerzas intermoleculares pero entre átomos diferentes, cambiando así la ordenación de las cadenas.

2.7.3 Tipos de poliestireno

Hay muchos tipos de poliestireno, que se crearon con diferentes métodos, los cuales tienen diversas características para cumplir con ciertas necesidades como se muestra a continuación:

2.7.3.1 Poliestireno cristal

Es el producto de la polimerización del estireno puro, también se le denomina poliestireno de uso general. Es un sólido transparente, frágil y duro, cuando se encuentra por debajo de los 100 °C es vítreo. Por encima de esta temperatura, es fácilmente procesable y puede dársele múltiples formas.

2.7.3.2 Poliestireno de alto impacto

Para mejorar la resistencia mecánica del material, se puede añadir en la polimerización hasta un 14% de caucho (casi siempre polibutadieno). El producto resultante se llama poliestireno de alto impacto (HIPS, *High Impact Polystyrene*, siglas en inglés). Es más fuerte, no quebradizo y capaz de soportar impactos más violentos sin romperse. Su inconveniente principal, es su opacidad, si bien algunos fabricantes venden grados especiales de poliestireno choque translúcido. El poliestireno de alto impacto, es un polímero que se caracteriza por su mejor resistencia al impacto que el poliestireno sin modificar. Es opaco, debido a la adición de polibutadieno. Muy buena procesabilidad, es decir, se puede procesar por los métodos de conformado empleados para los termoplásticos, como inyección y extrusión.

2.7.3.3 Poliestireno expandido

El EPS (siglas en inglés) o poliestireno expandido también forma parte de esta familia de plásticos. Este plástico consiste en un 5 % de gas en forma de burbuja y 95 % de poliestireno, de tal forma que la mezcla reduce la densidad de este tan preciado material. Es principalmente aplicado como aislante en construcción, además de su uso para el embalaje de productos frágiles. El poliestireno expandido tiene una gran ventaja frente a muchos otros tipos de plásticos ya que es estable frente a muchos productos químicos, lo cual lo hace muy utilizado a pesar de la dificultad que hay para reciclarlo.¹⁰

¹⁰ CORDOVA RECINOS, Oscar. *Elaboración de una resina de intercambio ionico a partir de la sulfonación y entrecruzamiento de poliestireno expandido reciclado para la separación de iones metálicos en solución*. p. 58.

2.8 Problemática ambiental

Como ya se mencionó, los plásticos son materiales formados por moléculas muy grandes de cadenas de átomos de carbono e hidrógeno, a los cuales se les llama polímeros. Estos polímeros se obtienen, tanto a nivel de fuentes renovables como no renovables. El 99 % de la totalidad de plásticos se produce a partir de combustibles fósiles, lo que provoca una excesiva presión sobre las limitadas fuentes de energía no renovables.

En la actualidad resulta muy complicado prescindir de los plásticos debido a su alta utilidad en muchos aspectos industriales, además de la importancia económica que han ido desarrollando. Esto se observa claramente en los índices de crecimiento de esta industria que desde principios del siglo pasado supera a casi todas las actividades industriales. Pero no es una casualidad que estos índices hayan ido aumentando de una forma tan grande. Este crecimiento se debe a los bajos costos de producción que se tienen y a las ganancias que estos productos generan. Debido a que estos plásticos se utilizan para embalajes, para envasar, conservar y distribuir alimentos, medicamentos, bebidas, agua, artículos de limpieza, de tocador, cosmetología y un gran número de otros productos que pueden llegar a la población en forma segura, higiénica y práctica. De forma que se han convertido en uno de los productos más necesarios en la industria actual.

Es inevitable decir que los plásticos son muy útiles y diversos; sin embargo, los residuos plásticos generan diferentes impactos en el ambiente. Y así como la producción de los plásticos en los últimos años es creciente, la preocupación ambiental por los residuos que estos ocasionan también ha ido incrementando. Esta preocupación se centra en cuatro grandes factores; la creciente producción de diferentes productos plásticos, al igual que la

generación de residuos; su principal materia prima es no renovable, el petróleo; y algunos de los químicos utilizados para producir los plásticos son tóxicos. De forma que es importante mencionar que los impactos producidos por los plásticos no pueden ser valorados de acuerdo a criterios económicos exclusivamente, ya que hay un desconocimiento de la resiliencia, regeneración y recuperación de los ecosistemas afectados por los residuos plásticos. A nivel mundial el principal impacto ambiental de los residuos plásticos es la contaminación de los océanos y mares. Es un impacto acumulativo que se presenta a largo plazo y cubre gran cantidad de espacios de todo el planeta. Se han encontrado cantidades substanciales de residuos plásticos contaminando los *hábitats* marinos desde los polos hasta el ecuador, desde costas remotas inhabitadas hasta costas altamente pobladas y áreas profundas del océano.¹¹

El bajo peso del plástico, que es una ventaja en las etapas de distribución y consumo del producto plástico, se convierte en una problemática ambiental cuando los residuos plásticos navegan por corrientes subterráneas, ríos, mares y océanos. Es tal la acumulación de residuos plásticos en los océanos, que en el centro del océano Pacífico del Norte, entre Japón y California, existe una zona denominada “la isla de la basura”. Esta zona del océano está cubierta por una gran cantidad de desechos con un alto porcentaje de plástico, donde no todos los residuos plásticos son perceptibles a la vista, donde los plásticos se desintegran por las condiciones de exposición al sol, y encuentran una gran cantidad de fragmentos de este material flotando y generando problemas al ecosistema marino.¹²

¹¹ BARNES, David; GALGIANI, Francois; THOMSON, Richard; BARLAZ, Morton, *Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments*. p. 1988.

¹² THOMPSON, Richard; OLSEN, Ylva; MITCHELL, Richard; DAVIS, Antony; ROWLAND, Steven; JOHN, Anthony. RUSSELL, Andrea. *Lost At Sea: Where is All the Plastic?* p. 838.

La presencia de los residuos plásticos representa una amenaza para la biodiversidad marina. Los animales se enredan con estos, y pueden resultar heridos, inmóviles o muertos. Los residuos se acumulan de manera que con el movimiento de las olas golpean los corales y los fracturan. Los plásticos se terminan fragmentando en el ambiente y como consecuencia pueden ser ingeridos por diferentes especies que los confunden con comida de forma que es necesario encontrar un nuevo sustituto a este tanpreciado y a la vez dañino material.

Esos problemas mencionados se dan con todos los plásticos en general, mientras que en el caso del poliestireno, adicionalmente a los daños ocasionados al ambiente por los clorofluorocarbonos, se cuestiona su uso en elementos que entran en contacto con productos de consumo humano, al estar hecho de benceno, un conocido cancerígeno; y de estireno un neurotóxico y posiblemente cancerígeno. En agosto de 1990 el Instituto para la Autonomía Local (*Institute for local self-reliance*) señaló que los contenedores de poliestireno para comida y bebidas eran una amenaza para la salud humana. El proceso de manufactura del poliestireno no es 100 % eficiente, por lo que contiene residuos de estireno. A esto, se le suma que el estireno es soluble en aceite y etanol, sustancias que están en las bebidas alcohólicas y en la comida, por lo que existe el riesgo que haya migración de los químicos del plástico al alimento, riesgo que aumenta cuando aumenta la temperatura (aumento a 20°C), como al calentar los productos en el microondas o servir una bebida caliente. Por lo cual presenta un problema para la salud de todos los seres vivos.

2.9 Bioplásticos

Los bioplásticos, biodegradables y provenientes de fuentes renovables, son una medida de reducción al problema de los desechos plásticos contaminantes que ahogan al planeta y contaminan el medio ambiente. Esta degradación se debe dar en un compostaje natural, aproximadamente en 90 días y en un medio húmedo entre 28 a 60 días.

Se tiene a los bioplásticos como uno de las principales soluciones para la problemática ambiental que generan los plásticos, ya que estos reducen en una gran cantidad el tiempo necesario para la degradación de los productos elaborados de estos materiales. A igual que disminuyen el uso de petróleo como materia prima y poseen una menor producción de gases de efecto invernadero en su producción. De las principales ventajas que se pueden obtener al producir y utilizar bioplásticos son las siguientes:

- Reducen la huella de carbono, tanto en la producción como en su degradación.
- Suponen un ahorro energético en la producción.
- No consumen materias primas no renovables.
- Reducen los residuos no biodegradables, que contaminan el medio ambiente.
- No contienen aditivos perjudiciales para la salud como ftalatos o bisfenol A.
- No modifican el sabor y el aroma de los alimentos contenidos.

