



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE ADITIVOS EN LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS, DE DEGRADACIÓN Y TRANSPORTE DE PELÍCULAS BIOPLÁSTICAS
OBTENIDAS A PARTIR DEL ALMIDÓN EXTRAÍDO DEL PLÁTANO VERDE
(*Musa balbisiana*)**

Juan Francisco Oliva Valle

Asesorado por el Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez

Guatemala, febrero de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE ADITIVOS EN LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS, DE DEGRADACIÓN Y TRANSPORTE DE PELÍCULAS BIOPLÁSTICAS
OBTENIDAS A PARTIR DEL ALMIDÓN EXTRAÍDO DEL PLÁTANO VERDE (*Musa
balbisiana*)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JUAN FRANCISCO OLIVA VALLE

ASESORADO POR EL ING. VÍCTOR MANUEL MONZÓN VALDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, FEBRERO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
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. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Alvarez Mejía
EXAMINADORA	Inga. Adela María Marroquín González
EXAMINADORA	Inga. Cinthia Patricia Ortiz Quiroa
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE ADITIVOS EN LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS, DE DEGRADACIÓN Y TRANSPORTE DE PELÍCULAS BIOPLÁSTICAS
OBTENIDAS A PARTIR DEL ALMIDÓN EXTRAÍDO DEL PLÁTANO VERDE
(*Musa balbisiana*)**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química con fecha 31 de octubre de 2019.

Juan Francisco Oliva Valle

Guatemala 25 de septiembre de 2020

Ingeniero

Williams Guillermo Álvarez Mejía

DIRECTOR

Escuela Ingeniería Química

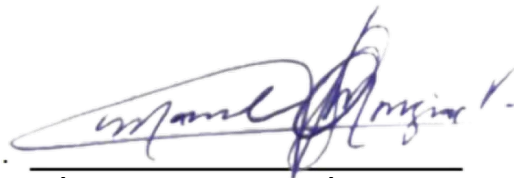
Presente.

Estimado Ingeniero Williams Álvarez:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final del trabajo de graduación titulado: **"EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE ADITIVOS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, DE DEGRADACIÓN Y TRANSPORTE DE PELÍCULAS BIOPLÁSTICAS OBTENIDAS A PARTIR DEL ALMIDÓN EXTRAÍDO DEL PLÁTANO VERDE (*Musa balbisiana*)"**, elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química, Juan Francisco Oliva Valle, quien se identifica con el registro académico 2013-13832 y con el CUI 2520 04620 1712.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,



Víctor Manuel Monzón Valdez

ASESOR

Ingeniero Químico

Colegiado activo No. 656





Guatemala, 09 de noviembre de 2021.
Ref. EIQ.TG-IF.036.2021.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo 019-2019, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Juan Francisco Oliva Valle**.
Identificado con número de carné: **2520046201712**.
Identificado con registro académico: **201313832**.
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química**.
En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación**.

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 DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE ADITIVOS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, DE DEGRADACIÓN Y TRANSPORTE DE PELÍCULAS BIOPLÁSTICAS OBTENIDAS A PARTIR DEL ALMIDÓN EXTRAÍDO DEL PLÁTANO VERDE (*Musa balbisiana*)

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Víctor Manuel Monzón Valdez, profesional de la Ingeniería Química

Habiendo encontrado el referido 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"

Adela María Marroquín González
Adela María Marroquín González
Ingeniera Química Col. No. 1466

Adela María Marroquín González
profesional de la Ingeniería Química
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



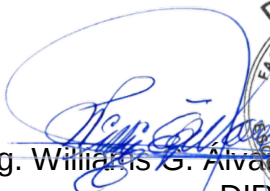
C.c.: archivo



LNG.DIRECTOR.034.EIQ.2022

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE ADITIVOS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, DE DEGRADACIÓN Y TRANSPORTE DE PELÍCULAS BIOPLÁSTICAS OBTENIDAS A PARTIR DEL ALMIDÓN EXTRAÍDO DEL PLÁTANO VERDE (*Musa balbisiana*)**, presentado por: **Juan Francisco Oliva Valle**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“Id y Enseñad a Todos”


Ing. Williamis G. Álvarez Mella, M.I.Q., M.U.I.E.
DIRECCIÓN
Escuela de Ingeniería Química

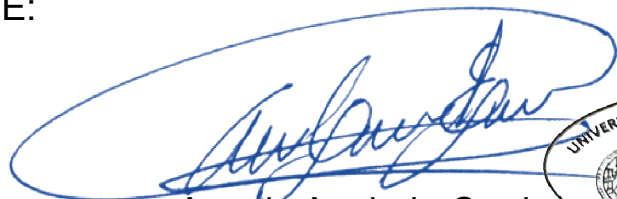
Guatemala, febrero de 2022.

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.085.2022

La Decana 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 DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE ADITIVOS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, DE DEGRADACIÓN Y TRANSPORTE DE PELÍCULAS BIOPLÁSTICAS OBTENIDAS A PARTIR DEL ALMIDÓN EXTRAÍDO DEL PLÁTANO VERDE (Musa balbisiana)**, presentado por: **Juan Francisco Oliva Valle** , después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, febrero de 2022

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser mí guía espiritual en todo momento.
Mis padres	Romelia Efigenia Valle Palacios y Juan Francisco Oliva Estrada, por su amor, apoyo incondicional y por motivarme constantemente en cada etapa de mi vida.
Mis hermanas	Teresita y Lísbeth Oliva Valle, por acompañarme en todo momento.
Mis sobrinas	Elisa y Laura Esquivel Oliva, para quienes espero llegar a ser una fuente de inspiración.
Mi familia	Abuelos, tíos, primos y mi cuñado por todas esas lecciones de vida que me motivan a seguir adelante.
Mis amigos	Por el apoyo mutuo en cada etapa.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la casa de estudios que me dio la oportunidad de realizar mis estudios superiores.
Facultad de Ingeniería	Por darme las herramientas para desarrollar mi capacidad de análisis a través del estudio de la ciencia y la tecnología, especialmente a la Escuela de Ingeniería Química.
Laboratorio de Análisis Fisicoquímicos –LAFIQ-	Por brindarme el apoyo y las instalaciones para la realización de la metodología experimental de esta investigación, especialmente a la Licda. Ingrid Benítez.
Mis padres, hermanas y sobrinas	Por transmitirme sus valores y por todo su esfuerzo para que yo me encuentre hoy en este punto.
Familia y amigos	Por su motivación para seguir adelante ante cualquier circunstancia.
Asesor Ing. Víctor Monzón Valdez	Por su tiempo y dedicación durante el desarrollo de esta investigación y por ser un profesional que promueve la investigación científica constantemente.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
HIPÓTESIS.....	XXIII
INTRODUCCIÓN	XXVII
1. MARCO CONCEPTUAL.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación	4
1.3. Determinación del problema.....	7
1.3.1. Definición	7
1.3.2. Delimitación	8
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. Polímeros	9
2.1.1. Definición y estructura del polímero.....	9
2.1.2. Clasificación de los polímeros	10
2.1.3. Clasificación de polímeros según sus propiedades	11
2.1.4. Polímeros biodegradables	12
2.1.4.1. Biopolímeros y formas de obtención....	12
2.1.4.2. Bioplásticos.....	12
2.1.4.3. Almidones	13

2.1.4.4.	Propiedades fisicoquímicas del almidón.....	16
2.1.5.	Aditivos.....	17
2.1.6.	Propiedades de los plásticos y bioplásticos	18
2.1.7.	Plastificantes de bioplásticos.....	19
2.1.8.	Ventajas de los polímeros biodegradables.....	20
2.1.9.	Gelatinización y gelificación	21
2.1.10.	Prueba de yodo para detección de almidón	23
2.1.11.	Degradabilidad y biodegradabilidad	23
2.1.11.1.	Criterios de biodegradabilidad.....	23
2.1.11.2.	Mecanismos de degradación.....	24
2.2.	Asociación Americana de Ensayo de Materiales	29
2.2.1.	Norma ASTM D882 - 18.....	29
2.2.2.	Norma ASTM E96/E96M-16.....	30
3.	METODOLOGÍA	31
3.1.	Variables	31
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	32
3.3.	Recursos humanos disponibles	32
3.4.	Recursos materiales.....	32
3.4.1.	Equipo	32
3.4.2.	Cristalería	33
3.4.3.	Reactivos.....	34
3.4.4.	Equipo auxiliar.....	34
3.5.	Obtención y caracterización de la materia prima	34
3.5.1.	Caracterización de reactivos	37
3.5.2.	Condiciones de almacenamiento	38
3.6.	Técnica cuantitativa de la investigación	38
3.7.	Recolección y ordenamiento de la información	39

3.7.1.	Preparación de las formulaciones.....	39
3.7.2.	Extracción del almidón a partir de la cáscara y pulpa del plátano y prueba de detección	41
3.7.3.	Preparación de la formulación No. 1 del bioplástico.....	43
3.7.4.	Preparación de la formulación No. 2 del bioplástico.....	44
3.7.5.	Preparación de la formulación No.3 del bioplástico.....	45
3.7.6.	Ensayo de degradabilidad en medio ácido y medio alcalino.....	46
3.7.7.	Ensayo de degradabilidad por exposición a la radiación solar	47
3.7.8.	Ensayo de evaluación de curva y tasa de humedad, método de Peleg (Peleg, 1998)	49
3.7.9.	Ensayo de evaluación de permeabilidad al vapor de agua, mediante la norma ASTM E96/E96M-16 como referencia para la metodología experimental.	50
3.7.10.	Ensayo de evaluación de la propiedad mecánica de tensión, según norma ASTM D882 - 18.....	52
3.8.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	53
3.8.1.	Tabulación de los datos obtenidos para cada extracción y formulación	53
3.8.2.	Tabulación de los datos obtenidos para cada ensayo de degradabilidad.....	54

3.8.3.	Tabulación de los datos obtenidos para cada ensayo de determinación de las propiedades de permeabilidad.....	56
3.8.3.1.	Determinación de la curva y tasa de humedad.	56
3.8.3.2.	Determinación de la permeabilidad al vapor de agua	57
3.8.4.	Determinación del error de los modelos matemáticos.....	61
3.8.5.	Tabulación de los datos obtenidos para cada ensayo de tensión	62
3.8.6.	Análisis estadístico.....	63
3.8.7.	Diseño de tratamiento	63
3.8.8.	Prueba de Normalidad de Anderson-Darling.....	69
3.8.9.	Análisis de varianzas.....	70
3.8.9.1.	ANOVA de un factor.....	72
3.8.9.2.	ANOVA de dos factores	72
3.9.	Plan de análisis de los resultados	74
3.9.1.	Programas para utilizar para el análisis de datos....	74
3.9.2.	Métodos y modelos de los datos según tipo de variables.....	74
3.9.3.	Programas a utilizar para análisis de datos.....	74
4.	RESULTADOS.....	77
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	103

CONCLUSIONES	115
RECOMENDACIONES.....	119
BIBLIOGRAFÍA.....	121
APÉNDICES	127
ANEXOS.....	189

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Estructura de segmentos de amilosa	14
2.	Estructura de segmentos de la amilopectina.....	14
3.	Diferencia esquemática entre amilosa y amilopectina.....	15
4.	FAlmidón no gelatinizado observado con luz polarizada.....	22
5.	FÍndice Ultravioleta.....	26
6.	Pronóstico Índice Ultravioleta para 1 día.....	26
7.	Radiación solar en Guatemala	27
8.	Rendimiento de extracción de almidón en función de la fuente de almidón.....	77
9.	Intervalos de tolerancia y prueba de normalidad de Anderson Darling para la determinación de rendimiento de extracción de almidón	78
10.	Degradabilidad de la formulación con proporción almidón/glicerina 33/67 % en medio ácido, básico y por exposición a los rayos UV provenientes del Sol.....	79
11.	Degradabilidad de la formulación con proporción almidón/glicerina 50/50 % en medio ácido, básico y por exposición a los rayos UV provenientes del Sol.....	80
12.	Degradabilidad de la formulación con proporción almidón/glicerina 67/33 % en medio ácido, básico y por exposición a los rayos UV provenientes del Sol.....	81
13.	Degradabilidad de la formulación con proporción almidón/urea 33/67 % en medio ácido, básico y por exposición a los rayos UV provenientes del Sol.....	82

14.	Degradabilidad de la formulación con proporción almidón/urea 50/50 % en medio ácido, básico y por exposición a los rayos UV provenientes del Sol	83
15.	Degradabilidad de la formulación con proporción almidón/urea 67/33 % en medio ácido, básico y por exposición a los rayos UV provenientes del Sol	84
16.	Degradabilidad de la formulación con proporción almidón/glicerina/urea 44/33/22 % en medio ácido, básico y por exposición a los rayos UV provenientes del Sol	85
17.	Degradabilidad de la formulación con proporción almidón/glicerina/urea 44/28/28 % en medio ácido, básico y por exposición a los rayos UV provenientes del Sol	86
18.	Degradabilidad de la formulación con proporción almidón/glicerina/urea 44/22/33 % en medio ácido, básico y por exposición a los rayos UV provenientes del Sol	87
19.	Comparación del efecto de la variación de las formulaciones y sus variaciones en la degradabilidad de las películas de bioplástico en medio ácido	88
20.	Intervalos de tolerancia y prueba de normalidad de Anderson Darling para la comparación de degradabilidad de las películas de bioplástico en medio ácido.....	90
21.	Comparación del efecto de la variación de las formulaciones y sus variaciones en la degradabilidad de las películas de bioplástico en medio básico.....	91
22.	Intervalos de tolerancia y prueba de normalidad de Anderson Darling para la comparación de degradabilidad de las películas de bioplástico en medio básico.....	93

23.	Comparación del efecto de la variación de las formulaciones y sus variaciones en el cambio de peso de las películas de bioplástico por acción de los rayos UV del sol	94
24.	Intervalos de tolerancia y prueba de normalidad de Anderson Darling para la comparación de degradabilidad de las películas de bioplástico por radiación UV del sol	96
25.	Comparación de la permeabilidad al vapor de agua de las películas de bioplástico en función de las diferentes formulaciones	97
26.	Intervalos de tolerancia y prueba de normalidad de Anderson Darling para la determinación de la permeabilidad al vapor de agua de las películas de bioplástico	98
27.	Comparación de la desorción de agua y modelos de Peleg	99
28.	Evaluación de la tensión al rompimiento de las películas de bioplástico en función de las diferentes formulaciones	100
29.	Intervalos de tolerancia y prueba de normalidad de Anderson Darling para la determinación de la tensión al rompimiento de las películas de bioplástico	101

TABLAS

I.	Comercio exterior del plátano para el período 2005 al 2013, en Toneladas Métricas (TM)	6
II.	Propiedades de los componentes del almidón.....	16
III.	Descripción de parámetros dependientes e independientes.....	31
IV.	Propiedades del almidón del plátano verde (<i>Musa balbisiana</i> spp)	36
V.	Composición proximal del almidón del plátano verde (<i>Musa balbisiana</i> spp)	37
VI.	Porcentajes de cada ingrediente para las formulaciones del bioplástico (%p/p).....	40

VII.	Pesos de cada ingrediente para las formulaciones del bioplástico, tomando como base un peso total de 90 g	41
VIII.	Extracción y rendimiento de cada almidón	53
IX.	Ensayo de degradabilidad para el film extraído a partir del almidón con mayor rendimiento, formulaciones 1, 2, 3 y sus variaciones, evaluando en HCL al 3 % y NaOH al 3 %.....	54
X.	Ensayo de degradabilidad para el film extraído a partir del almidón con mayor rendimiento, formulaciones 1, 2, 3 y sus variaciones, evaluando por exposición a los rayos UV provenientes del sol	55
XI.	Determinación de curva y tasa de humedad de para el film extraído a partir del almidón con mayor rendimiento, para las formulaciones 1, 2, 3 y sus respectivas variaciones con respecto al tiempo	59
XII.	Ensayo de permeabilidad al vapor de agua para el bioplástico extraído a partir del almidón con mayor rendimiento, para las formulaciones 1, 2, 3 y sus respectivas variaciones	60
XIII.	Ensayo de permeabilidad al vapor de agua para el bioplástico extraído a partir del almidón con mayor rendimiento, para las formulaciones 1, 2, 3 y sus respectivas variaciones	61
XIV.	Ensayo de propiedad mecánica de tensión para el bioplástico extraído a partir del almidón proveniente de la cáscara y pulpa del plátano verde, para las formulaciones 1, 2, 3 y sus respectivas variaciones.....	62
XV.	Diseño experimental para el rendimiento de extracción de almidón a partir de la pulpa y cáscara de plátano verde	63
XVI.	Diseño de tratamientos para el análisis de degradabilidad en medio ácido, básico y por exposición a los rayos UV del sol para 10 de experimentación en un mes.....	65
XVII.	Diseño de tratamientos para el análisis de degradabilidad para las tres formulaciones y sus variaciones en cada medio por separado.....	67

XVIII.	Diseño de tratamientos para el análisis de permeabilidad al vapor de agua y tensión al rompimiento las tres formulaciones y sus variaciones en cada medio por separado, propiedad de sorción y permeabilidad al vapor de agua	69
XIX.	Diseño de análisis de varianza de uno y dos factores.....	71
XX.	Resultados de un análisis de varianza de un factor	72
XXI.	Resultado de análisis de varianza de dos factores	73
XXII.	ANOVA de un factor para la determinación de rendimiento de extracción del almidón.....	78
XXIII.	Modelos matemáticos experimentales de la comparación del efecto de la variación de las formulaciones y sus variaciones en la degradabilidad en medio ácido	89
XXIV.	ANOVA de dos factores para la comparación de degradabilidad de las películas de bioplástico en medio ácido	90
XXV.	Modelos matemáticos experimentales de la comparación del efecto de la variación de las formulaciones y sus variaciones en la degradabilidad en medio básico.....	92
XXVI.	ANOVA de dos factores para la comparación de degradabilidad de las películas de bioplástico en medio básico.....	93
XXVII.	Modelos matemáticos experimentales de la comparación del efecto de la variación de las formulaciones y sus variaciones en la degradabilidad por acción de los rayos UV del sol.....	95
XXVIII.	ANOVA de dos factores para la comparación de degradabilidad de las películas de bioplástico por radiación UV del sol.....	96
XXIX.	ANOVA de un factor para la determinación de la permeabilidad al vapor de agua de las películas de bioplástico.....	98
XXX.	ANOVA de un factor para la determinación de la tensión al rompimiento de las películas de bioplástico	101

XXXI.	ANOVA para el análisis de permeabilidad al vapor de agua, pérdida de humedad por método de Peleg y tensión	102
-------	--	-----

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Área
cm	Centímetro
k	Constante
D	Degradabilidad
Δ	Delta
X	Espesor
Fva	Flujo de transferencia de vapor
F	Formulación
°C	Grados Celsius
g	Gramo
h	Humedad
kg	Kilogramo
kPa	Kilopascal
kWh	Kilowatt hora
MPa	Megapascal
m²	Metro cuadrado
mL	Mililitro
mm²	Milímetro cuadrado
mm	Milímetro
min	Minuto
nm	Nanómetro
Pva	Permeabilidad al vapor
W	Peso

pH	Potencial de hidrógeno
P	Presión
UV	Radiación ultravioleta
R	Rendimiento
T	Tensión
t	Tiempo
TM	Toneladas métricas

GLOSARIO

Almidón	Sustancia blanca, inodora, insípida, granulada o en polvo, que abunda en otras feculentas, como la papa o los cereales; se emplea en la industria alimentaria, textil y papelería.
Antioxidante	Molécula capaz de retardar o prevenir la oxidación de otras moléculas.
ASTM	Organización de normas internacionales que desarrolla y publica acuerdos voluntarios de normas técnicas para una amplia gama de materiales, productos y servicios.
Bioplástico	Tipo de plásticos derivados de productos vegetales, tales como el aceite de soja, el maíz o la fécula de patata, a diferencia de los plásticos convencionales, derivados del petróleo.
Carga eléctrica	Propiedad física intrínseca de algunas partículas subatómicas que se manifiesta mediante fuerzas de atracción y repulsión entre ellas a través de campos electromagnéticos.