2.10 Espuma sólida

Para explicar qué es una espuma sólida es necesario definir qué es un sistema coloidal o un coloide. Esto se debe a que una espuma sólida es un coloide. Siendo un coloide una sustancia formada de dos materiales en diferentes fases combinados para formar una suspensión. Esta suspensión se divide en una fase dispersora y una fase dispersa, estas fases pueden ser un líquidas, sólidas o gaseosas. Cada tipo de combinación tiende a exhibir diferentes propiedades y tiene su propio término técnico. La única combinación que no es posible es un coloide con una fase dispersa gaseosa y una fase dispersora gaseosa, ya que todos los gases son solubles entre ellos. Una suspensión de aire dentro de un líquido se conoce como espuma. Mientras que a una suspensión de aire dentro de un medio sólido se conoce como espuma sólida, esto quiere decir que es un sólido que posee pequeños espacios entre su estructura que están llenos de una sustancia gaseosa, en el caso de esta investigación el sólido será una mezcla de celulosa y almidón, siendo la fase dispersa el aire.¹³

Tal vez el ejemplo más familiar de un coloide de espuma sólida sea la espuma de poliestireno, que se utiliza como material de embalaje para el transporte de productos. El equipo delicado, a menudo es empaquetado y vendido con poliestireno moldeado para estabilizar el producto. Además la espuma sólida es un material de relleno de bajo costo para almohadas y cuando se habla de la espuma de memoria, se piensa en los colchones de alta gama, ya que esta se utiliza en su elaboración. Por otro lado, las espumas más rígidas se utilizan como soporte estructural ligero.

¹³ RUIZ, Gladys. *Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca*. p.15.

2.10.1 Propiedades de los coloides de espuma

Este tipo de coloide normalmente tiende a ser ligero, además de ser fácilmente moldeables en diversas formas. Los materiales de los que este elaborado le dan diversas características, ya que dependiendo de la rigidez de los materiales que componen la matriz sólida, un coloide de espuma sólida puede ser duro y firme, o flexible y blando. Debido a estas propiedades, las espumas sólidas se utilizan a menudo en aplicaciones de amortiguación y aislantes. La consistencia de los coloides de espuma líquida tiende a variar dependiendo de la proporción del sólido y gas en la suspensión. Las espumas líquidas son particularmente buenas en la captura de partículas dentro del matriz de suspensión, haciéndolas buenos candidatos para uso en surfactantes. Mientras que las espumas sólidas debido a la distribución del aire dentro de la espuma, estas conforman un buen material para el aislamiento, tanto acústico como térmico.¹⁴

¹⁴ FERRER GARCÍA, Maylen; MARFISI VALLADARES, Shirley; DANGLAD FLORES, José Ángel; CECCONELLO, Laura; ROJAS DE GÁSCUE, Blanca. *Producción de espumas sólidas de celulosa y almidón de yuca*. p.60.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1 Localización

La parte experimental de la investigación se realizó en el Laboratorio del Área de Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, edificio T-5, primer nivel, Ciudad Universitaria zona 12, Guatemala.

3.2 Variables

Se determinaron las variables que se modificaron para observar y cuantificar el efecto que tengan sobre los resultados obtenidos, así mismo los factores que durante el proceso permanecieron de forma constante.

Tabla I. **Determinación de variables del proceso de producción de la espuma sólida**

Variable	Dimen-sional	Constante	Varia	Dependiente	Indepen-diente
Temperatura de ignición	°C		X	X	
Volumen de espuma sólida	cm ³		X	X	
Peso de espumante	G	X			X
Temperatura de horno	°C	X			X
Peso de almidón de banano	G		X		X
Peso celulosa	G		X		X
Tiempo de degradación	Día	X		X	
Peso inicial de la espuma sólida	G		X		X
Peso final de la espuma sólida	G		X	X	
Densidad	Kg/m ³		X	X	
Esfuerzo	Kg/cm ²		X	X	
Compresibi-lidad	Pa		X	X	

Fuente: elaboración propia.

3.3 Delimitación del campo de estudio

La investigación es de carácter cuantitativo-experimental-comparativo. En donde se buscó la evaluación a escala laboratorio del porcentaje de rendimiento, porcentaje de biodegradabilidad y caracterización física y mecánica de la espuma sólida elaborada a partir distintas formulaciones variando la cantidad de celulosa proveniente del papel de rehúso y almidón obtenido de los desechos poscosecha del banano verde (*Musa acuminata* L).

3.4 Obtención de las muestras

Para realizar la espuma sólida biodegradable fue necesario obtener primero la materia prima que se utilizó para extraer el almidón y celulosa, para luego iniciar con la extracción del almidón y la generación de una gel, que se mezcló según las formulaciones, con la celulosa formando materiales con diversas características.

3.4.1 Obtención de materia prima

La obtención de la materia prima e dividió en dos partes, la primera la recolección de banano verde para la extracción de almidón y la segunda, la obtención de para que se utilizó como la fuente de celulosa.

3.4.1.1 Recolección de banano verde

Se recolectó la materia prima (banano verde de desecho *Musa acuminata* L.) del CENMA (Central de Mayoreo). La materia prima se trasladó al laboratorio donde se lavó para eliminar contaminantes.

3.4.1.2 Recolección de papel para celulosa

Se recolectó papel bond tipo carta (usado y descartado como residuo en oficinas), se fraccionó con cortes longitudinales y se pesó en una balanza analítica.

3.4.2 Extracción del almidón

Se realizaron 3 cortes longitudinales a la cáscara y se peló el banano. Se procedió en cortar el banano en trozos de 2 cm de largo y a pesarlos. Después de colocar las muestras en un vaso de precipitado de 1 000 ml, con una solución antioxidante de ácido ascórbico 4 %, se ubicó los trozos de banano en una licuadora y utilizando la misma solución antioxidante para licuar la muestra; se colocó la muestra ya licuada en vasos de precipitado. Se llenó los vasos de precipitado hasta la mitad de su volumen y la otra mitad con agua destilada. Se utilizó un agitador universal durante 5 minutos para mezclar, posteriormente colocó las muestras en refrigeración por 3 horas y luego se decantó el sobrenadante y se repitió este procedimiento hasta que la solución resultante se clarificó.

Posteriormente se añadió la solución buffer y refrigeró la muestra por 24 horas, luego de decantar el sobrenadante y añadir agua destilada, se mezcló con un agitador universal durante 5 minutos, las muestras. Se colocaron en refrigeración por 1 día, posteriormente se decantó el sobrenadante y se repitió este procedimiento hasta que la solución resultante se clarificó y el precipitado se tornó de color blanco.

3.4.3 Elaboración de la espuma sólida

Se realizaron varias formulaciones (ver tabla I), variando los siguientes factores: masa de celulosa, masa de almidón de banano. La masa del surfactante polimérico no iónico carboximetilcelulosa (cmc) utilizado para formar el gel con el almidón de banano, la concentración de la solución de surfactante aniónico espumante lauril éter sulfato de sodio (DSS), el volumen de etanol y de agua, la velocidad y tiempo de agitación y la temperatura de secado se mantuvieron constantes en los experimentos.

Tabla II. **Formulaciones de espuma sólida en gramos**

Formulación	almidón (g)	lauril éter sulfato (M)	celulosa (g)
1	10	0,3	30
2	15	0,3	25
3	20	0,3	20
4	25	0,3	15

Fuente: elaboración propia.

El papel bond tipo carta (usado de oficinas) fue fraccionado y pesado en una balanza electrónica, la cantidad requerida para cada formulación. Posteriormente, se colocó en un vaso de precipitado con 250 mL de agua durante 30 min, calentando la mezcla hasta 100°C y filtrando luego de enfriar por 24 horas.

Por otro lado, se preparó un gel con base en el almidón obtenido del banano verde, 1 g de carboximetil celulosa, 100 mL de agua destilada y 15 mL de etanol absoluto, calentando la mezcla a 60°C hasta la gelificación. Una vez que el gel se enfrió a temperatura ambiente, se procedió a la formulación de la espuma, agregando los componentes en una licuadora durante 5 min.

El procedimiento utilizado se basa en el método estático de Ross-Miles, donde el suministro de la fase gaseosa es aportado por el aire del ambiente y la espuma se forma al dejar caer el líquido espumante desde cierta altura en un cilindro graduado que contiene cierta cantidad del mismo líquido (Ross 1969); acelerando el proceso mediante agitación rápida de la dispersión sólido-líquido-gas y utilizando una fase sólida dispersada en un gel. Para el secado de las espumas se empleará un horno. La espuma se colocó en moldes de aluminio y el secado se efectuó por 6 h a 60°C.