Degradación	Varias reacciones en que las moléculas orgánicas pierden uno o varios átomos de carbono, o donde las moléculas complejas se descomponen en otras más simples.
Descomposición	Ruptura de sustancias constituidas por moléculas o iones formando así otras sustancias constituidas por moléculas más pequeñas o sustancias elementales.
Elasticidad	Propiedad de un cuerpo sólido para recuperar su forma cuando cesa la fuerza que la altera.
Hidrofílico	Molécula que puede enlazarse temporalmente con el agua a través de un enlace hidrógeno.
Película o <i>film</i>	Capa delgada que se forma sobre algunas cosas o las recubre.
Gelatinización	Proceso donde los gránulos de almidón que son insolubles en agua fría debido a que su estructura es altamente organizada.
Permeabilidad	Capacidad que tiene un material de permitirle a un fluido que lo atraviese sin alterar su composición.
Permeabilidad al vapor	Cantidad de vapor que se transmite a través de un material de espesor definido por unidad de área, unidad de tiempo y de diferencia de presiones parciales de vapor.

Plastificantes	Son polímeros de bajo peso molecular que aumentan el espacio entre las cadenas de polímero cristalino para hacerlas más flexibles y, por lo tanto, más resistentes.
Polímero	Macromoléculas formadas por la unión mediante enlaces covalentes de una o más unidades simples llamadas monómeros.
Propiedad de transporte	Intercambio de masa, energía, carga, momento y momento angular entre los sistemas observados y estudiados.
Pulpa	Parte blanda y carnosa, generalmente comestible, de la fruta.
Radiación solar	Conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol.
Retrodegradación	Proceso de cambios físicos y químicos en soluciones acuosas o geles producidos por el envejecimiento, lo cual da como resultado formas moleculares más simples.
Solución acuosa	Proceso que involucra dos disolventes y se llama terminantemente de esta forma, cuando el mayor componente es el agua.

Sorción	Proceso mediante el cual un material es absorbido por otro.
Tensión	Acción de fuerzas opuestas a que está sometido un cuerpo.
Tensión al rompimiento	Máxima tensión que un material puede soportar bajo tensión antes de que su sección transversal se contraiga de manera significativa.

RESUMEN

Se estudió el efecto que tiene la variación de los aditivos en las propiedades de degradación, propiedades mecánicas y propiedades de transferencia de masa en películas de bioplástico elaborado a partir del almidón extraído del plátano verde (*Musa balbisiana*). Con el almidón extraído de la pulpa y cáscara del plátano se compararon rendimientos de recuperación de almidón dando como resultado un mayor porcentaje para la pulpa con un 24,15 % y se seleccionó para la realización de las formulaciones. A través del método de casting se elaboraron las películas de bioplástico utilizando tres formulaciones y tres variaciones con diferentes proporciones: almidón/glicerina con 33/67 %, 50/50 % y 67/33 %; almidón/urea con 33/67 %, 50/50 % y 67/33 %; y, almidón/glicerina/urea con 44/33/22 %, 44/28/28 % y 44/22/33 %.

Al obtener las películas de bioplástico se evaluó la degradabilidad en solución acuosa, en donde las muestras que contenían glicerina obtuvieron un mayor porcentaje de degradabilidad a treinta días con un 51,76 % en medio ácido para la formulación almidón/glicerina 67/33 % y una degradabilidad de 37,99 % para la formulación almidón/glicerina 33/67 %. Además, se evaluó la degradabilidad por efecto de la radiación solar, en donde se determinó que existió un proceso de aumento de peso que no permitió comprobar si se trató de una degradabilidad de las muestras; de igual forma, las muestras que contenían únicamente glicerina presentaron un mayor aumento de peso a 30 días con un 25,98 % para la formulación almidón/glicerina 33/67 %.

Para la evaluación de la permeabilidad al vapor de agua se utilizó la norma ASTM E96/E96M-16 como referencia para la metodología experimental y se hicieron modificaciones de acuerdo con la disponibilidad de recursos en el laboratorio en el cual se realizó el experimento. Al evaluar la permeabilidad al vapor de agua se determinó que las muestras que contenían glicerina y urea tienen menor permeabilidad al vapor de agua y la formulación con proporciones de almidón/glicerina/urea 44/33/22 % presentó la menor permeabilidad con $4,30\text{E-}07 \text{ g/Pa}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^2$.

Utilizando el modelo de Peleg se determinó que la variación de aditivos no tiene una diferencia significativa en la desorción de agua contenida en las películas. Por último, se evaluó la tensión al rompimiento de las películas y se determinó que las películas de la formulación almidón/urea 67/33 % presentaron una mayor tensión de 0,44 MPa.

OBJETIVOS

General

Obtener una película bioplástica a partir del almidón extraído de la cáscara o de la pulpa del plátano (*Musa balbisiana*) y evaluar el efecto de la variación de aditivos en sus propiedades de degradación, mecánicas y de transferencia de masa.

Específicos

1. Determinar el rendimiento del almidón extraído de la cáscara y pulpa del plátano.
2. Comparar la degradabilidad de las formulaciones realizadas a partir de la fuente de almidón con mayor rendimiento en medio ácido, medio básico y por exposición a la radiación solar.
3. Evaluar el efecto de la variación de aditivos en las propiedades de permeabilidad al vapor de agua y sorción mediante la metodología experimental de la norma ASTM E96/E96M-16, que se usa como referencia para la evaluación con las formulaciones realizadas a partir de la fuente de almidón con mayor rendimiento.

4. Evaluar el efecto de la variación de aditivos y fuente del almidón en la propiedad mecánica de tensión según la norma ASTM D882 – 18 para las formulaciones realizadas a partir de la fuente de almidón con mayor rendimiento.

HIPÓTESIS

La variación en las propiedades de degradación, permeabilidad al vapor y tensión de un bioplástico obtenido a partir del almidón proveniente de la cáscara y pulpa del plátano verde (*Musa balbisiana*) depende de los aditivos empleados para su formulación.

Relación rendimiento-fuente del almidón

- Hipótesis nula (h_0): no existe una diferencia significativa entre el rendimiento del almidón obtenido a partir de la cáscara y a partir de la pulpa.

$$H_0: R_1 = R_2 = R_n = 0$$

- Hipótesis alternativa (h_1): existe una diferencia significativa entre el rendimiento del almidón obtenido a partir de la cáscara y a partir de la pulpa.

$$H_1: R_1 \neq R_2 \neq R_n \neq 0$$

Relación degradabilidad-formulación

- Hipótesis nula (h_0): la variación de la formulación no tiene un efecto significativo en la degradabilidad del bioplástico en función del tiempo en un periodo de 30 días.

$$H_0: D_1 = D_2 = D_n = 0$$

- Hipótesis alternativa (h_1): la variación de la formulación tiene un efecto significativo en la degradabilidad del bioplástico en función del tiempo en un periodo de 30 días.

$$H_1: D_1 \neq D_2 \neq D_n \neq 0$$

Relación propiedad de sorción de agua-formulación

- Hipótesis nula (h_0): la variación de la formulación no tiene un efecto significativo en la propiedad de sorción al vapor del bioplástico en función del tiempo en un periodo de 30 días.

$$H_0: h_1 = h_2 = h_n = 0$$

- Hipótesis alternativa (h_1): la variación de la formulación tiene un efecto significativo en la propiedad de sorción al vapor del bioplástico en función del tiempo en un periodo de 30 días.

$$H_1: h_1 \neq h_2 \neq h_n \neq 0$$

Relación propiedad de permeabilidad al vapor de agua-formulación

- Hipótesis nula (h_0): la variación de la formulación no tiene un efecto significativo en la propiedad de permeabilidad al vapor del bioplástico en función del tiempo en un periodo de 30 días.

$$H_0: P_{va1} = P_{va2} = P_{va_n} = 0$$

- Hipótesis alternativa (h_1): la variación de la formulación tiene un efecto significativo en la propiedad de permeabilidad al vapor del bioplástico en función del tiempo en un periodo de 30 días.

$$H_1: P_{va1} \neq P_{va2} \neq P_{van} \neq 0$$

Relación propiedad mecánica de tensión-formulación

- Hipótesis nula (h_0): la variación de la formulación no tiene un efecto significativo en la propiedad mecánica de tensión del bioplástico.

$$H_0: T_1 = T_2 = T_n = 0$$

- Hipótesis alternativa (h_1): la variación de la formulación tiene un efecto significativo en la propiedad mecánica de tensión del bioplástico.

$$H_1: T_1 \neq T_2 \neq T_n \neq 0$$

INTRODUCCIÓN

El plástico es uno de los materiales con mayor abundancia en la actualidad, su uso excesivo es de preocupación ya que es una de las mayores fuentes de contaminación en el planeta por la acumulación de residuos que no ha sido debidamente controlada. Uno de sus principales impactos es la contaminación de los cuerpos de agua (océanos, mares, ríos, entre otros) y pone en peligro la flora y fauna marina. De igual forma, los plásticos también son una fuente de contaminación atmosférica ya que en el proceso se utilizan derivados del petróleo como materias primas o combustibles y al ser descartados de forma descontrolada liberan sustancias tóxicas en su proceso de descomposición y tardan varios años en degradarse por completo.

Frente a tal problemática ambiental han surgido varias alternativas que buscan disminuir el impacto que generan los plásticos y se han ido realizando investigaciones para elaborar polímeros biodegradables a partir de distintas fuentes naturales, las cuales permiten que el proceso de degradación sea mucho más rápido y algunos pueden ser utilizados como fuente de energía o en la agricultura.

Los bioplásticos son una parte importante de los polímeros biodegradables, los cuales son extraídos a partir de fuentes naturales renovables y residuos orgánicos tales como la biomasa, microorganismos, monómeros, entre otros. Uno de los materiales más utilizados para la fabricación de bioplásticos son los almidones, éstos provienen de varias fuentes vegetales y pueden ser extraídos de las semillas, cáscaras, raíces, tubérculos, entre otros., y presentan características favorables para el medio ambiente.

Una fuente de almidón es el plátano, una fruta perecedera y con rigurosas normas de exportación, esto provoca una acumulación de volúmenes que no cumplen con las características principales para su comercialización, por lo que una cantidad importante de los cultivos de plátano no pueden ser distribuidos, por lo que esta parte no aprovechada como alimento puede ser utilizada para la fabricación de polímeros biodegradables y de esta forma se contribuya a combatir la contaminación ambiental.

Durante la investigación se procesó la cáscara y la pulpa del plátano para obtener un almidón, se seleccionó la pulpa como fuente de almidón con mayor rendimiento y se realizaron tres formulaciones con glicerina, urea y tres variaciones utilizando los plastificantes por separado y juntos. Por último, se procedió a evaluar el efecto de la variación de los aditivos en las propiedades de degradabilidad en solución acuosa; y por exposición a la radiación solar. También se realizó el análisis de tensión al rompimiento en función de la variación de aditivos.

Se introdujo el análisis permeabilidad al vapor de agua, pérdida de humedad, variables que en la actualidad no se han implementado en los estudios de bioplásticos en los trabajos de investigación anteriores y se introduce como una alternativa nueva en Guatemala para su aplicación en futuros trabajos ya que esto influye en la capacidad de las películas de bioplástico para el almacenamiento de productos que pueden ser sensibles a las variaciones de humedad en su composición. Para la metodología experimental se utilizó como referencia la norma ASTM E96/E96M-16 ajustando el experimento a la disponibilidad de recursos en el laboratorio asegurando el cumplimiento de los objetivos planteados y asegurando que los resultados estuvieran fundamentados estadísticamente.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1. Antecedentes

La industria del plástico es una de las más grandes y de mayor crecimiento desde principios del siglo XIX, superando la mayoría de otras actividades industriales. En 1990, la producción alcanzó los 100 millones de toneladas y en la actualidad ya supera los 160 millones de toneladas encontrándose únicamente por debajo de la demanda de hierro y de acero, y abarca el mercado del vidrio, papel y metal debido a sus características físicas y mecánicas.

En la actualidad, la gran mayoría de los plásticos son desarrollados a partir de los derivados del petróleo, utilizando millones de litros de petróleo; sin embargo, éste no es un elemento biodegradable y su acumulación es muy perceptible. Un ejemplo de estas alternativas es el uso del almidón, un compuesto natural, económico y abundante debido a su fácil obtención a partir de los vegetales; éstos, presentan una alternativa muy importante, ya que es degradable en condiciones ambientales y es una opción para reducir la dependencia del petróleo. Se han realizado diversos estudios del almidón como fuente para la elaboración de bioplásticos.

En la Universidad de San Carlos de Guatemala, los estudiantes Carlos Iguardia; Ana Gálvez y, Leonel Mollinedo; realizaron estudios sobre bioplásticos elaborados a partir del almidón de banano verde y del maíz en el caso de los últimos dos, utilizando diferentes plastificantes como carboximetilcelulosa, ácido acético y glicerina. Evaluaron pruebas de rendimientos de extracción, elongación, dureza y degradabilidad en distintos medios como agua, intemperie y ácido

sulfúrico; sin embargo, no realizaron pruebas de permeabilidad y de pérdida de humedad o ganancia, las cuales son realizadas en los bioplásticos para aplicaciones industriales.

En el año 2010, Luis Lara de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, en su estudio de *Efecto de la degradación por inmersión en ácido nítrico sobre las propiedades de un poliéster reforzado con fibras de vidrio* llevó a cabo la prueba de degradabilidad en un ácido que consiste en la inmersión de probetas de poliéster reforzadas con vidrio en ácido nítrico al 5 % y realizó mediciones hasta 90 días. En el estudio se concluyó que el ácido nítrico ocasiona la degradación de la interface, con avance del ataque, desde afuera hacia adentro, a través de la porosidad generada por la degradación del polímero y que a mayor tiempo de exposición se obtiene un aumento en la degradación, a tal punto que los refuerzos aportados por la fibra se desprenden completamente de la matriz polimérica. En este estudio se emplea la comparación de la degradabilidad en una base en solución acuosa con la degradabilidad catalizada por el ácido clorhídrico y también se evaluará la exposición a la radiación solar.

En el año 2013, Gloria Ivette Bolio López en la Universidad Popular de la Chontalpa, México, realizó el estudio titulado *El intemperismo y la biodegradación de material compuesto de ácido poliláctico reforzado con whiskers de celulosa* el cual consistió en la evaluación de la biodegradación en el suelo del material compuesto de ácido poliláctico previamente expuesto y no a los efectos de la radiación UV, en la que aplicaron el intemperismo acelerado en cámaras QUV-Panel, en el cual se concluyó que la exposición a los rayos UV en la cámara facilitaron la biodegradación de las películas de bioplástico y que la humedad relativa como factor climático, facilita la degradación hidrolítica. En este caso no se cuenta con el equipo necesario para realizar la evaluación en una cámara QUV, por lo que se utilizará únicamente el efecto de la exposición a la radiación

solar en un ambiente en el que puede presentarse el efecto de la humedad del ambiente y se realizará la comparación con la degradabilidad catalizada por electrolitos fuertes en solución acuosa.

En el año 2014, Diana Navia, realizó el estudio titulado *Evaluación de propiedades físicas de bioplásticos termo-comprimidos elaborados con harina de yuca*, en el cual utilizó fibra de dique y glicerina como aditivos y realizó el análisis de flexión y tensión. Se concluyó que a mayor temperatura y menor presión en el proceso de obtención de los bioplásticos presentaron una mayor tensión al rompimiento y una mayor flexión; sin embargo, en el estudio comparó las presiones y temperaturas de obtención del bioplástico, por lo que en el presente estudio se llevará a cabo la comparación de los plastificantes y proporciones utilizadas a cambio del efecto de temperatura y presión de obtención.

Siti Othman de la Universidad de Putra Malaysia, en su estudio *Propiedades de absorción de agua y permeabilidad al agua de película comestible hecha de residuos de cáscara de papa*, estudió la permeabilidad al vapor de agua y la sorción de agua basado en el modelo de Peleg en films elaborados a partir del desperdicio de la papa utilizando ácido ascórbico y glicerina como aditivos, en la práctica se realizó las mediciones por siete días en la evaluación de la sorción de agua y en la evaluación de la permeabilidad al vapor, realizó mediciones hasta obtener un 10 % de pérdida de peso y concluyó que para reducir la cantidad de humedad absorbida por las películas comestibles y / o los productos alimenticios empaquetados con las películas y, por lo tanto, aumentar su vida útil, se recomienda que las películas se mantengan a una humedad y temperatura relativas bajas. En este estudio, se realizarán variaciones de proporción de glicerina, se utilizará también urea como plastificante y se realizará la mezcla de glicerina y urea para evaluar el efecto de cada plastificante y la unión de ambos.

1.2. Justificación

En el mundo contemporáneo, el uso de plásticos obtenidos a partir de los derivados del petróleo se ha vuelto parte fundamental en el día a día, esto se debe a sus propiedades mecánicas y fisicoquímicas que permiten reemplazar el uso de materiales más costosos y menos manipulables. Esto ha tenido como efecto un gran desarrollo en la industria a nivel mundial, pero de igual forma ha sido una de las grandes causas de los problemas ambientales que existen en la actualidad como la contaminación y el calentamiento global, esto se debe a una inadecuada gestión de los residuos y por el uso excesivo de recursos no renovables.

La generación de basura por plásticos en Guatemala es tan grave que en octubre del año 2017 una isla de desechos proveniente del río Motagua inundó el Caribe hondureño, causando la protesta del vecino país. Un estudio realizado por Fernando Grajeda, fundador de Benam&Co y un grupo de estudiantes de la Universidad Galileo mostró de forma conservadora que:

En Guatemala se usan cada mes más de 1 mil millones de bolsas plásticas en tiendas de barrios, mercados populares y supermercados, entre otros lugares evaluados. De igual forma advirtieron que esas bolsas desechables son equivalentes a llenar cinco veces el lago de Atitlán con una extensión de 125km² y una profundidad de 320m, y también acosado por la contaminación.¹

Frente a esta problemática surge una alternativa muy importante que puede formar parte de la disminución de la contaminación ambiental y lograr con esto la recuperación de muchos cuerpos de agua, bosques, flora y fauna que han sido afectados en gran forma. El uso de recursos renovables para la producción de

¹ AFP. *Guatemala busca un respiro ante el sofoco de las bolsas plásticas*.
<https://www.soy502.com/articulo/guatemala-busca-respiro-ante-sofoco-bolsas-plasticas-50172>.
Consulta: mayo de 2020.

polímeros biodegradables constituye una oportunidad estratégica para el cuidado del medio ambiente y disminuir la acumulación de materiales sintéticos.

Los bioplásticos han llegado como una solución para reducir las emisiones de dióxido de carbono como el calentamiento global que se ha convertido en una seria preocupación a nivel mundial; los bioplásticos a diferencia de los plásticos comunes no requieren una introducción neta de carbono en los ecosistemas y el dióxido de carbono liberado por los bioplásticos provienen de la biomasa y por lo tanto es potencialmente una fuente de carbono en su ciclo de vida.

Los almidones constituyen un recurso renovable muy importante en la alimentación y en los últimos años ha sido estudiado para la elaboración de bioplásticos ya que proporciona características y propiedades similares a los plásticos convencionales provenientes del petróleo, pero a diferencia de éstos últimos, se degradan en el ambiente sin provocar contaminación, la gran mayoría vuelven a ser parte del ecosistema como una fuente energética y de cultivos. Los almidones pueden ser encontrados en vegetales como la papa, el plátano, la yuca, entre otros.

La producción de plátano constituye un rubro de importancia económica para Guatemala como generador masivo de empleo y en materia de exportación como generador de divisas. La producción proviene especialmente de compañías agroexportadoras ubicadas en Izabal y la Costa Sur. Además, que pequeñas unidades productoras abastecen el mercado local para consumo interno y centroamericano.

En Guatemala, durante el año 2013, la cosecha alcanzó los 4 millones de quintales según datos aportados por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA), con un empleo directo en campo de 2 129 919 jornales/año (2011), y un equivalente a 7 607 empleos permanentes. El plátano, (Partida arancelaria 0803,00.20 y 0803,10.00 del SAC), tiene el 15 % de derechos arancelarios a la importación, sobre el valor CIF. La producción nacional del plátano se encuentra

distribuida de la siguiente forma: Escuintla (43 %), San Marcos (22 %), Suchitepéquez (12 %), Izabal (11 %) y los demás departamentos de la República suman el (12 %) restante.²

Hay una gran diferencia nutricional entre un plátano verde y uno maduro. Un plátano verde está casi todo formado por un 80 % de almidón y un 7 % de sacarosa. En cambio, un plátano maduro contiene un 90 % de sacarosa y solo un 7 % de almidón.