3.5 Diseño de tratamientos

Se tomaron datos numéricos y cualitativos (olor, color, textura) de las distintas espumas sólidas formadas a partir de la mezcla de almidón, celulosa, agua y espumantes en distintas proporciones, variándolas en 4 formulaciones, analizando sus propiedades físicas y mecánicas, además de su degradabilidad por pérdida de masa en treinta días; se realizaron tres corridas para cada ensayo, teniendo un total de 12 observaciones experimentales, a las cuales se les realizaron los análisis respectivos

3.6 Recursos humanos

Investigador:	Br. Juan Carlos Rojas Castillo
Asesor:	Inga. Qca. Cinthya Patricia Ortiz de Pérez.

3.7 Recursos materiales

Los principales recursos materiales que se utilizaron se dividieron en grupos en los cuales se puede mencionar: materia prima, reactivo, cristalería y equipo.

3.7.1 Materia prima

- Papel reciclado de oficinas
- Banano verde (*Musa acuminata* L.)

3.7.2 Cristalería

- 8 Beakers “BOECO” de 250mL y 500 mL
- 2 Probetas “EXAX” de 100 mL y 25mL
- 8 Varilla de vidrio
- 4 Embudo

3.7.3 Reactivos

- Lauril éter sulfato de sodio
- Carboximetilcelulosa
- Etanol absoluto
- Agua destilada
- Solución buffer pH 7
- Ácido ascórbico

3.7.4 Equipo

- Balanza analítica digital “BOECO” de 120 voltios.
- Desecadora
- Espátula
- Estufa eléctrica
- Licuadora

- Agitador universal para mezclar
- Refrigeradora
- Mechero Bunsen
- Moldes de la espuma sólida
- Horno de secado

3.8 Técnicas cuantitativas y cualitativas

Se utilizaron diversas técnicas tanto cualitativas como cuantitativas en esta investigación para determinar las características de las formulaciones y tener un punto de partida para compararlas.

3.8.1 Técnicas cualitativas

Estas técnicas fueron principalmente para determinación de la apariencia física y compararlas de acuerdo a las cualidades que se observaron durante la investigación.

3.8.1.1 Determinación de la apariencia física

Se observaron las características cualitativas de la espuma sólida, utilizando directrices del 1 al 5 para clasificarlas por su tono de color, olor y textura.

3.8.2 Técnicas cuantitativas

Las técnicas cuantitativas se utilizaron para determinar los valores exactos de ciertas características de las formulaciones, las cuales fueron las siguientes:

3.8.2.1 Densidad

La densidad fue estimada por la relación masa/volumen. De las muestras de espumas sólidas se obtuvo probetas con geometría cúbica, se pesaron y se les midió el largo y altura para obtener el volumen de la espuma.

3.8.2.2 Resistencia al fuego

Esta es medida como la resistencia de las espumas a soportar calentamiento por dos medios físicos. En el primero, se aplicó fuego directo a las muestras con un mechero Bunsen, observando si ocurre emanación de vapores, deformación de la geometría de la espuma o ignición, midiendo el tiempo que toma en carbonizarse. En el segundo, las muestras fueron expuestas a calentamiento en una plancha, se registró el tiempo y la temperatura en que comenzaba a quemarse la superficie de la espuma.

3.8.2.3 Determinación de la compresión y deformación mecánica

Este ensayo se llevó a cabo mediante el método de compresión simple no confinado, con el cual se determinó la carga y la deformación que puede soportar la espuma sólida de celulosa colocada en una prensa hidráulica industrial.

3.8.2.4 Determinación del rendimiento

El rendimiento de producción de la espuma se determinó por la relación entre la masa de la espuma sólida formada y la masa de materia prima principal empleada (celulosa y almidón de banano), pesando la cantidad de materia

prima principal y el peso de la espuma sólida obtenida para determinar qué tanto se aprovecha.

3.8.2.5 Prueba de esfuerzo

Consistió en someter una probeta a una carga de estiramiento hasta conseguir su ruptura. Se utilizó para conocer la resistencia que presentan los materiales cuando son tensionados, proporcionando información sobre las propiedades mecánicas de los materiales, tales como: porcentaje de elongación, porcentaje de reducción de área, máximo esfuerzo a la ruptura.

3.8.2.6 Determinación de biodegradabilidad

Se sometió cada formulación a dos pruebas de biodegradabilidad. Realizar dichas pruebas a temperatura ambiente con una duración de 30 días.

3.8.2.6.1 Degradabilidad en intemperie

Se pesaron las muestras en una balanza analítica, posteriormente se colocaron las muestras en recipientes sin tapa, se colocaron los recipientes en un lugar al aire libre. Se dejaron ahí por 30 días y después se pesaron las muestras con una balanza analítica, obteniendo el porcentaje de degradabilidad mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{Degradabilidad } i = 100 - \left(\frac{\text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} * 100 \right)$$

3.8.2.6.2 Degradabilidad por agua

Se pesaron las muestras en una balanza analítica, posteriormente se colocaron las muestras en recipientes apropiados, se llenaron los recipientes con agua hasta superar la superficie de las muestras. Tapando los recipientes y dejándolos en reposo absoluto (sin moverse) por 30 días, después de transcurrido este tiempo se pesaron las muestras con una balanza analítica y se obtuvo el porcentaje de degradabilidad mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{Degradabilidad } a = 100 - \left(\frac{\text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} * 100 \right)$$

3.9 Recolección y ordenamiento de la información

La recolección y ordenamiento de datos se realizó por medio de una investigación experimental donde los resultados obtenidos se colocaron en tablas como se muestran a continuación.

Tabla III. **Clasificación y estandarización del banano verde por sus propiedades física**

No de banano	Tamaño		Peso (g)	Código de color (*)
	Longitudinal (cm)	Altura (cm)		
1				
2				
3				
.				
.				
N				

Fuente: elaboración propia.

*El código de color va en función de la maduración del banano.

Tabla IV. **Formulaciones de espuma sólida en gramos**

Formulación	Almidón (g)	Lauril éter sulfato (M)	Celulosa (g)
1	20	0,3	60
2	30	0,3	50
3	40	0,3	40
4	50	0,3	30

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Densidad de las espumas obtenidas según su formulación**

Formulación	Corrida	Peso final (g)	Volumen (cm³)	Densidad (g/cm³)	Promedio
1	1				
	2				
	3				
2	1				
	2				
	3				
3	1				
	2				
	3				
4	1				
	2				
	3				

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Ensayo de degradabilidad a la intemperie y en agua**

Formulación	Corrida	Degradación			
		Intemperie		Agua	
		M inicio (g)	m fin (g)	m inicio (g)	m fin (g)
1	1				
	2				
	3				
2	1				
	2				
	3				
3	1				
	2				
	3				
4	1				
	2				
	3				

Fuente: elaboración propia.

3.10 Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Luego de la recolección y ordenamiento de datos se realizó la tabulación y procesamiento de la información donde se realizaron las operaciones y se calcularon los resultados a partir de los datos obtenidos y se en tablas como se muestran a continuación.

Tabla VII. **Determinación del color, olor, textura y estabilidad térmica de las diferentes formulaciones de espuma sólida**

Formulación	Corrida	Color	Olor	Textura	Estabilidad térmica
1	1				
	2				
	3				
2	1				
	2				
	3				
3	1				
	2				
	3				
4	1				
	2				
	3				

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Determinación de compresibilidad y deformación mecánica de las formulaciones de espuma sólida**

Formulación	Corrida	Compresión [Kg/cm ²]	Deformación [%]
1	1		
	2		
	3		
2	1		
	2		
	3		
3	1		
	2		
	3		
4	1		
	2		
	3		

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Porcentaje de degradabilidad a la intemperie y en agua**

Formulación	Corrida	Degradación [%]	
		Intemperie	Agua
1	1		
	2		
	3		
2	1		
	2		
	3		
3	1		
	2		
	3		
4	1		
	2		
	3		

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Determinación porcentaje de rendimiento de espuma sólida**

Formulación	Corrida	Porcentaje de rendimiento (%)	Porcentaje de rendimiento promedio (%)
1	1		
	2		
	3		
2	1		
	2		
	3		
3	1		
	2		
	3		
4	1		
	2		
	3		

Fuente: elaboración propia.

3.11 Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se utilizaron las medidas de tendencia central y las medidas de dispersión, para sintetizar y observar la variabilidad que exhiben los datos obtenidos, permitiendo juzgar la confiabilidad de los resultados que se presentarán y si los valores centrales son representativos.