Tabla I. **Comercio exterior del plátano para el período 2005 al 2013, en Toneladas Métricas (TM)**

Año	Importación		Exportación	
	TM	US\$	TM	US\$
2005	37,50	13 614,00	97 899,75	23 041 825,00
2006	130,76	44 948,00	75 499,60	15 679 097,00
2007	64,37	21 433,00	117 043,08	22 792 583,00
2008	142,62	44 315,00	122 749,98	27 561 194,00
2009	95,91	16 230,00	118 783,96	33 451 674,00
2010	65,14	9 988,00	107 848,33	26 858 781,00
2011	100,49	23 992,00	106 364,90	33 197 170,00
2012	887,59	208 371,00	121 238,79	34 246 387,00
2013	417,45	96 438,00	44 343,79	15 420 766,00
Totales	1 941,83	479 329,00	911 772,18	232 249 477,00

Fuente: DeGuate. *Producción de Plátano en Guatemala*.

<https://www.deguate.com/artman/publish/produccion-guatemala/produccion-de-platano-en-guatemala.shtml>. Consulta: 15 de agosto del 2019.

Por lo anterior, en esta investigación se propone la elaboración de un bioplástico a partir del almidón proveniente del plátano verde, con el cual se evaluará el efecto de la variación de aditivos a través de las pruebas de

² DeGuate. *Producción de Plátano en Guatemala*. <https://www.deguate.com/artman/publish/produccion-guatemala/produccion-de-platano-en-guatemala.shtml>. Consulta: mayo de 2020.

degradación en medio ácido y básico en solución acuosa, degradación por exposición a la radiación solar; la permeabilidad al vapor de agua y la propiedad mecánica de tensión para establecer una relación entre la fuente del almidón, el uso de aditivos y las propiedades del plástico obtenido con el objetivo de proponer una alternativa al uso de plásticos convencionales y aportar a la conservación del medio ambiente a través de una alternativa que puede dar un valor agregado a la economía del país.

1.3. Determinación del problema

El plástico, a pesar de ser un material versátil por todas sus utilidades para el ser humano, también presenta problemas para el medio ambiente. Los plásticos a través de los años han sido fabricados por medio de derivados del petróleo, por lo que cuando es desechado tiene un periodo de degradación de aproximadamente 200 años y durante este proceso libera sustancias tóxicas provocando serios daños al medio ambiente; también, cuando se tira en la calle, puede terminar tapando alcantarillas y rejillas por donde al agua debe pasar cuando llueve, cuando llega a ríos y océanos, puede matar animales que queden atrapados en el interior de las bolsas. Por lo anterior, es necesaria la búsqueda e implementación de plásticos provenientes de recursos naturales renovables y que sean más fáciles de producir y una degradación más rápida para no afectar al medio ambiente.

1.3.1. Definición

La fabricación de bioplásticos a partir del almidón proveniente de vegetales como el plátano, presenta una alternativa muy importante para reemplazar a los plásticos provenientes de derivados del petróleo como el polietileno y el poliestireno. Estos bioplásticos es posible extraerlos a partir de la mezcla del

almidón con plastificantes para que presenten las mismas características pero que también tengan una degradación más rápida y que no genere sustancias tóxicas, contribuyendo de esta forma al mejoramiento del medio ambiente.

1.3.2. Delimitación

Este trabajo se limita exclusivamente a la evaluación de las propiedades de degradación, permeabilidad al vapor y tensión de un bioplástico extraído a partir del almidón de la pulpa y cáscara del plátano, utilizando diferentes formulaciones con plastificantes, se evaluarán los rendimientos correspondientes a la extracción del almidón y a la elaboración del bioplástico.

El estudio se realizó durante el mes de noviembre del año 2019 a julio del año 2020, con la finalidad de evaluar si el bioplástico presenta variaciones en sus propiedades de degradación, permeabilidad y tensión al corte en función de la fuente, plastificantes y medio de degradación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Polímeros

A continuación de los siguientes incisos se describe a detalles la definición y estructura de los polímeros.

2.1.1. Definición y estructura del polímero

Un polímero puede definirse como una sustancia química compuesta de una cierta cantidad de unidades básicas que se repiten (monómeros) unidas consecutivamente por enlaces covalentes.

El grado de polimerización está dado por el número de monómeros que conforman la cadena polimérica, y puede variar en un amplio rango hasta llegar a 10^4 o 10^6 unidades en su estructura molecular. Un compuesto polimérico puede contener diversos tipos de unidades monoméricas en su cadena.

La policondensación en la formación de los polímeros depende de la naturaleza de los grupos funcionales de las moléculas que interaccionan entre sí. Todos los monómeros capaces de formar polímeros deben tener, por lo menos, dos núcleos activos para que la nueva molécula formada conserve su configuración activa semejante a la original. Cuando las cadenas poliméricas tienen múltiples grupos funcionales iónicos, sean libres o esterificados, se les denomina polielectrolitos.

2.1.2. Clasificación de los polímeros

- De acuerdo con su carga eléctrica: los que no tienen carga se denominan no iónicos. Los demás pueden ser catiónicos (carga positiva) o aniónicos (carga negativa).
- De acuerdo con su origen: pueden ser naturales o sintéticos poseyendo características que los diferencian unos a otros, las cuales se explican a continuación.
- Polímeros naturales: son aquellos que se producen debido a las reacciones bioquímicas naturales en animales y plantas. Son polímeros que muchas veces no tienen una sola composición química bien definida, pues están constituidos principalmente por varios tipos de polisacáridos (almidón, celulosa, glucósidos, entre otros.) y proteínas (caseína, olieratina, gelatina, entre otros.). Algunos de ellos tienen propiedades coagulantes o floculantes.
- Polímeros sintéticos: son los compuestos orgánicos producidos mediante la transformación química del carbón y del petróleo e incluyen a la mayoría de los polímeros de manufactura industrial, que comúnmente se expenden en el comercio. La toxicidad de los polielectrolitos sintéticos debe investigarse y someterse a un exigente control de calidad, pues a veces los monómeros utilizados en la producción de polímeros son tóxicos.

2.1.3. Clasificación de polímeros según sus propiedades

- Termoplásticos: son polímeros que no pueden fluir por efecto de la temperatura para ser remodelados, es decir que pasa por un estado líquido, y después se solidifican al ser calentados. El material solidificado, denominado termofijo, se forma por reacciones químicas irreversibles que forman enlaces cruzados al calentar el polímero termofijo. Además, este tipo de polímeros no se pueden reciclar. La baquelita y la melanina son ejemplos de polímeros termofijos.
- Termoestables: hacen referencia al conjunto de materiales formados por polímeros unidos mediante enlaces químicos adquiriendo una estructura final altamente reticulada, la cual es responsable directa de las altas resistencias mecánicas y físicas que presentan dichos materiales comparados con los materiales termoplásticos y elastómeros. Entre los termoestables se encuentran las resinas epoxi, usadas como materiales de pintura y recubrimientos; resinas fenólicas.
- Elastómeros: los elastómeros que poseen cadenas con libertad de movimiento molecular. Este tipo de polímeros son flexibles, que pueden estirarse y regresar a su forma original cuando la fuerza de alargamiento cesa. Sin embargo, los entrelazamientos en estos polímeros limitan el grado en que se pueden deformar estos materiales y después regresar a su forma original cuando se les suelta.
- 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*.

2.1.4. Polímeros biodegradables

Son un tipo específico de polímero que se descompone después de cumplir su propósito para resultar en subproductos naturales como gases (CO₂, N₂), agua, biomasa, y sales inorgánicas. Estos polímeros se encuentran tanto naturalmente como fabricados sintéticamente, y en gran parte consisten en grupos funcionales de éster, amida, y éter. Sus propiedades y mecanismo de ruptura están determinados por su estructura exacta. Estos polímeros son a menudo extraídos por reacciones de condensación, polimerización por apertura de anillo, y catálisis por metales. Existe una gran cantidad de ejemplos y aplicaciones de polímeros biodegradables.³

2.1.4.1. Biopolímeros y formas de obtención

- Extracción de bioplásticos por biomasa: la extracción por biomasa se realiza mediante extracción o remoción directa de la biomasa de los polisacáridos como el almidón o celulosa y de proteínas como queratina, colágeno y caseína.
- Extracción química de bioplásticos: este tipo de extracción se lleva a cabo mediante una extracción química clásica a partir de monómeros de fuentes renovables, como los poliácidos glicoles y el ácido poliláctico.
- Extracción de bioplásticos por microorganismos: son extraídos mediante la aplicación de bacterias productoras nativas o modificadas de forma genética, entre estos destacan el polihidroxialcanoatos y poli-3 hidroxibutarano.
- Extracción por mezcla de polímeros biodegradables: los bioplásticos pueden sintetizarse mediante la mezcla de dos o más polímeros biodegradables, por ejemplo, el polivinilalcohol y las policaprolactonas.⁴

2.1.4.2. Bioplásticos

Los bioplásticos son polímeros elaborados a partir de recursos renovables. A diferencia de los plásticos derivados del petróleo, los bioplásticos resultan más ecológicos, dado que presentan una huella de carbono reducida y un uso reducido de los combustibles fósiles. El costo de los bioplásticos no es dependiente del precio del petróleo, convirtiéndolos en una alternativa segura y

³ BENITEZ, Nicky. *Aplicación de Biopolímeros en el campo medicinal*. https://www.metacrilatos.net/aplicacion-de-biopolimeros-en-el-campo_80/. Consulta: mayo de 2020.

⁴ *Ibíd.*

viable. La característica principal de estos polímeros se basa en la degradación, la cual se da bajo condiciones ambientales y en un corto periodo de tiempo. Además, los bioplásticos cumplen con las mismas características que los plásticos convencionales como: flexibilidad, resistencia, ductilidad y capacidad de barrera a la humedad.

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

2.1.4.3. Almidones

El almidón es una materia prima con un amplio campo de aplicaciones que van desde la impartición de textura y consistencia en alimentos hasta la manufactura de papel, adhesivos y empaques biodegradables. Debido a que el almidón es el polisacárido más utilizado como ingrediente funcional (espesante, estabilizante y gelificante) en la industria alimentaria, es necesario buscar nuevas fuentes de extracción, ya que con una producción mundial de 48,5 millones de ton/año, existe una demanda insatisfecha del mismo.

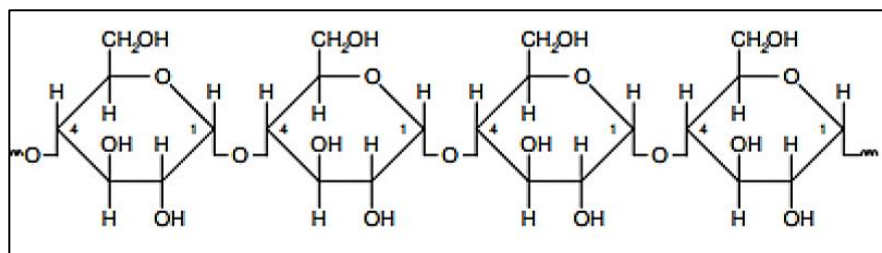
Los gránulos de almidón se encuentran en un sistema polimérico semicristalino, donde la cristalinidad varía de 15 a 45 %, y es atribuida a las cadenas cortas lineales de la amilopectina, que forman dobles hélices organizadas en una estructura cristalina tridimensional. Durante el proceso de gelatinización, el orden molecular dentro de los gránulos es destruido gradual e irreversiblemente, por esto la temperatura de gelatinización es característica para cada tipo de almidón y depende fundamentalmente de la transición vítrea de la fracción amorfa del almidón.⁵

En los polímeros lineales de amilasa las unidades de anhidra glucosa están ligadas por la configuración alfa a través de las posiciones 1,4. Los polímeros complejos de amilopectina difieren de la amilasa en que, además de uniones 1,4, tiene uniones 1

⁵ HERNÁNDEZ MEDINA, Marilyn. *Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México*. <https://www.scielo.br/j/cta/a/BFmq3pZQMP33pwHsyNJK9Yf/?format=pdf&lang=es>. Consulta: junio de 2020.

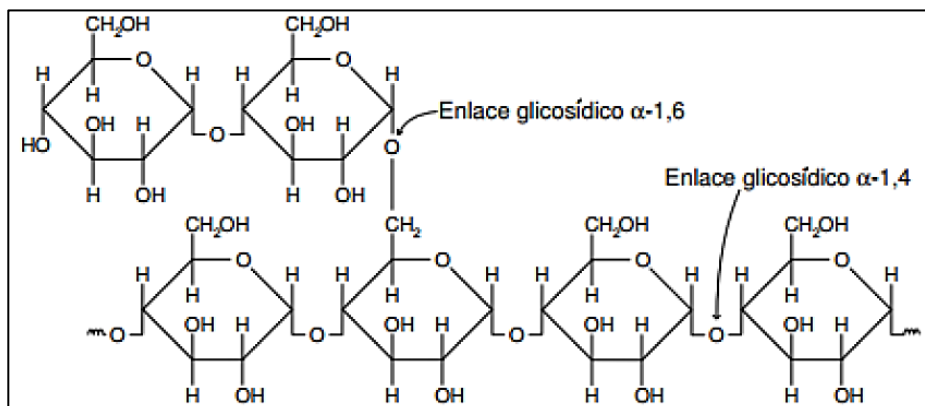
6 cada 26 o más unidades representan cerca del 5 % de todas las uniones de los polímeros.⁶

Figura 1. **Estructura de segmentos de amilosa**



Fuente: RUIZ, Gladys. *Obtención y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca*. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=83520401>. Consulta: 18 de agosto de 2019.

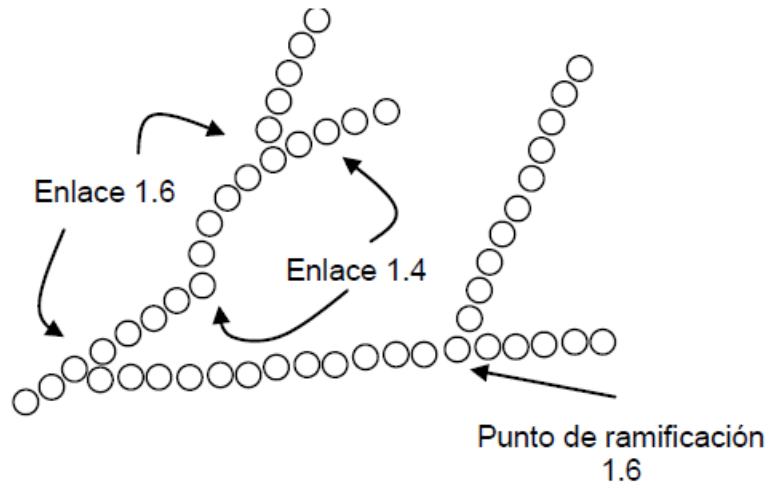
Figura 2. **Estructura de segmentos de la amilopectina**



Fuente: RUIZ, Gladys. *Obtención y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca*. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=83520401>. Consulta: 18 de agosto de 2019.

⁶ RUIZ, Gladys. *Obtención y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca*. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=83520401>. Consulta: 18 de agosto de 2019.

Figura 3. **Diferencia esquemática entre amilosa y amilopectina**



Fuente: ARBOLEDA, Jorge. *Polímeros naturales y su aplicación como ayudantes de floculación*.
<https://www.ircwash.org/sites/default/files/253-75PO.pdf>. Consulta: 18 de agosto de 2019.

- **Amilosa:**

Es un polímero lineal que consta de moléculas de glucosa unidas por enlaces glucosídicos α -D-(1 $\rightarrow$ 4), el número de unidades varía entre los diferentes tipos de almidones, pero generalmente entre 1 000 unidades de glucosa por molécula de amilosa y tiene forma de espiral. En un extremo de la macromolécula la unidad de glucosa contiene el hidroxilo de carbono anomérico libre, por lo cual se llama extremo reductor. En el extremo opuesto, o no reductor, el hidroxilo del carbono anomérico forma parte del enlace glucosídico (figura 2).

La abundancia de hidroxilos otorga propiedades hidrofílicas al polímero, impartándole afinidad por el agua (Aspinal, 1983). Sin embargo, debido a su linealidad, los polímeros de la amilosa tienden a agruparse muy estrechamente

en forma paralela, mediante la formación de puentes de hidrógeno entre los hidroxilos de los polímeros adyacentes reduciendo así su afinidad por el agua.

- **Amilopectina:**

Es un polímero ramificado formado por cadenas lineales constituidas por 15-35 moléculas de glucosa unidas por enlaces α -D-(1 $\rightarrow$ 4). Estas cadenas están unidas entre ellas por enlaces α -D-(1 $\rightarrow$ 6) que forman los puntos de ramificación (figura 3 y 4). La amilopectina tiene 5-6 % de enlaces α -D- (1 $\rightarrow$ 6) y está constituida de alrededor de 100 000 moléculas de glucosa. El gran tamaño y naturaleza ramificada de la amilopectina reduce la movilidad de los polímeros e interfiere su tendencia a orientarse muy estrechamente para permitir niveles significantes de enlaces de hidrógeno. Como resultado, los soles o soluciones acuosas de amilopectina se caracterizan por su claridad y estabilidad como medida de la resistencia a gelificarse durante el almacenamiento.

El nivel de amilosa encontrado en el almidón varía dependiendo del origen. Muchos almidones tales como del maíz común, trigo, papa y yuca contienen alrededor de 18-28 por ciento de amilosa; el maíz y el trigo están en el extremo alto del rango, mientras la papa y la yuca están en el extremo más bajo.⁷

2.1.4.4. Propiedades fisicoquímicas del almidón

“Entre las propiedades fisicoquímicas más importantes se encuentra la composición primal (contenido de proteína cruda, extracto etéreo, fibra cruda, cenizas y humedad), las características del gránulo (tamaño, color y forma, naturaleza cristalina), el peso molecular y contenido de amilosa.”⁸

Tabla II. **Propiedades de los componentes del almidón**

Propiedad	Amilosa	Amilopectina
Estructura molecular	Esencialmente lineal	Ramificada
Longitud de cadena promedio	103	20-25

⁷ RUIZ, Gladys. *Obtención y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca*. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=83520401>. Consulta: 18 de agosto de 2019.

⁸ Ibíd.

Continuación de la tabla II.

Propiedad	Amilosa	Amilopectina
Grado de polimerización	103	104-105
Complejo con yodo	Azul (650nm)	Púrpura (550nm)
Afinidad con yodo	19-50 %	1 %
Valor azul	1,4	0,05
Estabilidad en solución acuosa	Retrograda fácilmente	Estable
B-amilasa	70	55-60
B-amilasa y dextrinasa	100	100
Propiedad de película	Fuerte	Quebradiza

Fuente: COSTAS, Biliaderis. *The structure and interactions of starch with food constituents*.

<https://doi.org/10,1139/y91-011>. Consulta 18 de agosto de 2019.

2.1.5. Aditivos

- Antiestáticos: la mayoría de los polímeros, puesto que son malos conductores, acumulan carga por electricidad estática. Los agentes antiestáticos atraen la humedad del aire hacia la superficie del polímero, mejorando la conductividad superficial del mismo y reduciendo la probabilidad de chispas o descargas.
- Catalizadores: la polimerización suele iniciarse añadiendo un acelerador de reacción, y dentro de la industria de los plásticos los más empleados son los peróxidos. Hay catalizadores positivos y negativos, los primeros intervienen en la primera fase de la polimerización y aceleran la reacción, los segundos se utilizan en la última fase del proceso y sirven para desacelerar la reacción concluyendo así la polimerización.
- Estabilizadores: son materiales que se añaden para mejorar la estabilidad química de los polímeros a lo largo del tiempo y protegerlos del calor, la luz y el oxígeno.
- Pigmentos: se usan con tamaño de partícula muy fino de modo que se consiga una dispersión lo mejor posible en el polímero. Los más frecuentes son el óxido de titanio para el color blanco, negro de humo para el negro y diferentes óxidos de hierro para colores ocre y marrones.