Para determinar la hipótesis que se cumple, se utilizó la diferencia de medias, por medio de la tabla de Anova.

3.11.1 Media muestral

Es el centro de gravedad de toda la distribución, representando a todos los valores observados. Es única y todos los valores intervienen en la distribución.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{I}^N X_I}{N} \quad (\text{Ecuación No. 1})$$

Donde:

\bar{x} = media

$\sum_{I}^N X_I$ = sumatoria de valores

N = número de datos

3.11.2 Varianza

Mide la mayor o menor dispersión de los valores de la variable respecto a la media aritmética. Cuanto mayor sea la varianza, mayor dispersión existirá y por tanto menor representatividad tendrá la media aritmética.

$$\sigma^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N} \quad (\text{Ecuación No. 2})$$

Donde:

σ^2 = varianza

x = valor promedio

x_i = valor de la muestra

N = número de datos

3.11.3 Desviación estándar

Indica la dispersión de los valores para una misma medición con relación al valor promedio de una forma cuantitativa.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (\text{Ecuación No. 3})$$

Donde:

σ = desviación estándar

\bar{x} = valor promedio

3.11.4 Criterio para análisis de varianzas

Analizando el valor F y el valor F crítico para aceptar o rechazar la hipótesis planteada según la tabla XII que enuncia los criterios para el análisis de varianzas. Dicho análisis se complementa y confirma utilizando el criterio de la probabilidad. Analizando el valor de probabilidad y el valor α de confiabilidad para aceptar o rechazar la hipótesis planteada.

$$F = \frac{\sigma_x^2}{\sigma_y^2} \quad (\text{Ecuación No. 4})$$

Donde:

σ_x^2 = varianza de cada muestra

σ_y^2 = varianza de medias muestrales

Tabla XI. **Criterios para el análisis de varianzas**

Criterio de comparación de la probabilidad y α
<i>Asumiendo que la hipótesis nula (H_0) es que no difieren significativamente entre sí</i>
$P < \alpha$ Si la probabilidad es menor que alfa, se rechaza la hipótesis nula.
$P > \alpha$ Si la probabilidad es mayor que alfa, se acepta la hipótesis nula.
Criterio de comparación del valor de F de Fisher y F crítica
Si $F > F_{crítica}$, se rechaza la hipótesis nula.
Si $F < F_{crítica}$, se acepta la hipótesis nula.

Fuente: FAGIANI, William. *Análisis de varianzas y análisis de correlación lineal en prácticas experimentales mediante el uso de Excel*. p. 12.

3.12 Plan de Análisis de Datos

Los datos obtenidos de todas las pruebas se analizaron de forma matemática, estadística y gráfica para determinar objetivamente si el almidón y la celulosa son materiales utilizables para la producción de una espuma sólida con las características apropiadas y de rápida degradación.

3.12.1 Programas a utilizar para análisis de datos

Se utilizó una hoja de cálculo electrónica de Microsoft Excel 2010 para automatizar diversas operaciones matemáticas, realizar gráficos, determinación de los parámetros estadísticos como media aritmética, varianza, desviación estándar, entre otras. Esto con el propósito de cumplir los objetivos del estudio de investigación.

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a las diversas formulaciones de espuma sólida se muestran reflejados en las gráficas a continuación.

Tabla XII. **Porcentaje de degradación en agua y a la intemperie**

Formulación	Degradación promedio	
	Intemperie[%]	En agua [%]
1	0,23 %	25,9 %
2	2,31 %	26,8 %
3	3,10 %	34,5 %
4	3,31 %	32,4 %

Fuente: elaboración propia, con base en los datos calculados del apéndice 1.

Tabla XIII. **Características físicas de formulaciones de espuma sólida**

Formulación	Color	Olor	Textura	Densidad [g/cm ³]	Resistencia al fuego
1	1	Inoloro	Lisa	0,190	No
2	2	Inoloro	Lisa	0,163	Sí
3	3	Ligeramente dulce	Semi Lisa	0,147	Sí
4	4	Dulce	Semi lisa	0,1200	Sí

Fuente: elaboración propia, con base en los datos calculados del apéndice 1.

Figura 3. **Código de colores de las formulaciones de espuma sólida**

NÚMERO	COLOR
1	
2	
3	
4	

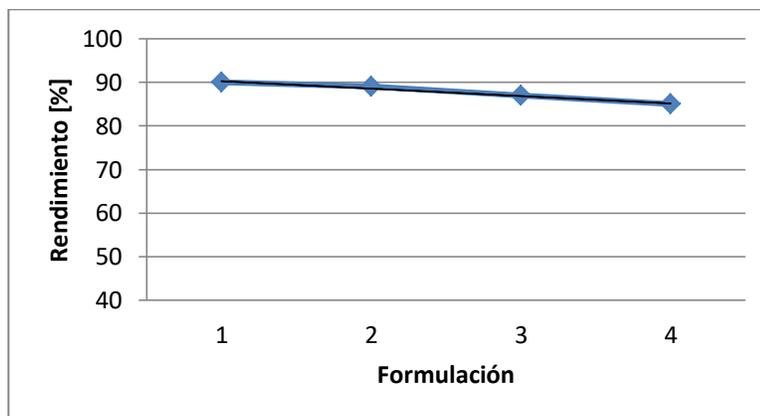
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Porcentaje de rendimiento de las diversas formulaciones**

Formulación	Rendimiento [%]
1	90,0
2	89,0
3	87,3
4	85,3

Fuente: elaboración propia, con base en los datos calculados del apéndice 1.

Figura 4. **Rendimiento según la formulación de la espuma sólida**



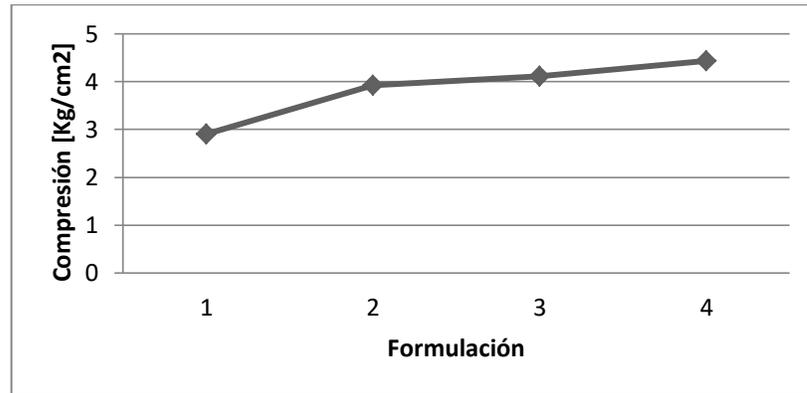
Fuente: elaboración propia, con base en tabla XIV.

Tabla XV. **Características mecánicas de formulaciones de la espuma sólida**

Formulación	Deformación [%]	Compresión [Kg/cm ²]
1	17,3	2,91
2	19,7	3,92
3	20,3	4,11
4	21,7	4,43

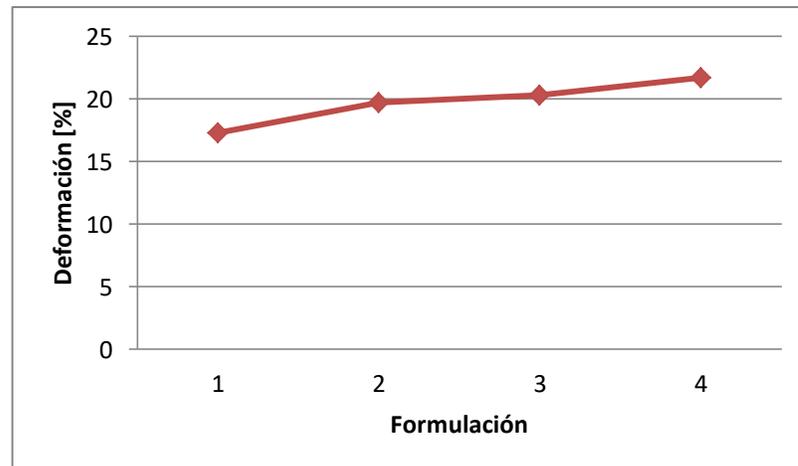
Fuente: elaboración propia, con base en los datos calculados del apéndice 1.

Figura 5. **Relación entre la compresión y formulación de espuma sólida**



Fuente: elaboración propia, con base en tabla XV.

Figura 6. **Relación entre deformación y formulación de espuma sólida**



Fuente: elaboración propia, con base en tabla XV.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los plásticos que generan contaminación debido a su baja degradabilidad, son productos altamente utilizados en la industria, de forma que en la actualidad se busca producir materiales biodegradables para sustituirlos. El poliestireno inflado es de los plásticos sintéticos que más tardan en degradarse, debido a esto se han encontrado diversos materiales para sustituirlo, entre los que se encuentran las espumas sólidas a partir de almidones.

Para la producción de esta espuma sólida se utilizó como materia prima desechos poscosecha del banano verde (*Musa acuminata* L.) para la obtención del almidón y papel reciclado como fuente de celulosa. Tanto la celulosa como el almidón por si solos no pueden ser utilizados para producir una espuma sólida, pero mezclándolos junto con otros reactivos permiten realizar modificaciones físicas y químicas para generar un sustituto de polímeros sintéticos. Por esto fue necesario añadirle agua, que cumple con dos funciones: ser el principal plastificante siendo un agente que rompe la estructura del gránulo del almidón. También se le añadió lauril éter sulfato de sodio como espumante, generando burbujas de aire dentro de las estructuras formadas entre la celulosa y el almidón, para que este material obtenga características similares a las del polímero que se desea sustituir.

Las materias primas se obtuvieron de distintos lugares, el banano verde, de la central de mayoreo (CENMA) proveniente del departamento de Izabal y la celulosa de hojas papel bond recicladas de oficinas. La extracción del almidón se realizó por medio de la maceración dinámica y decantación. Para obtener la espuma sólida se calentaron los gránulos de almidón de banano con agua,

etanol y carboximetilcelulosa en un medio con agitación lenta y constante ya que, al combinar la fricción mecánica y la elevación de temperatura, se homogeniza la mezcla, gelatinizando y plastificando el almidón para desnaturalizar los materiales proteicos y lograr la reestructuración de ellos, dando como resultado un material termoplástico en forma de pasta con exceso de humedad.

Luego de obtener la gel, se mezcló con la celulosa con mucha aceleración para la formación de la espuma mediante la agitación rápida de la mezcla para obtener una mejor dispersión de la fase gaseosa en la fase sólida/líquida, adquiriendo así un material con cavidades y exceso de agua, siendo el siguiente paso remover el agua mediante un horno. Por lo que fue necesario colocarlo en un horno a una temperatura de 60 °C por cinco horas, removiendo así el exceso de agua y logrando las características adecuadas. Si se secaba a una temperatura mayor podrían suceder dos cosas negativas: se descompondría la estructura de cada compuesto y se desnaturalizaría el almidón y también este al secarse muy rápido, podría encofrarse y no permitir que toda el agua saliera de adentro del material, siendo imposible la formación de una espuma sólida de buena calidad.

Los primeros análisis realizados a las diversas formulaciones de espuma sólida son los que se observan en la tabla XIII, estos son sobre las características físicas de las 4 formulaciones; color, olor, textura, densidad y resistencia al fuego. Para el color se realizó una muestra que se ve en la figura 3, siendo blanco para la muestra con mayor celulosa e incrementando el amarillo al incrementar la cantidad de almidón. Esto se debe a que, dependiendo de la cantidad de almidón que se le agregue, va a variar la cantidad de amilosa que es la que más afecta en estas características

cualitativas a la espuma sólida.¹⁵ Además del amarillo, también se observa un tono grisáceo debido a la tinta de las impresiones que poseían las hojas de donde se obtuvo la celulosa.

El olor de las formulaciones iba variando de inoloro a un olor dulce debido a que el almidón se obtuvo del banano y al incrementar la temperatura en el horno se liberaba el olor característico de este. Como tercer característica está la textura; esta al incrementar el almidón iba volviéndose más dura y áspera, mientras que cuando se tenía más celulosa, la textura se sentía suave y lisa, de forma que se vuelve más fácil para utilizar en diversos productos de la industria, en los cuales se puede imprimir un logo sobre el material como la marca del aislante térmico, como también el lote o nombre del producto en su embalaje.

La densidad de las espumas sólidas fue disminuyendo al incrementar la cantidad de almidón, el total de las muestras se encuentran entre el rango de 0,120 a 0,190 g/cm³, siendo las primeras 3 formulaciones ligeramente menores a densidad de una espuma sólida comercial (0,190 g/cm³). Esto se da debido a la alta porosidad en el interior de la espuma creada por las burbujas de aire como fase dispersa. Esta característica las hace ideal para ser usadas como material de embalaje.

Respecto a la resistencia al fuego, las diversas formulaciones reaccionaron de diferente forma; la muestra con menor cantidad de almidón no presentó resistencia a la ignición al aplicar llama directa, a los 20 segundos ya estaba iniciando la combustión con formación de llama. Además, esta misma muestra, al ser expuesta a la prueba con calentamiento en una plancha,

¹⁵ MENESES, Juliana; CORRALES, Catalina María; VALENCIA, Marco. *Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca*. p. 62.

presentó formación de humo y se carbonizó muy rápido, por lo que se catalogó como no resistente al fuego. El resto de las formulaciones de espuma presentó cierta resistencia a la ignición al aplicar llama directa, iniciando la combustión entre los 60 a 75 segundos, carbonizándose sin producir llama.

Mediante calentamiento indirecto a través de una plancha de calentamiento, la carbonización superficial se inició al alcanzar 110°C, sin llegar a quemarse o carbonizarse toda la superficie del material. Estos resultados de inflamabilidad clasifican a las 3 formulaciones con mayor cantidad de almidón como material autoextinguible. Debido a la presencia del almidón de banano y burbujas de aire presentes en la espuma que actúan como aislantes del calor y retardan el proceso de combustión.¹⁶

En la tabla XIV se muestra el rendimiento obtenido de las formulaciones de espuma sólida, donde se indica que entre mayor sea la cantidad de almidón presente, el rendimiento será menor. Este rendimiento se obtuvo al pesar las cantidades respectivas de almidón, celulosa, carboximetilcelulosa y lauril éter sulfato de sodio iniciales (no se toma en cuenta el etanol y el agua añadida porque estas se evaporaron) y el peso final de la espuma sólida. La observación que se puede realizar con los resultados obtenidos, es que, debido a que se desconocía el grado de humedad del almidón, el agua presente en este se evaporó, dejando un peso menor que al inicial, siendo la causa principal, junto con las pérdidas al cambiar de recipiente la mezcla, de la disminución del rendimiento de las formulaciones de espuma sólida.

¹⁶ FERRER GARCÍA, Maylen; MARFISI VALLADARES, Shirley; DANGLAD FLORES, José Ángel; CECCONELLO, Laura; ROJAS DE GÁSCUE, Blanca. *Producción de espumas sólidas de celulosa y almidón de yuca*. p. 442.

Las características mecánicas que se midieron de la espuma sólida son la compresión y deformación. En la tabla XV se presentan los resultados promedio del ensayo de compresión de las cuatro formulaciones de la espuma, indicando la carga máxima que puede soportar (kg/cm^2) y el porcentaje de deformación ocasionado por la carga. Las pruebas realizadas fueron mediante compresión simple en una prensa hidráulica. En este caso, la presencia del almidón de banano verde y las burbujas en la mezcla son las que determinan principalmente las propiedades mecánicas de la espuma.¹⁷

Las muestras analizadas no presentaron fractura después de la compresión ni elasticidad, ya que el material no regresó a su estado inicial. La formulación 1 (con mayor cantidad de celulosa) puede soportar una carga de $2,91 \text{ kg}/\text{cm}^2$ de área en promedio y esta carga ocasiona una deformación del 17,0 % de su altura original, lo que deja en evidencia que tiene una buena capacidad de amortiguación sin sufrir daños mayores en su estructura. Tanto la deformación como la carga que puede soportar, van aumentando conforme se disminuye la cantidad de celulosa y se aumenta el almidón en la mezcla. En la de menor celulosa y mayor cantidad de almidón la carga que soportó fue de $4,11 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ y la deformación fue de 21,7 %.