- **Plastificantes:** su función en los materiales plásticos consiste en adaptar la flexibilidad y elasticidad a los requisitos de su utilización. Los plastificantes generalmente son líquidos, inodoros, incoloros y de baja volatilidad que al añadir a otro material cambia sus propiedades físicas, mecánicas y suavizan el polímero por debajo de su transición vítrea para reducir su cristalinidad o punto de fusión.

Los plastificantes tales como el glicerol y el sorbitol reducen los enlaces de hidrógeno internos y al mismo tiempo aumentan los espacios intermoleculares evitando las grietas en los bioplásticos durante la manipulación y almacenamiento. Los plastificantes aumentan la permeabilidad al vapor de agua y su higroscopicidad en películas laminadas, ya que la mayoría de los plastificantes utilizados en las películas de almidón tienen carácter hidrófilo y también brinda al producto final características elásticas permitiendo su maleabilidad.

- **Reforzantes:** se introducen en forma de fibras en la matriz polimérica, tanto termoendurecible como termoplástica, en proporciones que van desde el 7 al 50 %. El más utilizado es la fibra de vidrio.
- **Rellenos:** dependiendo de su tipo, los rellenos pueden mejorar la resistencia, la dureza, la tenacidad, la resistencia a la abrasión o la rigidez de los plásticos. Entre los materiales usados como rellenos se pueden mencionar la sílice, el carbonato de calcio y la arcilla.
- **Retardantes de llama:** el material más útil de los que imparten retardo a la inflamación de los plásticos es el trióxido de antimonio. El factor más importante para reducir la inflamabilidad de los materiales parece ser: la eliminación de los combustibles volátiles, la producción de una barrera térmica y el ahogamiento de las reacciones en cadena en la llama.⁹

2.1.6. Propiedades de los plásticos y bioplásticos

- Mecánicas
- Térmicas
- Eléctricas
- Químicas
- Absorción de humedad
- Permeabilidad

⁹ HIDALGO APAZA, Angie Arlette. *Bioplásticos obtenidos a partir del almidón de la cascara de plátano (Musa paradisiaca); una nueva y ecológica alternativa a los plátanos convencionales*. https://prezi.com/nutoyi_r8tdr/investigadores/. Consulta: mayo de 2020.

2.1.7. Plastificantes de bioplásticos

Los productos fabricados únicamente por almidón destacan por su elevada fragilidad. Para combatir esta limitación, se hace necesaria la adición de distintos componentes denominados plastificantes con el objetivo de mejorar su flexibilidad y procesabilidad. La incorporación de los plastificantes mejora el proceso de gelatinización, proceso indispensable para la obtención del almidón termoplástico. La fragilidad antes citada de los termoplásticos fabricados se contrarresta disminuyendo la absorción de agua del almidón con la ayuda de diversos aditivos plastificantes en el proceso de mezclado.

Un plastificante óptimo debe ser polar, hidrofílico y ser compatible con el almidón de plátano en este caso. Otro requerimiento importante es que su punto de ebullición sea menor que la temperatura programada en la mezcladora para evitar su evaporación durante el proceso de mezclado.

Los plastificantes juegan un papel crucial en la microestructura y cristalización del almidón termoplástico elaborado observándose diferencias en su aspecto físico y sus propiedades mecánicas finales. La proporción de plastificante añadido influye por ser el causante de la desestructuración de las cadenas del almidón y repercute tanto en sus propiedades morfológicas y mecánicas, así como en sus propiedades térmicas de transición vítrea.¹⁰

- Agua: el agua es utilizada comúnmente como un plastificante para lograr la desestructuración del almidón en las mezclas utilizadas para obtener almidones termoplásticos. Se utiliza con el objetivo de lograr mejores propiedades en el producto final como se citó anteriormente. Es el plastificante natural más económico, y por este motivo es el de más fácil acceso. Es un plastificante efectivo del almidón por su compatibilidad.
- Glicerina: junto con el agua destilada, el glicerol es el plastificante más comúnmente utilizado en los diferentes estudios que se han realizado sobre la fabricación de polímeros termoplásticos a partir del almidón. Las mezclas que contienen glicerol tienen un aspecto morfológico suave y uniforme.

En teoría deben tener un aspecto homogéneo final, esta característica es un claro indicador de que el almidón ha plastificado. Este componente presenta una gran utilidad para retardar la retrogradación de los productos plastificados y su acción como lubricante facilita la movilidad de las cadenas poliméricas del almidón.

A su vez, este plastificante reduce significativamente la resistencia a la tracción si su contenido en peso en la mezcla está por encima del 15 %. Para contenidos superiores al 25 % en peso de glicerol, se aprecia un cierto grado de mejora en la capacidad elástica del material.

¹⁰ MERÉ MARCOS, Javier. *Estudio del procesado de un polímero termoplástico basado en almidón de patata amigable con el medio ambiente*. https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10823/PFC_Javier_Mere_Marcos.pdf;jsessionid=8FF9E3AA934C55C3929E89FFD9B508CB?sequence=1. Consulta: junio de 2020.

- Urea: la urea se presenta como un sólido cristalino y blanco de morfología esférica o granular, posee un alto contenido de nitrógeno. Es soluble en agua y en alcohol; no presenta peligrosidad, no es tóxica ni inflamable. Añadida en grandes proporciones previene la retrogradación por más tiempo que otros plastificantes, aumentando la estabilidad del bioplástico elaborado.

Añadida en grandes proporciones de peso como plastificante y debido a su descomposición térmica en la mezcladora a causa de la elevada temperatura, se puede transformar en amoníaco, provocando defectos en la elaboración de los polímeros.¹¹

- Carboximetilcelulosa (CMC): es un polímero que forma película al solidificar, actúa como ligante, espesante y estabilizante, Incrementa la viscosidad en plásticos como el látex. La Carboxi Metil Celulosa o CMC es una sal soluble en agua.

Pertenece a la familia de los polímeros producido gracias a la eterificación de la celulosa natural substituyendo los grupos de hidróxido por grupos de carboximetil en la cadena de la celulosa; además, produce materiales transparentes, lo que es una cualidad importante en los recubrimientos, pues permite mantener la apariencia de los productos.

La CMC se ha usado como parte de películas comestibles para retrasar con éxito el proceso de maduración y senescencia de frutos de mango.

2.1.8. Ventajas de los polímeros biodegradables

Los plásticos biodegradables ofrecen amplios beneficios para mejorar el estilo de vida y el medio ambiente, a comparación con los plásticos convencionales.

¹¹ MERÉ MARCOS, Javier. *Estudio del procesado de un polímero termoplástico basado en almidón de patata amigable con el medio ambiente.* https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10823/PFC_Javier_Mere_Marcos.pdf;jsessionid=8FF9E3AA934C55C3929E89FFD9B508CB?sequence=1. Consulta: junio de 2020.

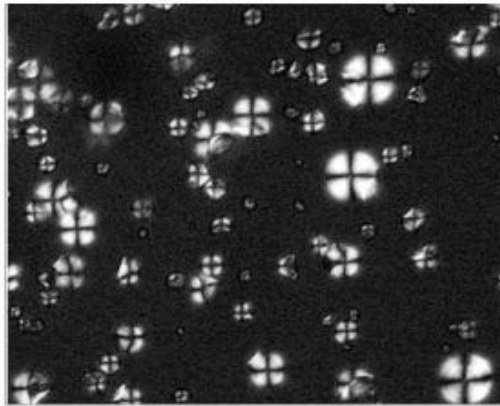
- **Tiempo de degradación:** los plásticos biodegradables tardan menos en descomponerse que los plásticos convencionales; por ejemplo, el polietileno y el polipropileno pueden tardar hasta 500 años en degradarse en comparación con plásticos biodegradables que pueden tardar no más de 5 años. La descomposición de estos materiales reduce el volumen de los vertederos sanitarios y producen agua y oxígeno molecular.
- **Salud ambiental:** los plásticos biodegradables se descomponen con mayor facilidad sin causar daños al ambiente. El proceso de fabricación de plásticos biodegradables es más amigable para el planeta ya que produce menos gases de efecto invernadero, reduciendo el daño a la capa de ozono.
- **Salud humana:** los plásticos biodegradables no perjudican a los seres humanos. Cuando se utilizan estos materiales, se reduce el peligro de que exista contaminación por algún tipo de emisión química al producirlos o utilizarlos.
- **Clasificación:** la utilización de plásticos biodegradables de manera regular facilitará la forma en que se manejan los desechos sólidos. Se invertirá menos tiempo en clasificar el tipo de plástico y se puede descartar con responsabilidad social.

2.1.9. Gelatinización y gelificación

El almidón en su estado nativo es insoluble en agua. Forma una suspensión temporal de grandes partículas, que no se disuelven en el medio que las rodea y se depositan en el fondo del recipiente a menos que esté en agitación constante. Las partículas pueden absorber pequeñas cantidades de agua. La absorción de

agua por el almidón es reversible si el almidón se seca y aún no ha sido cocido. El almidón no cocido presenta una forma de cruz de malta.

Figura 4. **Almidón no gelatinizado observado con luz polarizada**



Fuente: VACLAVIK, Vickie. *Fundamentos de Ciencia de los Alimentos*.

https://www.editorialacribia.com/libro/fundamentos-de-ciencia-de-los-alimentos_54069/.

Consulta: 18 de agosto de 2019.

Cuando el almidón se calienta en presencia de agua, se produce imbibición, o incorporación de agua en el gránulo. Esto se produce en las regiones menos densas y, posteriormente, en las regiones más cristalinas de la molécula de almidón. Los gránulos de almidón captan más agua irreversiblemente y se hinchan.

Este proceso de gelatinización funciona como espesante en los alimentos y en la industria. A medida que el almidón sale de los gránulos hinchados, la mezcla se convierte en un sol. Un sol es un sistema de dos fases constituido por una fase líquida continua y una fase sólida dispersa. Se puede verter y tiene baja viscosidad.

La gelatinización conlleva una pérdida de la estructura cristalina del almidón, que se presenta como la desaparición de la forma de cruz de malta cuando se observa bajo luz polarizada con un microscopio electrónico. La temperatura de gelatinización se alcanza dependiendo del tipo de almidón, entre 60 °C y 70 °C.

La energía cinética de las moléculas de agua caliente rompe los puentes de hidrógeno entre las moléculas de almidón y el agua y es capaz de penetrar en el gránulo de almidón, que provoca el hinchamiento.

2.1.10. Prueba de yodo para detección de almidón

La prueba de yodo permite detectar la presencia de almidón en alimentos. La reacción es el resultado de la formación de cadenas de poliyoduro (triyoduro, I₃⁻) los cuales se enlazan con el almidón en las hélices del polímero. En concreto, es la amilosa del almidón la que se une a las moléculas de yodo, formando un color azul oscuro, en ocasiones se torna negro. La amilopectina reacciona muy poco con el yodo.

2.1.11. Degradabilidad y biodegradabilidad

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

2.1.11.1. Criterios de biodegradabilidad

El criterio general para seleccionar un polímero como material biodegradable considera tanto las propiedades mecánicas requeridas como el tiempo de degradación necesario para la aplicación particular. Las características de estos dos parámetros son:

- Propiedades mecánicas: los factores que influyen en las propiedades mecánicas son la selección del monómero y del iniciador de reacción, la presencia de aditivos y las condiciones de procesado.
- Velocidad de degradación.
- Condiciones del medio: temperatura, humedad y pH.
- Características del polímero: presencia de enlaces químicos susceptibles a la hidrólisis, hidrofiliicidad, estereoquímica, peso molecular, cristalinidad, superficie específica, temperatura de transición vítrea y de fusión.
- Características de los microorganismos: cantidad, variedad, fuente, actividad.¹²

2.1.11.2. Mecanismos de degradación

Entre los mecanismos básicos de degradación de un polímero, se aceptan cinco básicos.

- Fotodegradación: incluye los cambios físicos y químicos que se producen en el polímero debido a la irradiación del material con luz ultravioleta o visible; se pueden obtener polímeros fotodegradables introduciendo en su estructura grupos funcionales sensibles a la radiación ultravioleta (grupos carbonilo) o bien introduciendo aditivos, catalizadores y peroxidantes fotosensibles que aceleren el proceso de degradación.
- Niveles de iluminación: la densidad de flujo luminoso en una superficie es el flujo luminoso por unidad de superficie. Si se refiere al flujo incidente sobre una superficie, se denomina iluminación (E). La expresión preferida para el flujo luminoso que sale de una superficie es la de salida luminosa (M), la cual ha sido denominada emitancia luminosa. Según el NOAO *National Optical Astronomy Observatory* de Estados Unidos, en un laboratorio los niveles de iluminación están dentro de 500 y 700 luxes.

¹² HERMIDA, Érminia. *Polímeros, Guía Didáctica*. http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/09_Polimeros.pdf. Consulta: agosto de 2020.

- Radiación solar: el espectro ultravioleta se subdivide en los rayos UV cercanos (longitudes de onda de 380 a 200 nanómetros) y un rayo UV extremo (longitudes de onda de los rayos UV menores a 200 nm (el extremo del rayo de los rayos UV); el oxígeno absorbe la luz en esa parte del espectro de rayos UV.

En términos de impactos sobre el medio ambiente, podría ser de utilidad subdividir el espectro de luz UV de diferente manera, por ejemplo, en UV-A (“luz negra” u onda larga de rayos UV con longitud de onda de 380 a 315 nm), UV-B (onda mediana desde 315 hasta 280 nm), y UV-C (el “germicida” u onda corta de rayos UV, que oscila entre 280 y 10 nm).

Guatemala es un país con un gran potencial solar que, debido a su posicionamiento geográfico, el valor promedio de radiación solar global para todo el país de 5,3 kWh/m² al día, es mucho más alto que el de muchos de los países que cuentan con programas exitosos de aprovechamiento de la energía solar.

Además de la radiación solar, el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), proporciona un índice de radiación ultravioleta diario en el siguiente enlace: <http://www.insivumeh.gob.gt/indice-uv/>. Para la población y alertas de salud se utiliza el Índice UV con cielos despejados que es el valor máximo.

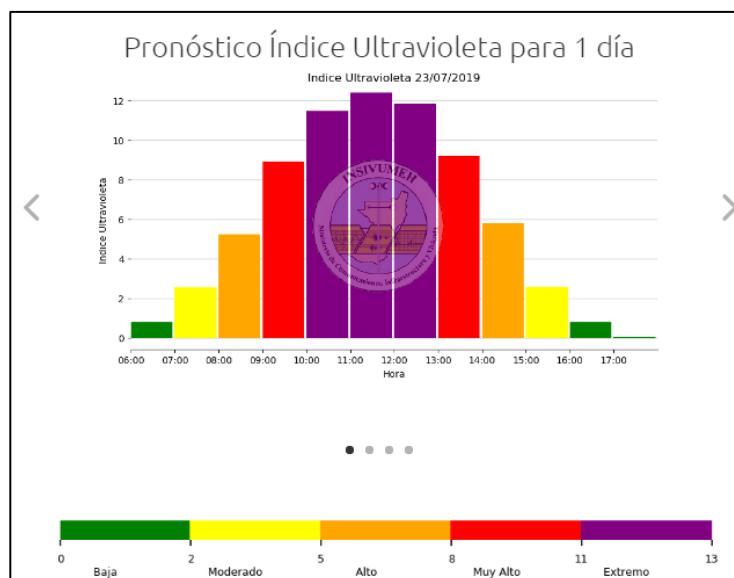
El índice UV es afectado por la distancia tierra sol, la elevación (ángulo) del sol, la cantidad de ozono en la atmósfera, la profundidad óptica de aerosoles en la tropósfera, la elevación, hielo o nieve (no aplica a Guatemala) y la nubosidad. El Índice Ultravioleta se categoriza de la siguiente forma según la Organización Mundial de la Salud:

Figura 5. Índice Ultravioleta

Índice UV	Nivel de Exposición
0, 1, 2	Bajo
3, 4, 5	Moderado
6, 7	Alto
8, 9, 10	Muy Alto
11 y Mayores	Extremo

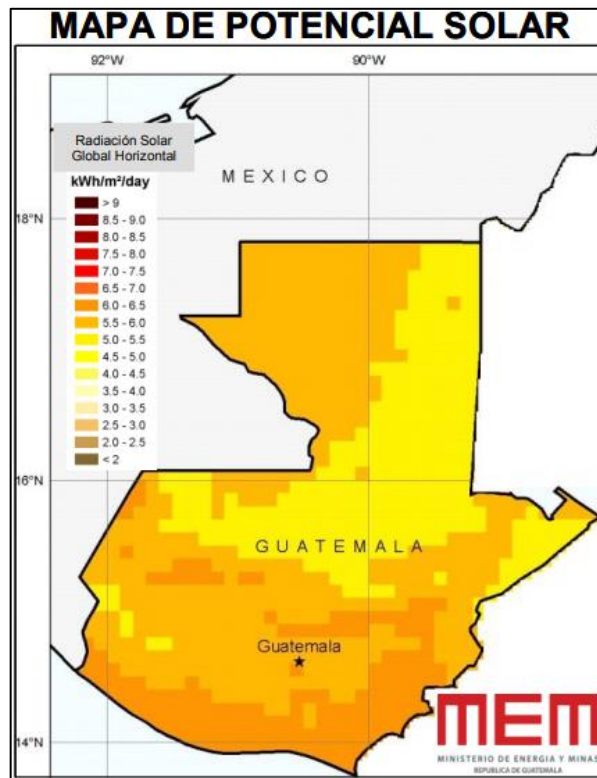
Fuente: INSIVUMEH. *Índice Ultravioleta, pronóstico para la República de Guatemala.*
<https://insivumeh.gob.gt/meteorologia/indice-ultravioleta/>. Consulta: 19 de agosto del 2019.

Figura 6. Pronóstico Índice Ultravioleta para 1 día



Fuente: INSIVUMEH. *Índice Ultravioleta, pronóstico para la República de Guatemala.*
<https://insivumeh.gob.gt/meteorologia/indice-ultravioleta/>. Consulta: 19 de agosto del 2019.

Figura 7. Radiación solar en Guatemala



Fuente: Dirección General de Energía. *Energía Solar en Guatemala*.
[https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2018/07/Energ %C3 %ADa-Solar-en-Guatemala.pdf](https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2018/07/Energ%C3%ADa-Solar-en-Guatemala.pdf). Consulta: 20 de agosto de 2019.

- Degradación mecánica: es causada por los esfuerzos a los que se somete el material, ya que suelen ir acompañados de rotura de enlaces en la cadena principal.
- Degradación térmica: se refiere a casos en los que el polímero, a elevadas temperaturas, sufre cambios químicos sin la contribución de ningún otro factor, que no sea la energía térmica. Generalmente, es difícil distinguir entre la degradación térmica y la termoquímica, ya que el polímero

raramente se encuentra en estado puro y las impurezas o aditivos pueden reaccionar con la matriz polimérica si la temperatura es bastante alta.

En los últimos años se ha estado investigando sobre polímeros termoestables, en los cuales no hay pérdida de propiedades con la temperatura. La forma de conseguirlos es aumentando la rigidez del polímero o aumentando la cristalinidad; esto se consigue mediante la inclusión de grupos rígidos en la cadena principal o con polímeros estereorregulares, que aumentan la temperatura de reblandecimiento.

- Degradación química: se refiere exclusivamente a procesos en los que la degradación es inducida por el contacto del polímero con productos químicos reactivos. En estos casos puede observarse una gran conversión, aunque sólo a elevadas temperaturas, debido a la energía de activación de dichas reacciones.

Uno de los tipos de degradación química más frecuentes es la degradación hidrolítica, en la que la causa de la degradación es el contacto del material con un medio acuoso; la penetración del agua dentro de la matriz polimérica produce el hinchamiento, rotura de los puentes de hidrógeno intermoleculares, hidratación de las moléculas y, finalmente, la hidrólisis de los enlaces inestables.

- Degradación mediante microorganismos (bacterias, hongos o algas): dichos microorganismos producen una gran variedad de enzimas que son capaces de reaccionar con polímeros sintéticos y naturales. El ataque enzimático del material es un proceso químico inducido por la necesidad de encontrar alimento por parte de los microorganismos (la cadena principal de los polímeros es una fuente de carbono).