Debido a sus enlaces glucosídicos el almidón es fácilmente degradable, en el proceso de degradación es necesario que una enzima hidrolice los enlaces glucosídicos de forma que se produzca la liberación de la sacarosa, la principal enzima que realiza esta acción es la amilasa. Para determinar el tiempo de degradación de las diferentes formulaciones se colocaron las muestras en dos medios durante 30 días, directamente en contacto con agua y en un recipiente a la intemperie. En la tabla XII se muestra que, al estar la

¹⁷ DEBIAGI, Francesco; MALI, Susan; GROSSMANN, Eiras; YAMASHITA, Frank. *Biodegradable Foams Based on Starch, Polyvinyl Alcohol, Chitosan and Sugarcane Fibers Obtained by Extrusion*. p. 55.

espuma en contacto directo con agua por 30 días y luego secándolo, existe mayor pérdida de masa, incrementando esta pérdida al incrementar la cantidad de almidón presente en la mezcla, siendo superior al 25,0 % en la mezcla con menor cantidad de almidón y de 34,5 % en la tercera formulación, además de ser 32,4 % en la mezcla con mayor cantidad de almidón. Por lo que se encuentra un máximo cuando el porcentaje de almidón presente es el mismo al porcentaje de celulosa, aunque la diferencia entre ambos no es tan significativa, al tomar en cuenta la cantidad de almidón extra agregado, ya que el almidón es más difícil y con mayor costo, en comparación con la celulosa.

Estos resultados indican que las diferentes formulaciones de espuma sólida se pueden tomar como biodegradables, ya que una de las características de los bioplásticos es su rápida degradación; por medio del ensayo de degradabilidad se pudo confirmar que la espuma sólida biodegradable formada sí posee esta característica, ya que se degradó más de lo esperado según el estudio de Iguardia Arrivillaga en el 2013, el 20 % en el lapso de 30 días.

Mientras que al estar a la intemperie, a pesar que muestra el mismo comportamiento de aumentar el porcentaje de degradabilidad al aumentar la cantidad de almidón, se tiene que estos porcentajes son pequeños, ya que siendo su único contacto el aire, solo se logra alcanzar una pérdida de masa de 0,233 % la de menor cantidad de almidón, mientras que la que tiene mayor cantidad de almidón alcanza 3,31 % de pérdida. Esto se debe principalmente a que muchas propiedades de la espuma sólida dependen de la humedad en el ambiente, por lo que al estar en contacto directo con agua, la estructura de la espuma formada tiende a dejar la amilosa libre, permitiendo que se acelere la hidrólisis enzimática. Por el otro lado, al estar solo en contacto con el aire, se

vuelve mucho más difícil el acceso a la amilosa, evitando la hidrolización y dificulta la degradación.¹⁸

A partir de los resultados obtenidos, basado tanto en la apariencia de la espuma, como en sus características mecánicas, físicas y su degradabilidad, comparándolas entre las diferentes formulaciones, se determinó cuál de las formulaciones era la más adecuada para sustituir a una espuma sólida no biodegradable comercial. Las cualidades que se evaluaron en comparación con la espuma comercial son: textura suave y lisa que permite la impresión de logos, letras o símbolos; consistencia dura para que no desprenda partículas; sin olor y de color claro que indica ninguno o pocos residuos de tinta después del tratamiento del papel bond reciclado, alto rendimiento de producción y la cantidad de papel y almidón que posee la formulación.

En base a estas características se determinó que la formulación 2 es la más adecuada, ya que posee un 63,0 % de celulosa, un 89,1 % de rendimiento, 2,31 % degradabilidad a la intemperie, 27,1 % de degradabilidad en agua, densidad de 0,19 g/cm³, textura lisa, inodoro, resistente al fuego, 19,7 % de deformación y que soporta una carga de 3,92 Kg/cm². Se concluye así que la espuma sólida de la formulación 2 formada puede competir con las espumas comerciales formadas a partir de petróleo, porque posee características físicas y mecánicas apropiadas, además de ser biodegradable.

Para obtener los resultados de esta investigación se realizaron tres corridas para cada formulación y cada análisis, obteniendo que la varianza para el rendimiento en función de la formulación es la mayor de todos los análisis, siendo esta de ± 1 , mientras que en el resto de análisis se tienen

¹⁸ FERRER GARCÍA, Maylen; MARFISI VALLADARES, Shirley; DANGLAD FLORES, José Ángel; CECCONELLO, Laura; ROJAS DE GÁSCUE, Blanca. *Producción de espumas sólidas de celulosa y almidón de yuca*. p. 443.

varianzas mucho menores, de forma que las pruebas realizadas tuvieron una variabilidad pequeña que se pueden considerar como precisas, ya que todos los resultados obtenidos se encuentran muy cerca del promedio obtenido.

CONCLUSIONES

1. La biodegradabilidad se determinó de dos maneras, a la intemperie y en contacto directo con agua, siendo siempre mayor la degradación al estar en contacto directo con el agua, e incrementa al aumentar la cantidad de almidón en la formulación.
2. Al incrementar el porcentaje de celulosa en las formulaciones de la espuma sólida se obtiene un material más denso, menos resistente al fuego, de color blanquecino, con menor percepción de olor y de textura más lisa.
3. El rendimiento de 90 % fue el mayor obtenido para la primera formulación de espuma sólida, la cuál es la que presentaba un mayor porcentaje de celulosa y disminuyó hasta 85 % en la formulación con mayor cantidad de almidón.
4. El aumento en la cantidad de almidón en la formulación, produjo aumento en la compresibilidad y deformación de la espuma sólida, siendo este aumento pequeño en relación a la diferencia de almidón agregado.
5. La formulación de espuma sólida con mejores características físicas, de resistencia y mayor biodegradabilidad es la formulación 2 que posee un porcentaje de 62 % de celulosa y 37 % de almidón, con un 27 % de degradación en contacto con agua y que resiste una carga de hasta 3,21 Kg/cm², por lo que se puede utilizar como embalaje y aislante.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un ensayo de compostabilidad e incrementar el tiempo en el ensayo de biodegradabilidad.
2. Agregar diversos plastificantes para que proporcionen distintas características, tanto químicas como físicas, a la espuma sólida.
3. Medir las propiedades mecánicas 90 días después de la preparación y compararlo con las iniciales para determinar cómo se afecta la durabilidad del material.
4. Encontrar el tiempo óptimo de secado para la formulación con mejores características a manera de disminuir el costo de producción.
5. Utilizar blanqueadores para evitar la coloración amarilla y gris en la espuma sólida.
6. Elaborar productos a partir de la mejor formulación, evaluar su uso y realizar un análisis de beneficio/costo.

BIBLIOGRAFÍA

1. AREVALO NIÑO, Katiushka. *Elaboración de plásticos biodegradables a partir de polisacáridos y su estudio de biodegradación a nivel laboratorio y campo*. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo Leon, 1996. 159 p.
2. BARNES, David; GALGIANI, Francois; THOMSON, Richard; BARLAZ, Morton, *Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments*. United Kingdom: Philosophical Transactions of the Royal Society Biological Sciences (364), 2009. 2500 p.
3. CARREÑO VELASCO, Solly Margareth. *Obtención de acetato de celulosa a partir de residuos celulósicos postconsumo*. Trabajo de graduación de Ing. Química (Bucaramanga Santander, España), Univerisdad Industrial de Santander, 2005. 120 p.
4. CINELLI, Patrizia; CHIELLINI, Emo; LAWTON, John; & IMAN, Syed. *Foamed articles based on potato starch, corn fibers an poly(vinyl alcohol)*. Italy: Polyer Degradation and Stability, 2006. 1244 p.
5. CÓRDOVA RECINOS, Oscar Giovanni. *Elaboración de una resina de intercambio ionico a partir de la sulfonación y entrecruzamiento de poliestireno expandido reciclado para la separación de iones metálicos en solución*. Trabajo de graduación de Ing. Química, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2013. 110 p.

6. DEBIAGI, Francesco; MALI, Susan; GROSSMANN, Eiras; YAMASHITA, Frank. *Biodegradable Foams Based on Starch, Polyvinyl Alcohol, Chitosan and Sugarcane Fibers Obtained by Extrusion*. Brasil: Arch. Biol. Technol, 2011. 110 p.
7. FERRER GARCÍA, Maylen; MARFISI VALLADARES, Shirley; DANGLAD FLORES, José Ángel; CECCONELLO, Laura; ROJAS DE GÁSCUE, Blanca. Producción de espumas sólidas de celulosa y almidón de yuca. Venezuela: SABER. Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente, vol. 25, núm. 4, 2013. 522 p.
8. FRITZ, Hugo; SEIDENSTUCKER, Thomas; BOLZ, Ulrich; *Study on production oh thermoplastics and fibers based mainly on biological materials*. Germany: European Commission, 1994. 92 p.
9. GÁLVEZ ARÉVALO, Ana Gabriela. *Elaboración de plástico biodegradable a partir de almidón extraído del maíz*. Trabajo de graduación de Ing. Química, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2016. 62 p.
10. IGUARDIA ARRIVILLAGA, Carlos Humberto. *Síntesis y caracterización de bioplástico a partir de almidón de banano verde (Musa sapientum variedad Cavendish)*. Trabajo de graduación de Química Farmacéutica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, 2013. 115 p.

11. MAZZEO Miguel; ALZATE, Angela; MARIN, Mario. *Obtención de almidón a partir de residuos poscosecha del plátano dominico hartón (Musa AAB Simmonds)*. Colombia: Vector 3, 2008. 70 p.
12. MCMURRY, John. *Química Orgánica*. 7a. ed. México: Cengage Learning Editores, S.A., 2008. 1258 p.
13. MÉNDEZ DE LA CRUZ, Angela Elizabeth. *Evaluación de la extracción de almidón del banano verde (Musa Sapientum Variedad Gran Enano) producto de desecho de las industrias bananeras y evaluación de su función como exipiente en la formulación de comprimidos*. Trabajo de graduación de Química Farmacéutica. Universidad San Carlos de Guatemala. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. 2010. 112 p.
14. MENESES, Juliana; CORRALES, Catalina María; VALENCIA, Marco. *Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca*. Colombia: EIA, 2007. 151 p.
15. MERCHÁN, Julie; Ballesteros, Diego; Jiménez, Isabel; Medina, Jorge; Álvarez, Oscar. *Estudio de la biodegradación aerobia de almidón termoplástico (TPS)*. Venezuela: Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, 2009. 95 p.
16. MERÉ MARCOS, Javier. *Estudio del procesado de un polímero termoplástico basado en el almidón de patata amigable con el medio ambiente*. Trabajo de graduación de Ingeniería Química. España: Universidad Carlos III de Madrid, 2009. 120 p.

17. NAWRATH, Christiane; POIRIER, Yves; SOMERVILLE, Chris. *Plant ploymers for biodegradable plastics: cellulose, starch and polyhydroxyalkanotates*. Francia: Molecular Breeding, 1995. 201 p.
18. PARRES GARCÍA, Francisco J. *Investigación de las variables limitantes en la recuperación de residuos de poliestireno procedentes del sector envase*. Trabajo de graduación de Doctorado del Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales Universidad Politécnica de Valencia, 2005. 175 p.
19. RENDÓN-VILLALOBOS, Rodolfo; GARCÍA-HERNÁNDEZ, Edgar; GÜIZADO-RODRÍGUEZ, Marisol; SALGADO-DELGADO, René; RANGEL-VÁZQUEZ, Norma. *Obtención y caracterización de almidón de plátano (Musa paradisiaca L.) acetilado a diferentes grados de sustitución*. España: Afinidad, LXVII(548), 2010. 302 p.
20. RUIZ, Gladys. *Obtención y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca*. Colombia: Ingeniería y Ciencia Universidad EAFIT. 2, 2006. 67 p.
21. SKOOG, Donald. *Química Analítica*. 8a ed. México: McGraw-Hill Interamericana, 2005. 1048 p.
22. STEVENS, Ethan. *Green plastics: an introduction to the new science of biodegradable plastics*. U.S.A.: Princeton University Press, 2002. 238 p.
23. TÉLLEZ MALDONADO, Alejandra. *La complejidad de la problemática ambiental de los residuos plásticos: una aproximación al análisis*

narrativo de política pública en Bogotá. Colombia: Trabajo de graduación Ingeniería Química. Universidad Nacional de Colombia, 2012. 75 p.

24. THOMPSON, Richard; OLSEN, Ylva; MITCHELL, Richard; DAVIS, Antony; ROWLAND, Steven; JOHN, Anthony. RUSSELL, Andrea. *Lost At Sea: Where is All the Plastic?*. United Kingdom: Science, 304, 2004. 838 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Datos calculados

Clasificación y estandarización del banano verde por sus propiedades física.

No de banano	Tamaño		Peso [g]	Código de color (*)
	Longitudinal [cm]	altura [cm]		
1	4,1	15,2	14,5	1
2	3,8	14,8	14,8	1
3	3,1	16,1	13,9	1
4	4,0	15,5	14,9	1
5	4,1	14,9	15,2	1
6	3,8	15,1	14,8	1
7	3,4	14,9	14,3	1
8	3,6	14,8	13,8	1
9	4,1	16,8	14,6	1
10	3,9	15,9	14,1	1
11	5,0	17,0	17,1	2
12	4,8	16,2	16,4	1
13	4,6	16,4	15,8	1
14	3,8	14,5	14,2	1
15	4,1	15,8	15,1	1
16	4,7	16,5	15,8	1

Fuente: elaboración propia.

Formulaciones de espuma sólida en gramos

Formulación	almidón (g)	lauril éter sulfato (M)	celulosa (g)
1	20	0,3	60
2	30	0,3	50
3	40	0,3	40
4	50	0,3	30

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 1.

Densidad de las espumas obtenidas según su formulación

Formulación	Corrida	Peso fin [g]	Volumen [cm³]	Densidad [g/cm³]	Promedio
1	1	3,26	17,2	0,19	0,190
	2	3,99	22,2	0,18	
	3	3,66	18,3	0,2	
2	1	5,71	38,1	0,15	0,163
	2	4,56	26,8	0,17	
	3	5,19	30,5	0,17	
3	1	7,02	50,1	0,14	0,147
	2	6,2	41,3	0,15	
	3	6,61	44,1	0,15	
4	1	10,51	87,6	0,12	0,120
	2	4,5	37,5	0,12	
	3	3,06	25,5	0,12	

Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice 1.

Ensayo de degradabilidad a la intemperie y en agua.

Formulación	Corrida	% Degradación		% Degradación promedio	
		intemperie	Agua	Intemperie	Agua
1	1	0,23%	25,92%	0,23%	25,90%
	2	0,38%	26,01%		
	3	0,09%	25,76%		
2	1	2,31%	26,86%	2,31%	26,84%
	2	2,28%	26,78%		
	3	2,33%	26,88%		
3	1	3,13%	34,60%	3,10%	34,54%
	2	3,02%	34,26%		
	3	3,15%	34,78%		
4	1	3,06%	32,49%	3,31%	32,43%
	2	3,48%	32,57%		
	3	3,39%	32,22%		

Fuente: elaboración propia.

Determinación de resistencia al fuego.

Formulación	Llama directa		Plancha de calentamiento	
	Tiempo combustión	Producción de llama	carbonización	formación de llama
1	20s	Si	Si	Si
2	60s	No	Leve	No
3	70s	No	Leve	No
4	75s	No	Leve	No

Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice 1.

Determinación del color, olor, textura y estabilidad térmica de las diferentes formulaciones de espuma sólida.

Formulación	Corrida	Color	Olor	Textura	Resistencia fuego
1	1	1	Inoloro	Lisa	No
	2	1	Inoloro	Lisa	
	3	1	Inoloro	Lisa	
2	1	2	Inoloro	Lisa	Si
	2	2	Inoloro	Semi lisa	
	3	2	Inoloro	Lisa	
3	1	3	leve dulce	Semi lisa	Si
	2	3	Leve dulce	Semi lisa	
	3	3	Dulce	Lisa	
4	1	4	Dulce	Semi lisa	Si
	2	4	Dulce	Semi lisa	
	3	4	Dulce	Semi lisa	

Fuente: elaboración propia.

Código de colores para espuma sólida

NÚMERO	COLOR
1	
2	
3	
4	

Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice 1.

Determinación de deformación y compresibilidad de las formulaciones de espuma sólida.

Formulación	Corrida	Deformación [%]	Compresión [kg/cm²]
1	1	15	2,84
	2	20	3,01
	3	17	2,89
	Prom	17,3	2,91
2	1	19	3,86
	2	20	3,92
	3	20	3,98
	Prom	19,7	3,92
3	1	21	4,02
	2	20	4,10
	3	20	4,22
	Prom	20,3	4,11
4	1	23	4,32
	2	23	4,51
	3	22	4,46
	Prom	21,7	4,43

Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice 1.

Determinación del porcentaje de rendimiento de la espuma sólida.

Formulación	Corrida	Porcentaje de rendimiento (%)	Porcentaje de rendimiento promedio
1	1	90	90
	2	89	
	3	91	
2	1	89	89
	2	90	
	3	88	
3	1	88	87,3
	2	87	
	3	87	
4	1	86	85,7
	2	86	
	3	85	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Análisis estadístico

Datos de análisis de varianza de un factor de la densidad (propiedades físicas) en función de la formulación.