2.2. Asociación Americana de Ensayo de Materiales

La Asociación Americana de Ensayo de Materiales, por sus siglas en inglés ASTM, es una organización sin ánimo de lucro que establece, desarrolla y publica acuerdos voluntarios de normas técnicas de ensayo estándar para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios. Los valores que fomenta la organización son: eficiencia de la gestión, actualización constante, trabajo en equipo y procedimientos éticos e integrales, con los cuales se ha convertido en uno de los principales ejecutores en la política de ensayos de materiales a nivel mundial.

La Asociación Americana de Ensayo de Materiales establece, normas para la evaluación de las propiedades mecánicas de tensión y dureza de los plásticos. La evaluación de la propiedad mecánica de tensión se realiza bajo la norma ASTM D882 - 18, mientras que la evaluación de la propiedad permeabilidad al vapor de agua es la norma ASTM E96/E96M-16.

2.2.1. Norma ASTM D882 - 18

La norma ASTM D882 - 18 especifica los métodos para probar la resistencia a la tracción de plásticos y otros materiales de resina delgados, aplica para los plásticos con un grosor menor a 14 mm, para determinar sus propiedades mecánicas. También describe los requisitos de precisión para los marcos de prueba y los accesorios usados. Las muestras para evaluar se deben ajustar a las especificaciones de la norma. La fuerza de tensión se refiere al máximo estrés desarrollado en una película al someterse a una prueba de elongación, mientras el valor de elongación presenta la habilidad de estirarse. Generalmente un incremento en la cantidad de plastificante da como resultados bioplásticos con menor fuerza de tensión y una mayor elongación, efecto observado en películas de proteína de cerdo.

2.2.2. Norma ASTM E96/E96M-16

Define la permeabilidad al vapor de agua (Pva) como la tasa de transmisión de vapor de agua por unidad de área de un material, de espesura conocida, que es inducida por una diferencia de presión entre dos superficies específicas, con condiciones de temperatura y humedad relativa específicas. Se considera que el proceso de permeabilidad de gases y vapores a través de los espacios intermoleculares de un material tiene lugar en 3 etapas: a) la sorción y la solubilidad del líquido en la superficie del material; b) difusión de permear a través del material debido a la acción de un gradiente de concentración; c) la desorción y la evaporación del líquido en el otro lado del material. Se toma en cuenta la humedad del ambiente de trabajo (dsecador) para determinar la presión de vapor del ambiente de la muestra aislada.

3. METODOLOGÍA

3.1. Variables

A continuación, se presentan las variables necesarias para el desarrollo de la investigación.

Tabla III. Descripción de parámetros dependientes e independientes

Variable	Dimensional	Cte.	Var.	Dep.	Ind.
Temperatura	°C	X			X
Tiempo de secado	Min		X	X	
Masa de cáscara y pulpa de plátano	G	X			X
Masa de almidón extraído	G		X	X	
Rendimiento del almidón	%		X	X	
Masa inicial del bioplástico	G	X			X
Masa final del bioplástico	G		X	X	
Porcentaje de degradación	%		X	X	
Tiempo de degradación	Días	X			X
Área de permeabilidad	mm ²	X			X
Pérdida de peso de bioplástico	G		X	X	
Espesor del bioplástico	Mm	X			X
Presión	kPa	X			X
Tiempo de exposición al vapor	H	X			X
Flujo de permeabilidad	g/h*m ²		X	X	
Permeabilidad al vapor	g*mm/h*m ² *kPa		X	X	
Tensión	kg/mm ²		X	X	
Radiación solar	kWh/m ² *h		X		X
Índice UV	Adimensional		X		X
Humedad	%		X	X	
Emitancia luminosa	Luxes		X		X

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

El trabajo de investigación es de carácter cuantitativo y se limitó a procesar la cáscara y pulpa del plátano verde para obtener un almidón, se seleccionó la fuente de almidón con mayor rendimiento y posteriormente se le añadieron dos tipos de plastificantes en distintas proporciones para obtener un *film*. Luego se evaluó el efecto de la variación de los aditivos en las propiedades de degradabilidad, permeabilidad al vapor, sorción y tensión.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Juan Francisco Oliva Valle
- Asesor: Ing. Qco. Víctor Manuel Monzón Valdez

3.4. Recursos materiales

A continuación, en el siguiente inciso se describen el material y equipo a utilizar:

3.4.1. Equipo

- Balanza analítica
 - Marca: RADWAG
 - Modelo: WPS 750/C/1
 - Incertidumbre: 0,001 g.
- Dinamómetro
 - Marca: Sumspring
 - Modelo: DLS-07 PC
 - Incertidumbre: $\leq \pm 1 \%$

- Estufa marca Whirpool
- Higrómetro marca
 - Marca: Steren
 - Modelo: HER-428
 - Incertidumbre: 4,5 %
- Horno de secado Premlab
- Licuadora Oster
- Luxómetro marca
 - Marca: Steren
 - Modelo: HER-410
- Soporte universal
 - Pinzas
 - Plancha de calentamiento marca Cronign
 - Refrigeradora marca Whirpool

3.4.2. Cristalería

- Ampolla de decantación
- Balones aforados de 100 mL
- Beakers de 100, 250, 500 y 1000 mL
- Desecadora
- Pipetas de 10 mL
- Probetas de 10, 50 y 100 mL
- Termómetro de mercurio
- Varilla de agitación
- Vidrio de reloj

3.4.3. Reactivos

- Ácido ascórbico, puro, MERCK
- Ácido clorhídrico fumante 37 % MERCK
- Agua desmineralizada Salvavidas.
- Glicerina 85 % MERCK
- Hidróxido de sodio en lentejas, puro, MERCK
- Solución buffer de pH 7 (hidrogenofosfato disódico/dihidrogenofosfato potásico), Certipur
- Solución de Lugol 2 %, Hanna
- Urea granulada, 46 % Yara

3.4.4. Equipo auxiliar

- Laptop Marca ASUS, Intel Core i7, Windows 10 Professional
- Microsoft Office Excel 2016
- Microsoft Office Word 2016
- Qtiplot 0,8.5 2016

3.5. Obtención y caracterización de la materia prima

La materia prima utilizada (*Musa balbisiana*) fue obtenida de forma comercial y se trasladó al laboratorio para procesarla adecuadamente y realizar la extracción del almidón. El plátano procesado fue cosechado en un tiempo de 11 meses después de la siembra, este es el periodo aproximado de cosecha para salir al mercado. Se adquirió por medio de una finca ubicada en el municipio de Poptún, Petén y se mantuvo en un ambiente cálido para no acelerar el proceso de maduración.

Poptún se encuentra a una altura de 536 m.s.n.m. Latitud 16° 19' 20'', longitud 89° 25' 20''. El clima del municipio de Poptún está clasificado como tropical. Se encuentra ubicado en la parte Sur del departamento de El Petén, colinda al Norte con el municipio de Dolores, al Sur con el municipio de San Luis, al Este con el territorio de Belice y al Oeste con el municipio de Sayaxché. El fruto fue cosechado en el mes de febrero del año 2020. Se colocó recipientes apropiados y fue trasladada a la Ciudad de Guatemala para procesarla y analizar el rendimiento de extracción a nivel laboratorio. Se seleccionó como tiempo de maduración del fruto 11 meses debido a que comercialmente es el tiempo promedio en el que se lleva al mercado en el municipio de origen.

No se realizó un análisis de propiedades de la materia prima ya que el objetivo consistió en realizar la extracción del almidón y luego comparar el rendimiento en función de la fuente de obtención. Para determinar si el producto obtenido en el proceso de extracción consistió en almidón, se realizó la prueba de identificación con reactivo de Lugol.

El almidón del plátano verde contiene un porcentaje de amilosa de 22,0 % y 77,8 % de amilopectina (Tabla IV), lo cual se encuentra en valores cercanos al almidón de maíz que contiene 28,0 % de amilosa y 71,7 % de amilopectina. Estas características le proporcionan mayor resistencia al almidón.

Tabla IV. **Propiedades del almidón del plátano verde (*Musa balbisiana* spp)**

Almidón	Platano Verde (<i>Musa Balbisiana</i> spp (%db)	Maíz (%db)	Banana var. “Macho” (%db)	Banana var. “Criollo” (%db)
Proteína	1,6±0,08	0,10	2,0±0,10	1,9±0,20
Grasas	0,1±0,01	0,35	2,2±0,05	2,3±0,07
Fibra	1,2±0,06	0,62	No reportado	No reportado
Cenizas	0,4±0,01	0,06	1,3±0,30	0,4±0,06
N.F.E.	96,7±0,71	98,3	97,2±2,40	98,1±1,80
Amilosa	22,2±0,74	28,3	5,1±0,01	24,7±0,01
Amilopectina	77,8±0,71	71,7	94,9±0,60	75,3±0,70
Almidón Total	94,5±0,95	95,9	97,2±2,40	98,1±1,80

ELN = extracto libre de nitrógeno.

Fuente: DE LA TORRE, Lazaro; TORRUCO, Juan; Castellanos, Arturo; CHEL, Luis; BETANCOUR, David. *Isolation and structure investigations of square banana (*Musa balbisiana*) starch*. doi: <https://doi.org/10.1002/star.200700607>. Consulta: agosto de 2019.

En relación con la humedad, la harina y los almidones muestran concentraciones entre 7,45 % y 10,82 % (tabla V). De acuerdo con la norma NMX-F-382-1986 para almidón o fécula de maíz, el máximo contenido de humedad permitido es de 13 %.

Tabla V. **Composición proximal del almidón del plátano verde (*Musa balbisiana* spp)**

Determinación	Harina (%)	Almidón Nativo (%)	AR2 (%)	AR3 (%)	Almidón Esterilizado (%)
Humedad	7,45±0,28	9,28±0,55	8,80±0,25	8,65±0,30	10,82±0,10
Proteína cruda	4,44±0,40	1,19±0,04	0,13±0,01	0,19±0,01	2,45±0,46
Extracto etéreo	0,85±0,22	0,56±0,14	0,08±0,01	0,42±0,05	0,52±0,02
Fibra cruda	1,88±0,16	1,22±0,50	0,71±0,06	0,82±0,03	1,21±0,36
Cenizas	2,44±0,01	0,16±0,01	0,94±0,08	0,50±0,05	0,20±0,01
ELN	82,94±0,21	87,59±0,25	89,34±0,82	89,42±0,08	84,80±0,37

ELN = extracto libre de nitrógeno.

Fuente: CONTRERAS, Roxana; TORRES, Lazaro; GONZÁLEZ, Nicolas; JÍMENEZ, Roman.

*Caracterización funcional de almidones de plátano cuadrado (*Musa balbisiana* Colla).*

<https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n30p82>. Consulta: 22 de agosto del 2019.

3.5.1. Caracterización de reactivos

Se prepararon las soluciones de ácido clorhídrico 3 %, hidróxido de sodio 3 % y ácido ascórbico 4 % y se realizó una valoración volumétrica de las mismas dentro del laboratorio, para lo cual se utilizaron muestras estándar de ácido clorhídrico y de hidróxido de sodio. Las materias primas de agua desmineralizada, glicerina, solución buffer pH 7 y urea fueron adquiridas directamente de proveedores y se validaron las fichas técnicas en el laboratorio para su manipulación.

3.5.2. Condiciones de almacenamiento

El plátano fue almacenado en un ambiente cálido para no acelerar el proceso de maduración, luego de realizar el proceso de extracción del almidón se almacenó en recipientes adecuados para disminuir la influencia de los cambios de temperatura y mantener el sistema en condiciones normales de temperatura.

Las muestras de bioplásticos obtenidas luego de las formulaciones se procesaron inmediatamente para realizar las pruebas de caracterización y se colocaron en los sistemas establecidos para el estudio.

3.6. Técnica cuantitativa de la investigación

La extracción del almidón fue realizada por medio del tratamiento de la cáscara o pulpa del plátano verde para obtener una pasta, se realizó una comparación de los rendimientos de 5 repeticiones de extracción del almidón y se seleccionó la fuente con el mayor rendimiento y se realizaron 10 extracciones más para obtener la cantidad necesaria para la obtención de los *films*. Para determinar si la extracción del almidón fue exitosa, se realizó la prueba de yodo

Posteriormente, el almidón obtenido de la fuente con el mayor rendimiento fue tratado con plastificantes para obtener un *film* por el método casting que consiste en disolver el almidón y los plastificantes, luego se colocaron en moldes de teflón y se colocó aceite vegetal para evitar adherencia al molde, se procedió a evaporar el disolvente en un horno y luego se pusieron a secar las muestras.

Se realizaron distintas formulaciones y para cada una se realizaron cinco repeticiones, se trabajó a una temperatura de 90 °C. Se evaluaron las propiedades de los *films* en función de la variación de plastificantes.

Luego de obtener el bioplástico, se evaluó el efecto de la variación de los aditivos en las propiedades de degradabilidad, permeabilidad al vapor de agua, sorción y tensión. El ensayo de degradabilidad se realizó en tres medios diferentes y en intervalos de tiempo de 30 días para evaluar variaciones en función del medio y del tiempo.

La degradabilidad fue evaluada en una solución al 3 % de ácido clorhídrico y una solución al 3 % de hidróxido de sodio para evaluar si existe alguna diferencia entre aplicar un ácido y una base fuertes en solución acuosa, además, se evaluó la degradabilidad por exposición a la radiación solar.

Por último, se presentaron los resultados y por medio de análisis estadístico se estableció si existe algún efecto significativo en la variación de los plastificantes y de la fuente del almidón en las propiedades del bioplástico.

3.7. Recolección y ordenamiento de la información

Descripción de los métodos a utilizar para la recolección de datos.

3.7.1. Preparación de las formulaciones

Se realizaron tres formulaciones diferentes para la fuente de almidón de plátano verde con el mayor rendimiento y se realizaron tres variaciones de plastificantes para cada una de las formulaciones. La primera formulación se basa en que la glicerina es un plastificante que reduce significativamente la resistencia a la tracción si su contenido en peso en la mezcla está por encima del

15 %. Para contenidos superiores al 25 % en peso de glicerol, se aprecia un cierto grado de mejora en la capacidad elástica del material.

En la segunda formulación se realizó la sustitución de glicerina por urea ya que posee la capacidad de prevenir la retrogradación por más tiempo que otros plastificantes, aumentando la estabilidad del bioplástico elaborado (Bastioli, 1999). La tercera formulación consiste en una combinación de glicerina con urea para evaluar si existe alguna diferencia significativa en las propiedades que puede aportar cada reactivo en comparación de si se utilizan por separado. Se realizaron 5 repeticiones para cada variación según cada formulación, con un total de 9 variaciones se obtienen 45 tratamientos.

Tabla VI. Porcentajes de cada ingrediente para las formulaciones del bioplástico (%p/p)

Formulación 1		Formulación 2		Formulación 3		
Almidón	Glicerina	Almidón	Urea	Almidón	Glicerina	Urea
Variación 1 (%)		Variación 1 (%)		Variación 1 (%)		
33	67	33	67	44	33	22
Variación 2 (%)		Variación 2 (%)		Variación 2 (%)		
50	50	50	50	44	28	28
Variación 3 (%)		Variación 3 (%)		Variación 3 (%)		
67	33	67	33	44	22	33

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Pesos de cada ingrediente para las formulaciones del bioplástico, tomando como base un peso total de 90 g**

Formulación 1		Formulación 2		Formulación 3		
Almidón	Glicerina	Almidón	Urea	Almidón	Glicerina	Urea
Variación 1 (g)		Variación 1 (g)		Variación 1 (g)		
30	60	30	60	40	30	20
Variación 2 (g)		Variación 2 (g)		Variación 2 (g)		
45	45	45	45	40	25	25
Variación 3 (g)		Variación 3 (g)		Variación 3 (g)		
60	30	60	30	40	20	30

Fuente: elaboración propia.

3.7.2. Extracción del almidón a partir de la cáscara y pulpa del plátano y prueba de detección

Se utilizó la metodología propuesta por Méndez¹³, en el cual cortaron el plátano en trozos de 2-3 cm de largo y se procedió a realizar la molienda de la pulpa y se le agregó una solución antioxidante de ácido ascórbico, debido a que al contacto con el oxígeno se produce oxidación de la pulpa (oscurecimiento) lo que ocasiona la aparición de puntos o manchas negras en el almidón aislado.

Se realizó la modificación que consiste en cambiar la molienda con un brazo de acero inoxidable por una licuadora, se realizaron lavados de la muestra con

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 función como excipiente en la formulación de comprimidos*. <http://glifos.concyt.gob.gt/digital/fodecyt/fodecyt %202009,59.pdf>. Consulta: mayo de 2020.

agua desmineralizada y se realizó una decantación hasta separar completamente el almidón y posteriormente se procedió a secar en un horno.

Para la detección de almidón por medio de la reacción con el lugol, se utilizó una metodología basada en el documento de Martín-Sánchez¹⁴ y Quimitube:

- Cortar la cáscara de plátano en piezas de 2 a 3 cm de largo y pesarlos.
- Colocar los pedazos en un beaker de 1 000 mL y añadir 5 mL solución de ácido ascórbico al 4 %.
- Colocar en una licuadora 250 g de las piezas de cáscara del plátano cortadas y agregar los 5 mL de ácido ascórbico y licuar.
- Colocar la muestra licuada en un beaker de 500 mL y llevarlo a la mitad, y añadir agua destilada hasta completar los 500 mL.
- Agitar la muestra durante un tiempo de 5 minutos.
- Refrigerar durante 1 hora.
- Decantar el sobrante.
- Repetir el paso anterior hasta que la muestra se clarifique.
- Añadir a 500 mL de la muestra, la solución buffer con pH 7.
- Proceder a refrigerar la muestra por 24 horas.
- Decantar el sobrante.
- Añadir 500 mL agua destilada y agitar durante 5 minutos.
- Refrigerar por 1 hora.
- Proceder a decantar el sobrante.
- Repetir paso anterior hasta que la mezcla se clarifique y el precipitado presente color blanco.
- Colocar precipitado dentro de horno entre 60 y 70 °C de temperatura, hasta obtener una pasta sólida.

¹⁴ MARTÍN SÁNCHEZ, Manuela. *Reactivo de Lugol: Historia de su descubrimiento y aplicaciones didácticas*. <http://www.scielo.org.mx/pdf/eq/v24n1/v24n1a6.pdf>. Consulta: junio de 2020.

- Convertir la pasta sólida en polvos finos.
- Colocar los polvos dentro de horno entre 60 y 70 °C durante 10 minutos.
- Repetir el procedimiento de los pasos 1 al 18, 4 veces más.
- Repetir el procedimiento completo con la pulpa de plátano.
- Pesar la masa final de cada almidón obtenido y determinar rendimiento.
- Determinar el rendimiento de cada extracción.
- Disolver 10 g de producto final en 40 ml de agua desmineralizada.
- Calentar la solución hasta ebullición.
- Dejar enfriar la solución.
- Colocar 5 ml de la muestra en un tubo de ensayo y colocar 5 ml de agua desmineralizada en otro tubo de ensayo.
- Agregar 5 gotas de reactivo de Lugol a cada tubo de ensayo. La muestra de almidón deberá tomar una coloración azul y la muestra sin almidón no deberá reaccionar.
- Anotar resultado, si la muestra toma coloración azul la presencia de almidón es positiva, en caso de ser negativa se debe repetir el procedimiento de extracción.

3.7.3. Preparación de la formulación No. 1 del bioplástico

Se utilizó la metodología propuesta por Alma Verónica García Barrera¹⁵, para el método de casting que consiste en la mezcla del almidón con los aditivos, evaporación del solvente y secado de la muestra. Se realizó la modificación que consiste en el cambio de plastificantes y aditivos: en lugar de almidón de maíz se utilizó almidón de plátano verde, en lugar de ácido acético se utilizó urea como otro plastificante y glicerina que fue utilizada en diferentes proporciones a las mencionadas en el trabajo de referencia.

¹⁵ GARCÍA BARRERA, Alma Verónica. *Obtención de un polímero biodegradable a partir de almidón de maíz*. <http://www.redicces.org.sv/jspui/handle/10972/2436>. Consulta: agosto de 2020.

- Colocar el peso de almidón obtenido a partir de la fuente con mayor rendimiento según tabla IV, formulación No.1 y variación No.1 en un beaker de 500 mL.
- Añadir glicerina según el peso indicado en la tabla IV, formulación No.1 y variación No.1.
- Completar un volumen de 250 mL utilizando agua destilada.
- Calentar entre 70 y 80 °C hasta la formación de una pasta.
- Colocar aceite vegetal sobre la superficie de un molde, cubrir toda la superficie para evitar adherencia del material.
- Colocar la pasta en el molde de teflón, colocar la pasta hasta una altura de 15 mm en el molde, con el objetivo de obtener un film que posteriormente será cortado para las diferentes pruebas.
- Colocar la mezcla en un horno y secar a 60 °C por 3 horas o hasta que esté completamente seco.
- Retirar el film del molde o recipiente.
- Pesar el film obtenido y determinar el rendimiento.
- Repetir los pasos del 1 al 8 cuatro veces más.
- Repetir los pasos del 1 al 9 utilizando los pesos según tabla IV para las variaciones 1, 2 y 3 según la formulación No.1.

3.7.4. Preparación de la formulación No. 2 del bioplástico

- Colocar el peso de almidón obtenido a partir de la fuente con mayor rendimiento según tabla IV, formulación No.1 y variación No.1 en un beaker de 500 mL.
- Añadir urea según el peso indicado en la tabla IV, formulación No.1 y variación No.1.
- Completar un volumen de 250 mL utilizando agua destilada.
- Calentar entre 70 y 80 °C hasta la formación de una pasta.

- Colocar aceite vegetal sobre la superficie de un molde, cubrir toda la superficie para evitar adherencia del material.
- Colocar la pasta en el molde de teflón, hasta una altura de 15 mm en el molde, con el objetivo de obtener un film que posteriormente será cortado para las diferentes pruebas.
- Colocar la mezcla en un horno y secar a 60 °C por 3 horas o hasta que esté completamente seco.
- Retirar el film del molde o recipiente.
- Pesar el film obtenido y determinar el rendimiento.
- Repetir los pasos del 1 al 8 cuatro veces más.
- Repetir los pasos del 1 al 9 utilizando los pesos según tabla IV para las variaciones 1, 2 y 3 según la formulación No.2.

3.7.5. Preparación de la formulación No.3 del bioplástico

- Colocar el peso de almidón obtenido a partir de la fuente con mayor rendimiento según tabla IV, formulación No.1 y variación No.1 en un beaker de 500 mL.
- Añadir glicerina y urea según el peso indicado en la tabla IV, formulación No.1 y variación No.1.
- Completar un volumen de 250 mL utilizando agua destilada.
- Calentar entre 70 y 80 °C hasta la formación de una pasta.
- Colocar aceite vegetal sobre la superficie de un molde, cubrir toda la superficie para evitar adherencia del material.
- Colocar la pasta en el molde de teflón, colocar la pasta hasta una altura de 15 mm en el molde, con el objetivo de obtener un film que posteriormente será cortado para las diferentes pruebas.
- Colocar la mezcla en un horno y secar a 60 °C por 3 horas o hasta que esté completamente seco.

- Retirar el *film* del molde o recipiente.
- Pesar el *film* obtenido y determinar el rendimiento.
- Repetir los pasos del 1 al 8 cuatro veces más.
- Repetir los pasos del 1 al 9 utilizando los pesos según tabla IV para las variaciones 1, 2 y 3 según la formulación No.1.

3.7.6. Ensayo de degradabilidad en medio ácido y medio alcalino

Se utilizó la metodología propuesta por Luis Lara que consiste en la inmersión de probetas de poliéster reforzadas con vidrio en una solución de ácido nítrico al 5 % y se tomaron los pesos a los 30, 60 y 90 días. Se realizó la modificación que consiste en utilizar una solución de ácido clorhídrico al 3 % para observar el ataque de un ácido fuerte en la estructura de las películas bioplásticas, también se realizó la inmersión en una solución de hidróxido de sodio al 3 % para comparar el efecto de una base fuerte con el de un ácido fuerte. También se modificó el tiempo y forma de secado ya que en la investigación base se secaron las muestras a la intemperie, en esta investigación se realizó una modificación y se pusieron a secar por dos horas dentro de una campana de extracción.

- Cortar un *film* de 10 g del producto obtenido de cada repetición de la formulación No.1 y variación No.1 según tabla IV, utilizando bioplástico proveniente del plátano verde.
- Medir masa de cada muestra.
- Colocar 5 *films* de 10 g en cinco recipientes de plástico con tapadera.
- Colocar 100 mL de ácido clorhídrico al 3 % en cinco recipientes de plástico con tapadera.
- Sumergir cada muestra en la solución de ácido clorhídrico al 3 %.

- Tapar los recipientes.
- Sacar la muestra del recipiente luego de haber pasado 24 horas sumergidas en ácido.
- Retirar el exceso de solución de HCl en el recipiente.
- Dejar secando en una campana de extracción las muestras por dos horas.
- Registrar la masa de la muestra.
- Regresar la muestra al recipiente que contiene la solución y taparla.
- Repetir pasos 7 y 8 cada 24 horas durante los primeros 5 días, luego a los 10, 15, 20, 25 y 30 días.
- Obtener el porcentaje de degradabilidad.
- Repetir los pasos del 1 al 9 para cada variación y cada formulación.
- Repetir los pasos del 1 al 10 utilizando hidróxido de sodio al 3 % en lugar de ácido clorhídrico al 3 %.

3.7.7. Ensayo de degradabilidad por exposición a la radiación solar

Se utilizó la metodología propuesta por Gloria Bolio¹⁶, que consiste en la evaluación de la biodegradación en el suelo del material compuesto de ácido poliláctico previamente expuesto y no a los efectos de la radiación UV, en la que aplicaron el intemperismo acelerado en cámaras QUV-Panel; sin embargo, esta práctica se realizó únicamente por exposición a la radiación UV sin utilizar una cámara QUV por lo que puede existir diferencia por la exposición a la humedad del ambiente. Esta prueba también se basó en la metodología propuesta por Luis Lara que consiste en la inmersión de probetas de poliéster reforzadas con vidrio en una solución de ácido nítrico al 5 % y se tomaron los pesos a los 30, 60 y

¹⁶ BOLIO-LÓPEZ, Gloria Ivette. *El intemperismo y la biodegradación de material compuesto de ácido poliláctico reforzado con whiskers de celulosa*. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v12n1/v12n1a14.pdf>. Consulta: agosto de 2019.

90 días. Se realizó la modificación que consiste en evaluar la degradación por efecto de la radiación solar únicamente y se realizarán mediciones de la intensidad de los rayos provenientes del sol y la radiación ultravioleta que es proporcionada para cada día en diferentes rangos de horarios por el INSIVUMEH.

- Cortar un *film* de 10 g del producto obtenido de cada repetición de la formulación No.1 y variación No.1 según tabla IV, utilizando bioplástico proveniente del plátano verde.
- Medir peso de cada muestra.
- Colocar 5 películas de 10 g en cinco recipientes de plástico con tapadera.
- Tapar los recipientes.
- Colocar los recipientes en un área en la que las muestras tengan contacto con la radiación solar.
- Sacar la muestra del recipiente luego de haber pasado 24 horas en el recipiente.
- Registrar la masa de la muestra.
- Regresar la muestra al recipiente y taparla.
- Repetir pasos 6 y 7 cada 24 horas durante los primeros 5 días, luego a los 10, 15, 20, 25 y 30 días.
- Obtener el porcentaje de degradabilidad.
- Repetir los pasos del 1 al 9 para cada variación y cada formulación.

3.7.8. Ensayo de evaluación de curva y tasa de humedad, método de Peleg (Peleg, 1998)

Se realizó la metodología propuesta por Othman¹⁷ basado en el modelo de Peleg para determinación de sorción, que consiste en sumergir muestras de 3x3 cm de bioplástico en agua, se pesan cada hora durante las primeras 5 horas y luego cada 24 horas durante los próximos 7 días. Se realizó la modificación de los tiempos de pesaje y se realizó a temperatura ambiente, se utilizan muestras de 2,5 g de peso inicial.

- Tomar cinco muestras de 2,5 g de largo y ancho del producto obtenido para la variación No.1 y formulación No.1 según tabla IV para el bioplástico obtenido a partir del almidón proveniente del plátano verde.
- Medir el peso de las muestras.
- Colocar las muestras en beakers de 50 mL
- Colocar los beakers en un desecador con sílica.
- Colocar un higrómetro dentro del desecador y registrar la humedad.
- Determinar el peso de cada beaker cada hora durante las primeras 5 horas de la prueba, luego cada 24 h durante los primeros 5 días y luego cada 5 días hasta completar 30 días.
- Repetir los pasos del 1 al 6 para cada variación y cada formulación utilizando bioplástico obtenido a partir de la fuente de almidón con mayor rendimiento.

¹⁷ OTHMAN, Siti Hajar. *Water sorption and water permeability properties of edible film made from potato peel waste*. https://www.researchgate.net/publication/314653435_Water_sorption_and_water_permeability_properties_of_edible_film_made_from_potato_peel_waste. Consulta: agosto de 2019.

3.7.9. Ensayo de evaluación de permeabilidad al vapor de agua, mediante la norma ASTM E96/E96M-16 como referencia para la metodología experimental.

La norma ASTM E96/E96M-16, al traducirla de su versión original, indica que para la metodología experimental se coloca agua en cápsulas o cajas de Petri a un nivel del 75 % de los recipientes, se cubren los recipientes con una muestra de membrana del bioplástico, posteriormente las muestras se pesan y se colocan en una cámara con temperatura y humedad controladas, en dicha cámara se debe colocar cloruro de calcio como desecante para controlar la humedad en la cámara. Las muestras se pesan hasta tener un total de 8 a 10 puntos de medición y se procede a determinar las curvas de pérdida de peso para determinar el flujo de transmisión de vapor de agua y posteriormente la permeabilidad.

Debido a la disponibilidad de recursos en el laboratorio, se utilizó como referencia la norma ASTM E96/E96M-16 sin recurrir a una réplica exacta del método experimental. Se hicieron las siguientes modificaciones:

- Para la cámara controlada se utilizó una desecadora basado en la metodología propuesta por Othma, para el análisis de permeabilidad al vapor de agua y se ajustaron los tiempos de pesaje para cumplir un rango de 30 días de análisis.
- Se utilizaron beakers según la metodología planteada por Nivea Vicentini¹⁸.

¹⁸ VICENTINI, Nivea María. *Elaboração e caracterização de filmes comestíveis à base de fécula de mandioca para uso em pós-colheita*. <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/103261>.

- Como desecante se utilizó sílica gel según la metodología utilizada por Diego Joaqui y Héctor Villada¹⁹ en el análisis de propiedades ópticas y permeabilidad de vapor de agua en películas producidas a partir de almidón.

Procedimiento experimental:

- Tomar cinco muestras de 5X5 cm de largo y ancho del producto obtenido para la variación No.1 y formulación No.1 según tabla IV para el bioplástico obtenido a partir del almidón proveniente del plátano verde.
- Medir el peso de las muestras.
- Agregar 25 mL de agua destilada en cinco beakers de 50 mL.
- Cubrir cada beaker con las películas de 5 cm de diámetro, de tal forma que no tenga fugas.
- Medir el peso de las muestras.
- Colocar los beakers en un desecador con sílica.
- Determinar el peso de cada beaker cada hora durante las primeras 5 horas, luego cada 24 horas durante los primeros 5 días y luego cada 5 días hasta completar 30 días (regresando el beaker al desecador luego de cada medición de peso).
- Introducir un higrómetro en los desecadores y anotar las humedades y temperaturas del higrómetro al momento de realizar las mediciones de peso.
- Repetir los pasos del 1 al 6 para cada variación y cada formulación utilizando bioplástico obtenido a partir del almidón con el mayor rendimiento.

¹⁹ JOAQUI, Diego Fabián; VILLADA CASTILLO, Héctor Samuel. *Propiedades ópticas y permeabilidad de vapor de agua en películas producidas a partir de almidón*. <https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/1229>.

3.7.10. Ensayo de evaluación de la propiedad mecánica de tensión, según norma ASTM D882 - 18

Las propiedades de tensión se evaluaron según la norma ASTM D882 - 18 según la metodología propuesta por Diana Navia²⁰ en la cual se utilizó un texturómetro y se registró el esfuerzo al rompimiento de muestras acondicionadas durante 10 días, en dicha investigación se utilizó la norma ASTM D638-14 que aplica para muestras con un espesor mayor a 14 mm, se realizó una modificación de tiempo y las pruebas se realizaron luego de 3 días de acondicionamiento en horno de secado para disminuir contacto con humedad del ambiente.

- Tomar cinco muestras de 10 cm x 4 cm x 3 mm para la variación No.1 y formulación No.1 según tabla IV para el bioplástico obtenido a partir del almidón proveniente del plátano verde.
- Colocar una muestra del *film* en la máquina de ensayo.
- Fijar el indicador de extensión de la máquina de ensayo.
- Registrar la tensión en el momento de la ruptura de la muestra.
- Repetir los pasos del 3 al 7 para cada una de las muestras tomadas de la variación No.1 y formulación No.1.
- Repetir los pasos del 1 al 8 para cada variación y cada formulación utilizando bioplástico obtenido a partir del almidón del plátano verde.

²⁰ NAVIA-PORRAS, Diana Paola. *Evaluación de propiedades físicas de bioplásticos termo-comprimidos elaborados con harina de yuca.* <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v12n2/v12n2a05.pdf>. Consulta: agosto de 2019.

3.8. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

A continuación, se presenta la tabulación de los datos obtenidos y el procesamiento de los mismos.

3.8.1. Tabulación de los datos obtenidos para cada extracción y formulación

Se tomaron los datos de la extracción del almidón a través de la cáscara y pulpa del plátano, de las distintas formulaciones del bioplástico con cada almidón y plastificantes.

Para la determinar los rendimientos se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{\text{Masa inicial (g)} - \text{Masa final (g)}}{\text{Masa inicial (g)}} * 100 \quad (\text{Ecuación No. 1})$$

Tabla VIII. Extracción y rendimiento de cada almidón

Fuente de almidón	Corrida	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Rendimiento (%)	Rendimiento Promedio (%)
Cáscara de plátano	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
Pulpa del plátano	1				
	2				
	3				
	4				
	5				

Fuente: elaboración propia.

3.8.2. Tabulación de los datos obtenidos para cada ensayo de degradabilidad

Se tomaron los datos de los ensayos de degradabilidad para el bioplástico a partir de cada fuente de almidón, según formulaciones 1, 2, 3 y sus respectivas variaciones.

Para la determinación de los porcentajes de degradabilidad se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Degradabilidad (\%)} = \frac{\text{Masa inicial (g)} - \text{Masa final (g)}}{\text{Masa inicial (g)}} * 100 \quad (\text{Ecuación No. 2})$$

Para el caso de toma de datos de la radiación solar, se tomaron los datos proporcionados por el Ministerio de Energía y Minas (MEM). Para efectos de la investigación, se tomó la radiación solar a partir de mapas solares y se realizó la medición de la intensidad de luz durante el día a través de un luxómetro, con el objetivo de registrar los datos mayores y menores de intensidad de luz durante los 30 días que dure la prueba.

Tabla IX. **Ensayo de degradabilidad para el film extraído a partir del almidón con mayor rendimiento, formulaciones 1, 2, 3 y sus variaciones, evaluando en HCL al 3 % y NaOH al 3 %**

Formulación 1, 2 y 3							Variación 1, 2 y 3					
Tiempo (días)	m ₁ (g)	D ₁ (%)	m ₂ (g)	D ₂ (%)	m ₃ (g)	D ₃ (%)	m ₄ (g)	D ₄ (%)	m ₅ (g)	D ₅ (%)	m _{Prom} (g)	D _{Prom} (%)
Día 0												
Día 1												
Día 2												
Día 3												
Día 4												
Día 5												
Día 10												

Continuación de la tabla IX.

Formulación 1, 2 y 3							Variación 1, 2 y 3					
Tiempo (días)	m ₁ (g)	D ₁ (%)	m ₂ (g)	D ₂ (%)	m ₃ (g)	D ₃ (%)	m ₄ (g)	D ₄ (%)	m ₅ (g)	D ₅ (%)	m _{Prom} (g)	D _{Prom} (%)
Día 15												
Día 20												
Día 25												
Día 30												

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Ensayo de degradabilidad para el film extraído a partir del almidón con mayor rendimiento, formulaciones 1, 2, 3 y sus variaciones, evaluando por exposición a los rayos UV provenientes del sol**

Formulación 1, 2 y 3							Variación 1, 2 y 3					
Tiempo (días)	m ₁ (g)	D ₁ (%)	m ₂ (g)	D ₂ (%)	m ₃ (g)	D ₃ (%)	m ₄ (g)	D ₄ (%)	m ₅ (g)	D ₅ (%)	m _{Prom} (g)	D _{Prom} (%)
Día 0												
Día 1												
Día 2												
Día 3												
Día 4												
Día 5												
Día 10												
Día 15												
Día 20												
Día 25												
Día 30												
Radiación solar mayor (kWh/m ² /h)				Radiación solar menor (kWh/m ² /h)								
Índice UV mayor				Índice UV menor								
Iluminancia mayor (luxes)				Iluminancia menor (luxes)								

Fuente: elaboración propia.

3.8.3. Tabulación de los datos obtenidos para cada ensayo de determinación de las propiedades de permeabilidad

Se tomaron los datos de los ensayos de permeabilidad al vapor de agua para el bioplástico a partir de cada fuente de almidón, según formulaciones 1, 2, 3 y sus respectivas variaciones.

Los desecadores son recipientes que se pueden sellar y que contienen un agente desecador que hace que la atmósfera interna tenga muy baja presión de vapor o una muy baja humedad relativa, por lo que se tomó una presión del sistema igual a la presión del ambiente y una presión de vapor igual a 0,0 kPa a una temperatura ambiente.

3.8.3.1. Determinación de la curva y tasa de humedad.

Los datos de sorción de humedad de la película se ajustan a un modelo matemático, específicamente el modelo de Peleg. El modelo de Peleg se ha utilizado ampliamente para describir el proceso de sorción en varios alimentos, especialmente los tipos de alimentos con almidón y grasas. La siguiente es la ecuación propuesta por Peleg.

$$M_t = M_i + \frac{t}{(k_1 + k_2 * t)} \text{ (Ecuación No.3) (Peleg, 1998)}$$

Donde:

M_t= humedad en función del tiempo (%)

M_i= humedad inicial de la muestra (%)

t= tiempo (días)

k₁= constante de Peleg para tasa de humedad en la muestra

k2= capacidad de sorción de agua

La humedad inicial (Mi) y la humedad en función del tiempo se determinan por medio de la siguiente ecuación utilizada por Othman (2017):

$$M_i = \frac{(W_i - W_d)}{W_d} \quad (\text{Ecuación No. 4})$$

Donde:

Mi= humedad inicial de la muestra (%)

Wi= peso inicial de la muestra (g), se sustituye por Wt para determinar la humedad en función del tiempo.

Wd= peso de la muestra después de 5 horas en el desecador (g), tiempo de pre-secado de la muestra.

El modelo de Peleg se ajusta para realizar un análisis de regresión lineal y queda de la siguiente forma:

$$\frac{t}{M_t - M_i} = k_1 + k_2 * t \quad (\text{Ecuación No. 5})$$

Se realiza una curva de t/(Mt-Mi) en función de t en la que el intercepto k1 es la tasa de sorción de agua y la constante k2 es la capacidad de sorción.

3.8.3.2. Determinación de la permeabilidad al vapor de agua

Para la determinación de la permeabilidad primero se determina el flujo de permeabilidad al vapor de agua con la siguiente ecuación:

$$F_{va} = \frac{g}{tA} \quad (\text{Ecuación No.6}) \quad (\text{ASTM,2016})$$

Dónde:

Fva: transmisión de vapor de agua (g/h*m²)

g: pérdida de peso (g)

t: tiempo (horas)

A: área de permeabilidad (m²)

g/t: flujo de transferencia de vapor (g/h)

Se realiza una gráfica del peso en función del tiempo y se procede a hacer un análisis de regresión lineal en el que la pendiente de la gráfica corresponde al flujo de transferencia de vapor, posteriormente se divide dentro del área y se obtiene la transmisión de vapor de agua.