<i>Formulación</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
1	3	0,57	0,19	1,00E-04
2	3	0,49	0,16	1,33E-04
3	3	0,44	0,15	3,33E-05
4	3	0,36	0,12	9,63E-35

Fuente: elaboración propia con herramienta de análisis estadístico de Microsoft Excel.

Datos de análisis de varianza de un factor del rendimiento en función de la formulación.

<i>Formulación</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
1	3	270	90	1
2	3	267	89	1
3	3	261	87	1
4	3	256	85,33	0,33

Fuente: elaboración propia con herramienta de análisis estadístico de Microsoft Excel.

Datos de análisis de varianza de un factor de la compresibilidad en función de la formulación.

<i>Formulación</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
1	3	8,74	2,91	7,63E-03
2	3	11,76	3,92	3,60E-03
3	3	12,34	4,11	1,01E-02
4	3	13,29	4,43	9,70E-03

Fuente: elaboración propia con herramienta de análisis estadístico de Microsoft Excel.

Continuación apéndice 2.

Datos de análisis de varianza de un factor de la biodegradabilidad en función de la formulación.

<i>Formulación</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
1	3	0,78	0,26	1,6E-06
2	3	0,81	0,27	2,7E-07
3	3	1,04	0,35	7,1E-06
4	3	0,97	0,32	3,5E-06

Fuente: elaboración propia con herramienta de análisis estadístico de Microsoft Excel.

Datos de análisis de varianza de un factor de la deformación mecánica en función de la formulación.

<i>Formulación</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
1	3	0,52	0,17	0,0633
2	3	0,89	0,29	0,0633
3	3	0,61	0,20	0,0033
4	3	0,55	0,18	0,0033

Fuente: elaboración propia con herramienta de análisis estadístico de Microsoft Excel.

Resumen de datos de prueba de F de Fisher e hipótesis rechazadas

<i>Variable</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>F crítica</i>	<i>F > F crítica</i>	<i>Hipótesis rechazada</i>
Propiedades físicas	38,83	4,09E-05	4,07	Si	Alternativa
Deformación	28,63	1,25E-04	4,07	Si	Alternativa
Compresión	165,82	1,53E-07	4,07	Si	Alternativa
Rendimiento	15,60	1,05E-03	4,07	Si	Alternativa
Biodegradabilidad	708,99	1,45E-11	4,07	Si	Alternativa

Fuente: elaboración propia con herramienta de análisis estadístico de Microsoft Excel.

Continuación apéndice 2.

Conclusiones Estadísticas

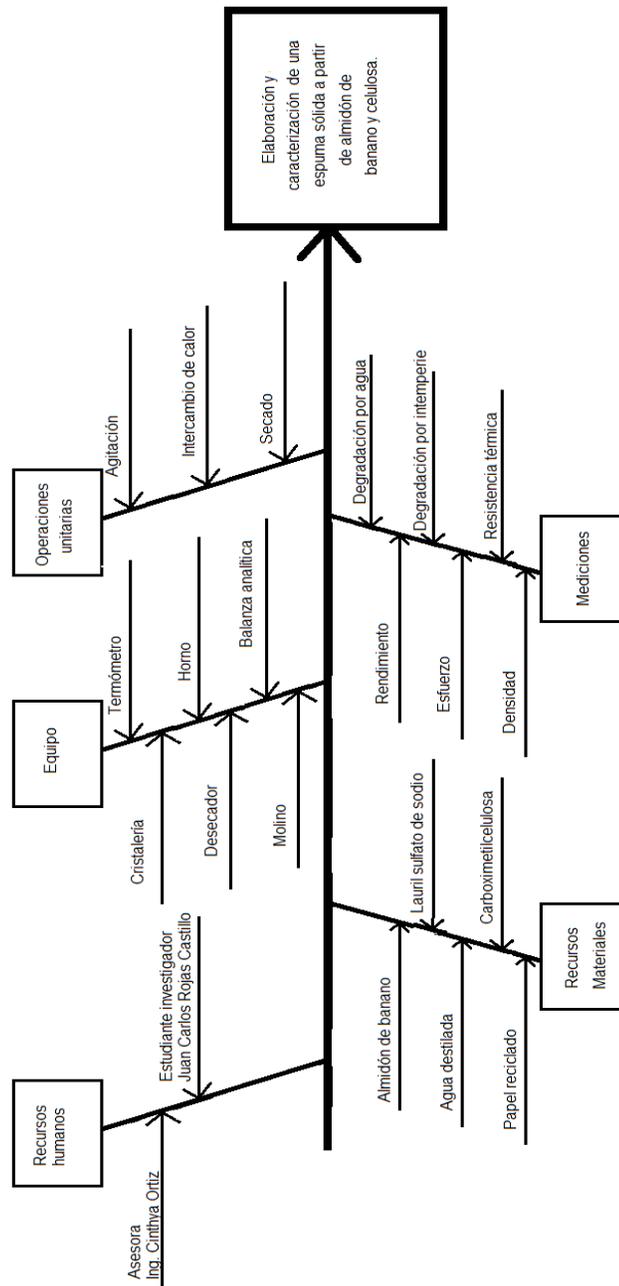
1. Debido a que en la prueba de Fisher de la biodegradabilidad la F es mayor a la F crítica, la hipótesis alternativa es rechazada. Es decir que la biodegradabilidad de la espuma sólida varía significativamente respecto a la cantidad de celulosa y almidón de banano que contenga la formulación.
2. Debido a que en la prueba de Fisher del porcentaje de rendimiento la F es mayor a la F crítica, la hipótesis alternativa es rechazada. Es decir que el porcentaje de rendimiento de la espuma sólida varía significativamente respecto a la cantidad de celulosa y almidón de banano que contenga la formulación.
3. Debido a que tanto en la prueba de Fisher de compresibilidad y de deformación la F es mayor a la F crítica, la hipótesis alternativa es rechazada. Es decir que las propiedades mecánicas de la espuma sólida varían significativamente respecto a la cantidad de celulosa y almidón de banano que contenga la formulación.
4. Debido a que en la prueba de Fisher de las propiedades físicas la F es mayor a la F crítica, la hipótesis alternativa es rechazada. Es decir que las propiedades físicas de la espuma sólida varía significativamente respecto a la cantidad de celulosa y almidón de banano que contenga la formulación.

Apéndice 3. Requisitos académicos

Carrera	Área	Curso	Tema
Ingeniería Química	Química	Química 4	Pérdida de masa en porcentaje y rendimientos
		Química Orgánica 1	Nomenclatura y propiedades de compuestos orgánicos
		Química Orgánica 2	Polímeros
		Química Ambiental	Degradación en el medio ambiente
	Operaciones Unitarias	Balace de Masa y Energía	Balances de masa y proporciones
	Área de especialización	Ciencia de los Materiales	Propiedades mecánicas, resistencia y esfuerzo
		Ingeniería económica 3	Elaboración de un presupuesto
		Procesos Químicos Industriales	Elaboración y propiedades de polímeros
		Extracciones industriales	Extracción por maceración dinámica
	Ciencias básicas y complementarias	Estadística 1	Estadística descriptiva

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Fotos del proceso de extracción de almidón del banano**



Fuente: elaboración propia.

Aquí se tiene al banano como materia prima y luego como va el proceso por el cuál con ácido ascórbico y una solución buffer de ph 7 se logra obtener el almidón (última foto a la derecha).

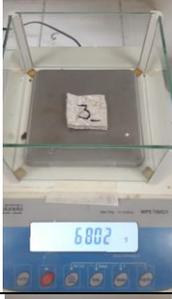
Apéndice 6. **Proceso de elaboración de espuma sólida**



Fuente: elaboración propia.

Se observa el proceso de izquierda a derecha como el papel y almidón se mezclan en una licuadora para generar una mezcla espumosa, la cual luego se lleva al horno y se le quita el exceso de humedad.

Apéndice 7. Prueba de degradabilidad a la intemperie

Formulación	Foto inicial	Foto final
1		
2		
3		
4		

Fuente: elaboración propia.

En estas fotografías se muestra la balanza con una pieza de cada formulación de espuma sólida antes y después de pasar los 30 días a la intemperie, demostrando la diferencia de peso, la cual se utilizó para calcular el porcentaje de degradabilidad a la intemperie.

Apéndice 8. Prueba de degradabilidad en agua

Formulación	Foto inicial	Foto final
1		
2		
3		
4		

Fuente: elaboración propia.

En estas fotografías se muestra la balanza con una pieza de cada formulación de espuma sólida antes y después de pasar los 30 días sumergidas en agua, demostrando la diferencia de peso, la cual se utilizó para calcular el porcentaje de degradabilidad en agua.