Luego la permeabilidad al vapor de agua se determina con la siguiente ecuación:

$$P_{va} = \frac{F_{va}}{\Delta P} \quad (\text{Ecuación No.7}) \quad (\text{ASTM, 2016})$$

Dónde:

Pva: permeabilidad al vapor de agua (g/h*m²* mm/kPa)

Fva: flujo de permeabilidad al vapor de agua (g/h*m²)

ΔP: diferencia de presión de vapor del medio ambiente que contiene el desecador y el agua destilada (kPa)

*Donde la diferencia de presión de vapor del medioambiente que contiene el desecador (0 kPa, 25 °C) y el agua pura (3167 kPa a 25 °C).²¹

21 ASTM. *Standad Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials*. p. 1-8.

El cálculo de la permeabilidad promedio es opcional y puede ser hecho sólo cuando la muestra de prueba es homogénea (no laminado) y no menos de 1/2 pulgada (12,5 mm) de espesor, la permeabilidad promedio se calcula multiplicando el resultado con el espesor promedio de las muestras.

Tabla XI. **Determinación de curva y tasa de humedad de para el film extraído a partir del almidón con mayor rendimiento, para las formulaciones 1, 2, 3 y sus respectivas variaciones con respecto al tiempo**

Formulación n - Variación m – Pérdida de peso							
Tiempo (horas)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	Promedio (g)	Humedad (%)

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Ensayo de permeabilidad al vapor de agua para el bioplástico extraído a partir del almidón con mayor rendimiento, para las formulaciones 1, 2, 3 y sus respectivas variaciones**

Formulación n - Variación m							
Pérdida de peso							
Tiempo (horas)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	Promedio (g)	Humedad (%)
Radio (m)							
Área (m ²)							
Espesor (mm)							
Presión (kPa)							

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Ensayo de permeabilidad al vapor de agua para el bioplástico extraído a partir del almidón con mayor rendimiento, para las formulaciones 1, 2, 3 y sus respectivas variaciones**

Formulación – Variación	Flujo (g/h)	Transmisión (g/h*m²)	Permeabilidad (g/Pa*h*m²)
Formulación 1 – Variación 1			
Formulación 1 – Variación 2			
Formulación 1 – Variación 3			
Formulación 2 – Variación 1			
Formulación 2 – Variación 2			
Formulación 2 – Variación 3			
Formulación 3 – Variación 1			
Formulación 3 – Variación 2			
Formulación 3 – Variación 3			
Humedad promedio (%)			

Fuente: elaboración propia.

3.8.4. Determinación del error de los modelos matemáticos

Para determinar el error de los modelos matemáticos se utilizará la ecuación del error relativo:

$$Error (\%) = \left| \frac{Valor\ obtenido - Valor\ modelo\ matemático}{Valor\ obtenido} \right| \quad (Ecuación\ No.8)$$

3.8.5. Tabulación de los datos obtenidos para cada ensayo de tensión

Se tomaron los datos de los ensayos de tensión para el bioplástico a partir de cada fuente de almidón, según formulaciones 1, 2, 3 y sus respectivas variaciones. Con los datos de tensión y presión obtenidos, se tomarán datos promedio.

Tabla XIV. **Ensayo de propiedad mecánica de tensión para el bioplástico extraído a partir del almidón proveniente de la cáscara y pulpa del plátano verde, para las formulaciones 1, 2, 3 y sus respectivas variaciones**

Número de formulación (1, 2, 3)					
No.	1	2	3	4	5
Número de variación (1, 2, 3)					
Presión (MPa)					
Presión Promedio (Mpa)					
Número de variación (1, 2, 3)					
Presión (Mpa)					
Presión Promedio (Mpa)					
Número de variación (1, 2, 3)					
Presión (Mpa)					
Presión Promedio (Mpa)					

Fuente: elaboración propia.

3.8.6. Análisis estadístico

A continuación, se describe y se detalla el análisis estadístico de los datos obtenidos y tabulados.

3.8.7. Diseño de tratamiento

- Diseño experimental para el rendimiento de extracción de almidón: se realizó un diseño factorial de un factor (materia prima almidón de plátano) y dos niveles (pulpa y cáscara de plátano verde). Se hicieron cinco repeticiones por cada fuente de almidón dando como resultado un arreglo matricial de 10 mediciones:

Número de tratamientos: 1 factor * 2 niveles * 5 repeticiones = 10 corridas experimentales

Tabla XV. **Diseño experimental para el rendimiento de extracción de almidón a partir de la pulpa y cáscara de plátano verde**

Fuente de almidón	Número de corridas experimentales para el rendimiento de extracción de almidón					Total	Media
Pulpa	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{14}	Y_{15}	$\sum Y_1$	$\bar{y}_1$
Cáscara	Y_{21}	Y_{22}	Y_{23}	Y_{24}	Y_{25}	$\sum Y_2$	$\bar{y}_2$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

Y: Variable de respuesta del experimento.

$\sum Y$: Sumatoria de resultados de variable de respuesta del experimento.

$\bar{y}$: Media de resultados de variable de respuesta.

- Diseño experimental para la degradabilidad en medio ácido, básico y por exposición a la radiación solar: se realizó un diseño factorial de dos factores (tiempo y formulación) y tres niveles (medio ácido, básico y radiación solar). Se hicieron cinco repeticiones por cada nivel dando como resultado el siguiente arreglo de corridas experimentales para cada medición en el intervalo de 30 días.

Diseño factorial: $3^k = 3^2 = 9$ pruebas

Número de corridas experimentales por día = 9 pruebas * 5 repeticiones =
45 corridas experimentales por día

Número de corridas experimentales en 10 días de medición durante un mes
= 45 corridas experimentales por día * 10 días de medición (en un mes) =
450 corridas

Tabla XVI. **Diseño de tratamientos para el análisis de degradabilidad en medio ácido, básico y por exposición a los rayos UV del sol para 10 de experimentación en un mes**

Medio	Número de corridas experimentales para análisis de degradabilidad										Total	Media
Ácido	Y _{1 1}	Y _{1 1,1}	Y _{1 2}	Y _{1 2,1}	Y _{1 3}	Y _{1 3,1}	Y _{1 4}	Y _{1 4,1}	Y _{1 5}	Y _{1 5,1}	$\sum Y_{1 1}$	$\bar{y}_{1 1}$
		Y _{1 1,2}		Y _{1 2,2}		Y _{1 3,2}		Y _{1 4,2}		Y _{1 5,2}	$\sum Y_{1 2}$	$\bar{y}_{1 2}$
		Y _{1 1,3}		Y _{1 2,3}		Y _{1 3,3}		Y _{1 4,3}		Y _{1 5,3}	$\sum Y_{1 3}$	$\bar{y}_{1 3}$
		Y _{1 1,4}		Y _{1 2,4}		Y _{1 3,4}		Y _{1 4,4}		Y _{1 5,4}	$\sum Y_{1 4}$	$\bar{y}_{1 4}$
		Y _{1 1,5}		Y _{1 2,5}		Y _{1 3,5}		Y _{1 4,5}		Y _{1 5,5}	$\sum Y_{1 5}$	$\bar{y}_{1 5}$
		Y _{1 1,10}		Y _{1 2,10}		Y _{1 3,10}		Y _{1 4,10}		Y _{1 5,10}	$\sum Y_{1 10}$	$\bar{y}_{1 10}$
		Y _{1 1,15}		Y _{1 2,15}		Y _{1 3,15}		Y _{1 4,15}		Y _{1 5,15}	$\sum Y_{1 15}$	$\bar{y}_{1 15}$
		Y _{1 1,20}		Y _{1 2,20}		Y _{1 3,20}		Y _{1 4,20}		Y _{1 5,20}	$\sum Y_{1 20}$	$\bar{y}_{1 20}$
		Y _{1 1,25}		Y _{1 2,25}		Y _{1 3,25}		Y _{1 4,25}		Y _{1 5,25}	$\sum Y_{1 25}$	$\bar{y}_{1 25}$
		Y _{1 1,30}		Y _{1 2,30}		Y _{1 3,30}		Y _{1 4,30}		Y _{1 5,30}	$\sum Y_{1 30}$	$\bar{y}_{1 30}$
Básico	Y _{2 1}	Y _{2 1,1}	Y _{2 2}	Y _{2 2,1}	Y _{2 3}	Y _{2 3,1}	Y _{2 4}	Y _{2 4,1}	Y _{2 5}	Y _{2 5,1}	$\sum Y_{2 1}$	$\bar{y}_{2 1}$
		Y _{2 1,2}		Y _{2 2,2}		Y _{2 3,2}		Y _{2 4,2}		Y _{2 5,2}	$\sum Y_{2 2}$	$\bar{y}_{2 2}$
		Y _{2 1,3}		Y _{2 2,3}		Y _{2 3,3}		Y _{2 4,3}		Y _{2 5,3}	$\sum Y_{2 3}$	$\bar{y}_{2 3}$
		Y _{2 1,4}		Y _{2 2,4}		Y _{2 3,4}		Y _{2 4,4}		Y _{2 5,4}	$\sum Y_{2 4}$	$\bar{y}_{2 4}$
		Y _{2 1,5}		Y _{2 2,5}		Y _{2 3,5}		Y _{2 4,5}		Y _{2 5,5}	$\sum Y_{2 5}$	$\bar{y}_{2 5}$
		Y _{2 1,10}		Y _{2 2,10}		Y _{2 3,10}		Y _{2 4,10}		Y _{2 5,10}	$\sum Y_{2 10}$	$\bar{y}_{2 10}$
		Y _{2 1,15}		Y _{2 2,15}		Y _{2 3,15}		Y _{2 4,15}		Y _{2 5,15}	$\sum Y_{2 15}$	$\bar{y}_{2 15}$
		Y _{2 1,20}		Y _{2 2,20}		Y _{2 3,20}		Y _{2 4,20}		Y _{2 5,20}	$\sum Y_{2 20}$	$\bar{y}_{2 20}$
		Y _{2 1,25}		Y _{2 2,25}		Y _{2 3,25}		Y _{2 4,25}		Y _{2 5,25}	$\sum Y_{2 25}$	$\bar{y}_{2 25}$
		Y _{2 1,30}		Y _{2 2,30}		Y _{2 3,30}		Y _{2 4,30}		Y _{2 5,30}	$\sum Y_{2 30}$	$\bar{y}_{2 30}$
Radiación solar	Y _{3 1}	Y _{3 1,1}	Y _{3 2}	Y _{3 2,1}	Y _{3 3}	Y _{3 3,1}	Y _{3 4}	Y _{3 4,1}	Y _{3 5}	Y _{3 5,1}	$\sum Y_{3 1}$	$\bar{y}_{3 1}$
		Y _{3 1,2}		Y _{3 2,2}		Y _{3 3,2}		Y _{3 4,2}		Y _{3 5,2}	$\sum Y_{3 2}$	$\bar{y}_{3 2}$
		Y _{3 1,3}		Y _{3 2,3}		Y _{3 3,3}		Y _{3 4,3}		Y _{3 5,3}	$\sum Y_{3 3}$	$\bar{y}_{3 3}$
		Y _{3 1,4}		Y _{3 2,4}		Y _{3 3,4}		Y _{3 4,4}		Y _{3 5,4}	$\sum Y_{3 4}$	$\bar{y}_{3 4}$
		Y _{3 1,5}		Y _{3 2,5}		Y _{3 3,5}		Y _{3 4,5}		Y _{3 5,5}	$\sum Y_{3 5}$	$\bar{y}_{3 5}$
		Y _{3 1,10}		Y _{3 2,10}		Y _{3 3,10}		Y _{3 4,10}		Y _{3 5,10}	$\sum Y_{3 10}$	$\bar{y}_{3 10}$
		Y _{3 1,15}		Y _{3 2,15}		Y _{3 3,15}		Y _{3 4,15}		Y _{3 5,15}	$\sum Y_{3 15}$	$\bar{y}_{3 15}$
		Y _{3 1,20}		Y _{3 2,20}		Y _{3 3,20}		Y _{3 4,20}		Y _{3 5,20}	$\sum Y_{3 20}$	$\bar{y}_{3 20}$
		Y _{3 1,25}		Y _{3 2,25}		Y _{3 3,25}		Y _{3 4,25}		Y _{3 5,25}	$\sum Y_{3 25}$	$\bar{y}_{3 25}$
		Y _{3 1,30}		Y _{3 2,30}		Y _{3 3,30}		Y _{3 4,30}		Y _{3 5,30}	$\sum Y_{3 30}$	$\bar{y}_{3 30}$

*Nota: La tabla corresponde únicamente a una formulación (por ejemplo: almidón/glicerina 67/33 %).

Fuente: elaboración propia.

- Análisis de degradabilidad para las 3 formulaciones y sus variaciones en cada medio (ácido, básico y radiación solar) por separado: se realizó un diseño factorial de dos factores (tiempo y formulación) y tres niveles (plastificantes: glicerina, urea y mezcla de glicerina con urea). Se hicieron

cinco repeticiones por cada nivel dando como resultado el siguiente arreglo de corridas experimentales para cada medición en el intervalo de 30 días:

Diseño factorial: $3^k = 3^2 = 9$ pruebas

Número de corridas experimentales por día = 9 pruebas * 5 repeticiones = 45 corridas experimentales por día

Número de corridas experimentales en 10 días de medición durante un mes = 45 corridas experimentales por día * 10 días de medición (en un mes) = 450 corridas

En la tabla se colocan las tres formulaciones especificadas: almidón con glicerina, almidón con urea, y almidón con glicerina y urea. Se colocan los subíndices 1-n, 2-n, 3-n, los cuales se utilizaron para las diferentes variaciones de cada formulación.

Tabla XVII. **Diseño de tratamientos para el análisis de degradabilidad para las tres formulaciones y sus variaciones en cada medio por separado**

Formulación	Número de corridas experimentales para análisis de degradabilidad para las nueve formulaciones en cada medio por separado, propiedad de sorción y permeabilidad al vapor de agua										Total	Media
Glicerina _{1,n}	Y ₁₁	Y _{1 1,1}	Y ₁₂	Y _{1 2,1}	Y ₁₃	Y _{1 3,1}	Y ₁₄	Y _{1 4,1}	Y ₁₅	Y _{1 5,1}	$\sum Y_{11}$	$\bar{y}_{11}$
		Y _{1 1,2}		Y _{1 2,2}		Y _{1 3,2}		Y _{1 4,2}		Y _{1 5,2}	$\sum Y_{12}$	$\bar{y}_{12}$
		Y _{1 1,3}		Y _{1 2,3}		Y _{1 3,3}		Y _{1 4,3}		Y _{1 5,3}	$\sum Y_{13}$	$\bar{y}_{13}$
		Y _{1 1,4}		Y _{1 2,4}		Y _{1 3,4}		Y _{1 4,4}		Y _{1 5,4}	$\sum Y_{14}$	$\bar{y}_{14}$
		Y _{1 1,5}		Y _{1 2,5}		Y _{1 3,5}		Y _{1 4,5}		Y _{1 5,5}	$\sum Y_{15}$	$\bar{y}_{15}$
		Y _{1 1,10}		Y _{1 2,10}		Y _{1 3,10}		Y _{1 4,10}		Y _{1 5,10}	$\sum Y_{110}$	$\bar{y}_{110}$
		Y _{1 1,15}		Y _{1 2,15}		Y _{1 3,15}		Y _{1 4,15}		Y _{1 5,15}	$\sum Y_{115}$	$\bar{y}_{115}$
		Y _{1 1,20}		Y _{1 2,20}		Y _{1 3,20}		Y _{1 4,20}		Y _{1 5,20}	$\sum Y_{120}$	$\bar{y}_{120}$
		Y _{1 1,25}		Y _{1 2,25}		Y _{1 3,25}		Y _{1 4,25}		Y _{1 5,25}	$\sum Y_{125}$	$\bar{y}_{125}$
		Y _{1 1,30}		Y _{1 2,30}		Y _{1 3,30}		Y _{1 4,30}		Y _{1 5,30}	$\sum Y_{130}$	$\bar{y}_{130}$
Urea _{1,n}	Y ₂₁	Y _{2 1,1}	Y ₂₂	Y _{2 2,1}	Y ₂₃	Y _{2 3,1}	Y ₂₄	Y _{2 4,1}	Y ₂₅	Y _{2 5,1}	$\sum Y_{21}$	$\bar{y}_{31}$
		Y _{2 1,2}		Y _{2 2,2}		Y _{2 3,2}		Y _{2 4,2}		Y _{2 5,2}	$\sum Y_{22}$	$\bar{y}_{32}$
		Y _{2 1,3}		Y _{2 2,3}		Y _{2 3,3}		Y _{2 4,3}		Y _{2 5,3}	$\sum Y_{23}$	$\bar{y}_{33}$
		Y _{2 1,4}		Y _{2 2,4}		Y _{2 3,4}		Y _{2 4,4}		Y _{2 5,4}	$\sum Y_{24}$	$\bar{y}_{34}$
		Y _{2 1,5}		Y _{2 2,5}		Y _{2 3,5}		Y _{2 4,5}		Y _{2 5,5}	$\sum Y_{25}$	$\bar{y}_{35}$
		Y _{2 1,10}		Y _{2 2,10}		Y _{2 3,10}		Y _{2 4,10}		Y _{2 5,10}	$\sum Y_{210}$	$\bar{y}_{310}$
		Y _{2 1,15}		Y _{2 2,15}		Y _{2 3,15}		Y _{2 4,15}		Y _{2 5,15}	$\sum Y_{215}$	$\bar{y}_{315}$
		Y _{2 1,20}		Y _{2 2,20}		Y _{2 3,20}		Y _{2 4,20}		Y _{2 5,20}	$\sum Y_{220}$	$\bar{y}_{320}$
		Y _{2 1,25}		Y _{2 2,25}		Y _{2 3,25}		Y _{2 4,25}		Y _{2 5,25}	$\sum Y_{225}$	$\bar{y}_{325}$
		Y _{2 1,30}		Y _{2 2,30}		Y _{2 3,30}		Y _{2 4,30}		Y _{2 5,30}	$\sum Y_{230}$	$\bar{y}_{330}$
Glicerina-Urea _{1,n}	Y ₃₁	Y _{3 1,1}	Y ₃₂	Y _{3 2,1}	Y ₃₃	Y _{3 3,1}	Y ₃₄	Y _{3 4,1}	Y ₃₅	Y _{3 5,1}	$\sum Y_{31}$	$\bar{y}_{31}$
		Y _{3 1,2}		Y _{3 2,2}		Y _{3 3,2}		Y _{3 4,2}		Y _{3 5,2}	$\sum Y_{32}$	$\bar{y}_{32}$
		Y _{3 1,3}		Y _{3 2,3}		Y _{3 3,3}		Y _{3 4,3}		Y _{3 5,3}	$\sum Y_{33}$	$\bar{y}_{33}$
		Y _{3 1,4}		Y _{3 2,4}		Y _{3 3,4}		Y _{3 4,4}		Y _{3 5,4}	$\sum Y_{34}$	$\bar{y}_{34}$
		Y _{3 1,5}		Y _{3 2,5}		Y _{3 3,5}		Y _{3 4,5}		Y _{3 5,5}	$\sum Y_{35}$	$\bar{y}_{35}$
		Y _{3 1,10}		Y _{3 2,10}		Y _{3 3,10}		Y _{3 4,10}		Y _{3 5,10}	$\sum Y_{310}$	$\bar{y}_{310}$
		Y _{3 1,15}		Y _{3 2,15}		Y _{3 3,15}		Y _{3 4,15}		Y _{3 5,15}	$\sum Y_{315}$	$\bar{y}_{315}$
		Y _{3 1,20}		Y _{3 2,20}		Y _{3 3,20}		Y _{3 4,20}		Y _{3 5,20}	$\sum Y_{320}$	$\bar{y}_{320}$
		Y _{3 1,25}		Y _{3 2,25}		Y _{3 3,25}		Y _{3 4,25}		Y _{3 5,25}	$\sum Y_{325}$	$\bar{y}_{325}$
		Y _{3 1,30}		Y _{3 2,30}		Y _{3 3,30}		Y _{3 4,30}		Y _{3 5,30}	$\sum Y_{330}$	$\bar{y}_{330}$

*Nota: La tabla corresponde únicamente a una formulación (por ejemplo: almidón/glicerina 67/33 %).

Fuente: elaboración propia.

- Análisis de permeabilidad al vapor de agua y tensión al rompimiento: se realizó un diseño unifactorial (formulación) y tres niveles (plastificantes: glicerina, urea y mezcla de glicerina con urea), se tomaron las 9 unidades muestrales utilizadas en los análisis de degradabilidad (3 variaciones por cada nivel). Se hicieron cinco repeticiones por cada nivel dando como resultado el siguiente arreglo de corridas experimentales:

Número de corridas experimentales = 9 pruebas * 5 repeticiones = 45 corridas experimentales

En la tabla se colocan las tres formulaciones especificadas: almidón con glicerina, almidón con urea, y almidón con glicerina y urea. Se colocan los subíndices 1-n, 2-n, 3-n, los cuales se utilizaron para las diferentes variaciones de cada formulación.

Tabla XVIII. **Diseño de tratamientos para el análisis de permeabilidad al vapor de agua y tensión al rompimiento las tres formulaciones y sus variaciones en cada medio por separado, propiedad de sorción y permeabilidad al vapor de agua**

Formulación	Número de corridas experimentales para análisis de tensión al rompimiento para las nueve formulaciones					Total	Media
Almidón/glicerina (A/G) 33/67 %	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{14}	Y_{15}	$\sum Y_{1,n}$	$\bar{y}_{1,n}$
Almidón/glicerina (A/G) 50/50 %	Y_{21}	Y_{22}	Y_{23}	Y_{24}	Y_{25}	$\sum Y_{2,n}$	$\bar{y}_{2,n}$
Almidón/glicerina (A/G) 67/33 %	Y_{31}	Y_{32}	Y_{33}	Y_{34}	Y_{35}	$\sum Y_{3,n}$	$\bar{y}_{3,n}$
Almidón/urea (A/U) 33/67 %	Y_{41}	Y_{42}	Y_{43}	Y_{44}	Y_{45}	$\sum Y_{4,n}$	$\bar{y}_{4,n}$
Almidón/urea (A/U) 50/50 %	Y_{51}	Y_{52}	Y_{53}	Y_{54}	Y_{55}	$\sum Y_{5,n}$	$\bar{y}_{5,n}$
Almidón/urea (A/U) 67/33 %	Y_{61}	Y_{62}	Y_{63}	Y_{64}	Y_{65}	$\sum Y_{6,n}$	$\bar{y}_{6,n}$
Almidón/glicerina/urea (A/G/U) 44/33/22 %	Y_{71}	Y_{72}	Y_{73}	Y_{74}	Y_{75}	$\sum Y_{7,n}$	$\bar{y}_{7,n}$
Almidón/glicerina/urea (A/G/U) 44/28/28 %	Y_{81}	Y_{82}	Y_{83}	Y_{84}	Y_{85}	$\sum Y_{8,n}$	$\bar{y}_{8,n}$
Almidón/glicerina/urea (A/G/U) 44/22/33 %	Y_{91}	Y_{92}	Y_{93}	Y_{94}	Y_{95}	$\sum Y_{9,n}$	$\bar{y}_{9,n}$

*Nota: La tabla corresponde únicamente a una formulación (por ejemplo: almidón/glicerina 67/33 %).

Fuente: elaboración propia.

3.8.8. Prueba de Normalidad de Anderson-Darling

El estadístico de Anderson-Darling se utiliza para medir qué tanto siguen los datos una distribución particular, mientras mejor se ajuste la distribución a los datos, menor será el estadístico AD. El estadístico AD es utilizado para determinar el valor p para la prueba de bondad de ajuste, la cual ayuda a determinar la distribución que se ajusta mejor a los datos.

Las hipótesis para la prueba de Anderson-Darling son:

- H_0 : Los datos siguen una distribución especificada.
- H_1 : Los datos no siguen una distribución especificada.

Si el valor de p para la prueba de Anderson-Darling es menor que el nivel de significancia seleccionado se concluye que los datos no siguen dicha distribución.

El intervalo de confianza se determinó con la siguiente ecuación:

$$u = \bar{x} \pm 1,96 * \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \quad (\text{Ecuación No.9})$$

3.8.9. Análisis de varianzas

Para cada variable a analizar se realizaron análisis de varianza por medio de diseños factoriales. La validez del análisis estadístico de los datos experimentales tiene como base los siguientes supuestos:

- Las variables de respuesta $y_{ijk\dots m}$ son variables aleatorias que se distribuyen alrededor de los valores medios $\mu\dots$ (valor fijo).
- Las variables aleatorias $y_{ijk\dots m}$ son sumas de componentes.
- En el caso de un modelo a dos vías de clasificación, las variables aleatorias $(u_i - \bar{u})$, $(u_j - \bar{u})$ y ϵ_{ij} se distribuyen con varianza σ_r^2 , σ_c^2 , σ^2 respectivamente. Luego la covarianza entre estos componentes es nula.
- Los valores resultados del experimento provienen de una distribución de probabilidad normal con media " μ " y varianza σ^2 .

- Los resultados observados de un experimento son independientes entre sí.

Se empleó un análisis de varianza de dos factores para los diseños experimentales a excepción del análisis estadístico del rendimiento de extracción y del análisis de tensión al rompimiento ya que estos se trataron como diseños unifactoriales.

Para determinar si la variación de la fuente de almidón, el medio de degradación o la variación de los aditivos en los diferentes análisis planteados en el diseño de tratamientos se empleó un análisis de diferencia entre medias, mediante el análisis de varianza (ANOVA) de la herramienta de análisis de datos de Microsoft Office Excel 2016 con un nivel de confianza del 95 % debido a que los datos se ajustaron a una distribución normal (apéndices 7 al 11).

Los análisis de varianza se plantearon en función a la relación entre variables en cada variable experimental planteada:

Tabla XIX. Diseño de análisis de varianza de uno y dos factores

Análisis	Factor 1	Factor 2	Variable de respuesta
Rendimiento de extracción	Almidón (unifactorial)		Rendimiento de extracción de almidón
Degradabilidad por cada formulación en un medio	Formulación	Tiempo	Porcentaje de degradabilidad
Permeabilidad al vapor de agua	Formulación (unifactorial)		Permeabilidad
Tensión al rompimiento	Formulación (unifactorial)		Tensión

Fuente: elaboración propia.

3.8.9.1. ANOVA de un factor

En este análisis se hace una comparación entre la media de los efectos y el error de estimación. El criterio de rechazo de la hipótesis nula se basa en si el estadístico de Fisher es mayor al valor crítico, lo cual indica que existe un efecto considerable en los valores de las medias.

Tabla XX. Resultados de un análisis de varianza de un factor

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
Factor	$SS_T = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2$	$\alpha - 1$	$MS_T = \frac{SS_T}{\alpha - 1}$	$\frac{MS_T}{MS_\epsilon}$
Error aleatorio	$SS_\epsilon = SS_T - SS_T$	$N - \alpha$	$MS_\epsilon = \frac{SS_\epsilon}{N - \alpha}$	
Total	$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2$	$N - 1$		

Fuente: MONTGOMERY, Douglas. *Diseño y análisis de experimentos*. p. 63.

3.8.9.2. ANOVA de dos factores

El análisis de varianza de dos factores permite determinar si el error sistemático en los datos de cada variable se debe a factores reales y comprobables o errores aleatorios al relacionarlas entre sí. Se seleccionó un diseño experimental aleatorio para el análisis del efecto de la variación de aditivos en las variables evaluadas.

Determinación de las medias

$$\bar{x}_{j\#\#} = \frac{1}{bc} \sum_{k,l} x_{jkl} \quad \bar{x}_{\#k\#} = \frac{1}{ac} \sum_{j,l} x_{jkl} \quad \bar{x}_{\#\#\#} = \frac{1}{ab} \sum_{j,k} x_{jkl} \quad \bar{x} = \frac{1}{abc} \sum_{j,k,l} x_{jkl} \quad (\text{Ecuación No.10})$$

Donde

$\bar{x}_{j\#\#}$: media de la entrada j del bloque 1

$\bar{x}_{\#k\#}$: media de la entrada k del bloque 2

$\bar{x}_{\#\#\#}$: media de las repeticiones de la entrada j,k

$\bar{x}$: media de medias

Al determinar el valor de la F de Fisher se debe comparar con un valor crítico y con base al resultado se puede determinar si se rechaza las hipótesis nulas: todas las mediciones del factor 1 son iguales, todas las mediciones del factor 2 son iguales o si no hay relación entre los factores 1 y 2. Al no rechazarse las hipótesis nulas se determina que hay un efecto nulo sobre la variación de resultados y se atribuye a un error aleatorio.

Tabla XXI. **Resultado de análisis de varianza de dos factores**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
Entre filas (factor 1)	$\tilde{V}_{B1} = b \sum_{j=1}^a (\bar{x}_{j\#\#} - \bar{x})^2$	a - 1	$\hat{S}_{B1}^2 = \frac{\tilde{V}_{B1}}{a-1}$	$\frac{\hat{S}_{B1}^2}{\hat{S}_E^2}$
Entre columnas (factor 2)	$\tilde{V}_{B2} = a \sum_{k=1}^b (\bar{x}_{\#k\#} - \bar{x})^2$	b - 1	$\hat{S}_{B2}^2 = \frac{\tilde{V}_{B2}}{b-1}$	$\frac{\hat{S}_{B2}^2}{\hat{S}_E^2}$
Interacción	$\tilde{V}_i = c \sum_{j,k} (\bar{x}_{jkl} - \bar{x}_{j\#\#} - \bar{x}_{\#k\#} + \bar{x})^2$	ab(c-1)	$\hat{S}_i^2 = \frac{\tilde{V}_i}{(a-1)(b-1)}$	$\frac{\hat{S}_i^2}{\hat{S}_E^2}$
Aleatoria	$\tilde{V}_E = \sum_{j,k,l} (\bar{x}_{jkl} - \bar{x})^2$	(a - 1)(b - 1)	$\hat{S}_E^2 = \frac{\tilde{V}_E}{ab(c-1)}$	
Total	$\tilde{V} = \tilde{V}_E + \tilde{V}_{B1} + \tilde{V}_{B2} + \tilde{V}_i$	abc - 1		

Fuente: SPIEGEL, Murray. *Teoría y problemas de probabilidad y estadística*. p. 48.

3.9. Plan de análisis de los resultados

A continuación, se describe el desarrollo del plan del análisis de los resultados.

3.9.1. Programas para utilizar para el análisis de datos

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

3.9.2. Métodos y modelos de los datos según tipo de variables

Los datos obtenidos se analizaron de forma matemática y estadística, de esta manera se determinó objetivamente cuál fuente de almidón tiene un mejor rendimiento para la fabricación de bioplásticos, en qué medio se degradan más las muestras de bioplásticos y si la variación de los aditivos tiene un efecto significativo en la degradabilidad, sorción, permeabilidad al vapor y tensión al rendimiento.

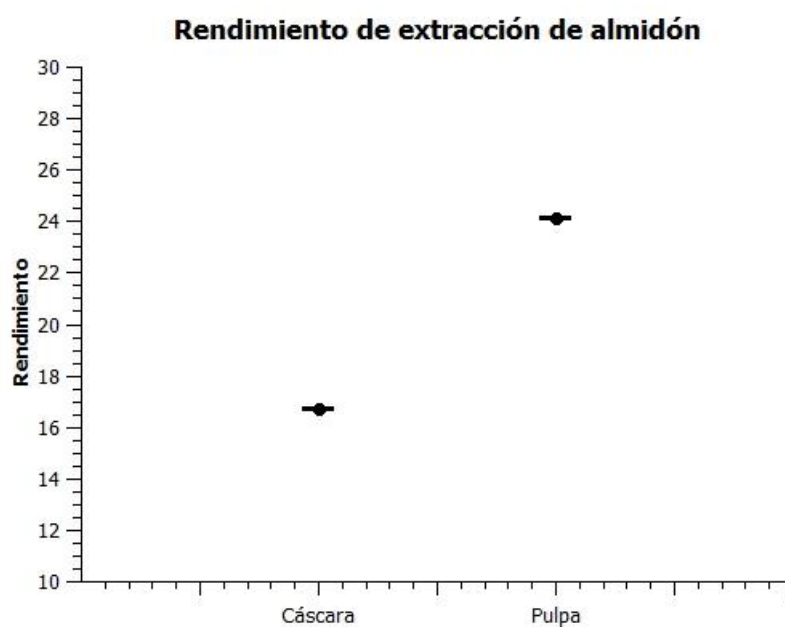
3.9.3. Programas a utilizar para análisis de datos

- Microsoft Word 2016: mediante este software se editó y presenta el informe de los resultados obtenidos en el trabajo de investigación.
- Microsoft Excel 2016: hoja electrónica que permite automatizar diversas operaciones matemáticas y parámetros estadísticos como media aritmética, desviación estándar y varianza. Además, este programa permite realizar el análisis de varianza de un factor, para la evaluación de las hipótesis.

- Qtiplot: es un programa informático multiplataforma para gráficos interactivos y análisis de datos.

4. RESULTADOS

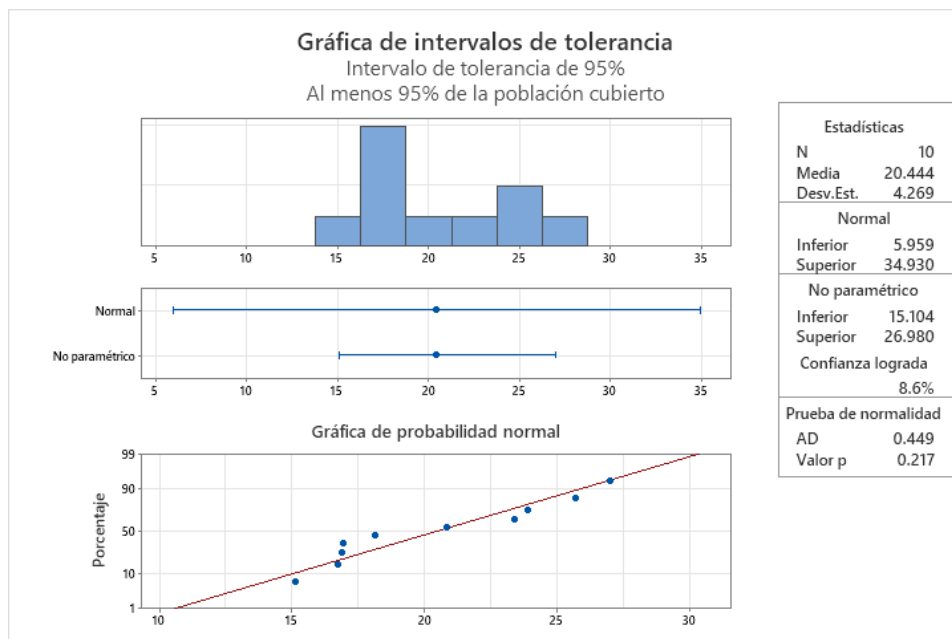
Figura 8. Rendimiento de extracción de almidón en función de la fuente de almidón



Fuente de almidón	Cáscara	Pulpa
Rendimiento (%)	16,74±0,96	24,15±2,10
Resultado Prueba de Yodo	Positivo	Positivo
Coloración de solución	Azul	Azul

Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Intervalos de tolerancia y prueba de normalidad de Anderson Darling para la determinación de rendimiento de extracción de almidón**



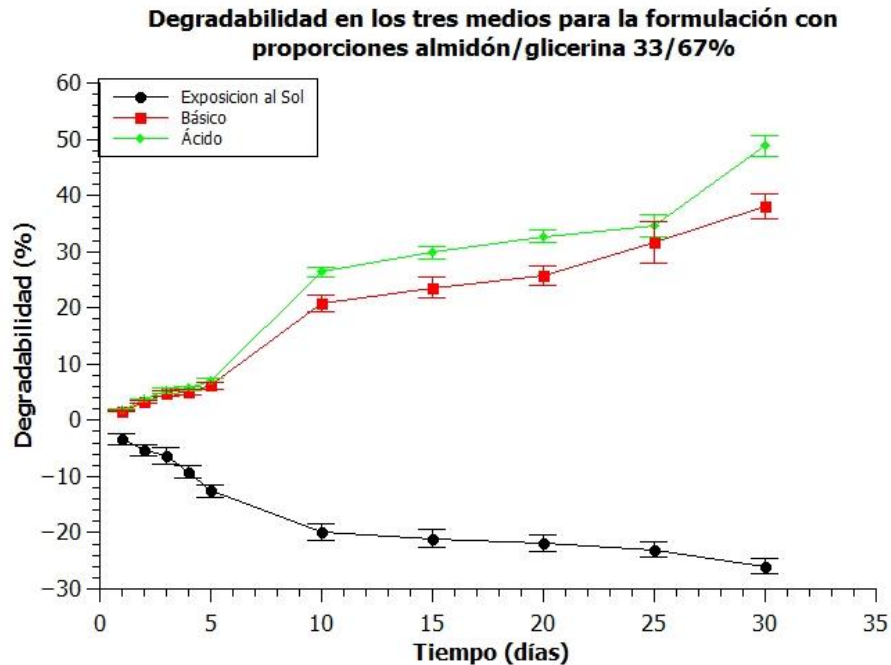
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **ANOVA de un factor para la determinación de rendimiento de extracción del almidón**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Rendimiento	1	137,40	137,404	41,35	0,000
Error	8	26,59	3,323		
Total	9	163,99			

Fuente: elaboración propia.

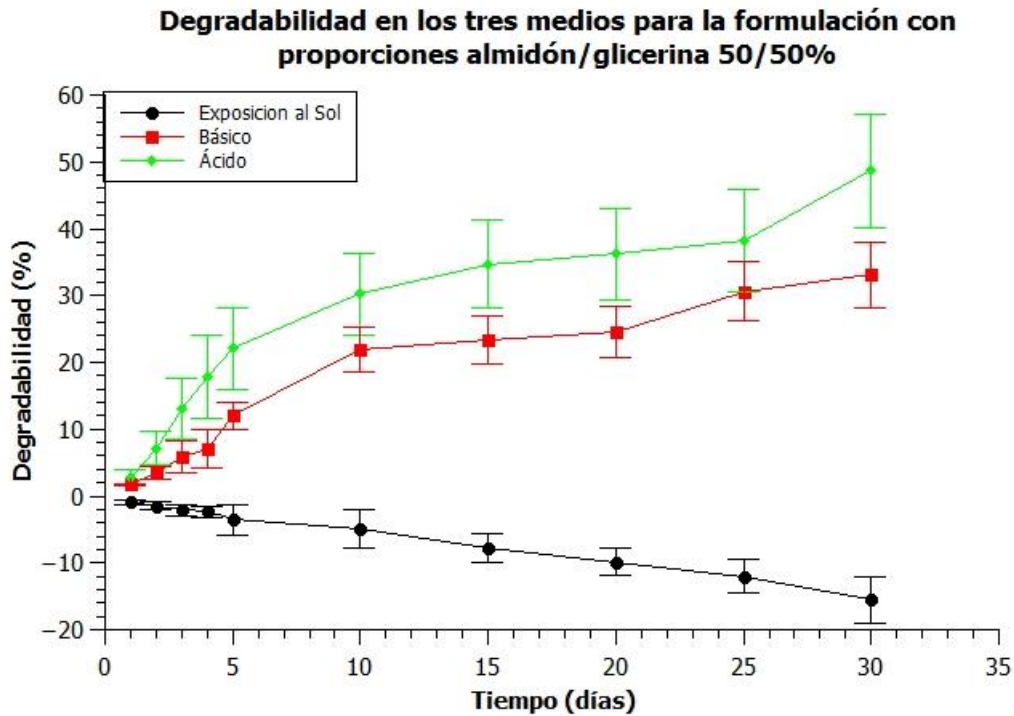
Figura 10. **Degradabilidad de la formulación con proporción almidón/glicerina 33/67 % en medio ácido, básico y por exposición a los rayos UV provenientes del Sol**



Medio	Modelo matemático de 1 a 5 días	R ²	Error del modelo	Modelo matemático de 10 a 30 días	R ²	Error del modelo
Ácido	$y = 1,37x + 0,54$	0,99	7 %	$y = 0,0070x^3 - 0,37x^2 + 6,63x - 10,27$	0,99	3 %
Básico	$y = 1,21x + 0,49$	0,99	8 %	$y = 0,0316x^2 - 0,418x + 21,99$	0,99	2 %
Rayos del Sol	$y = -0,29x^2 - 0,52x - 2,65$	0,99	5 %	$y = -0,011x^2 + 0,16x - 20,51$	0,99	1 %

Fuente: elaboración propia.

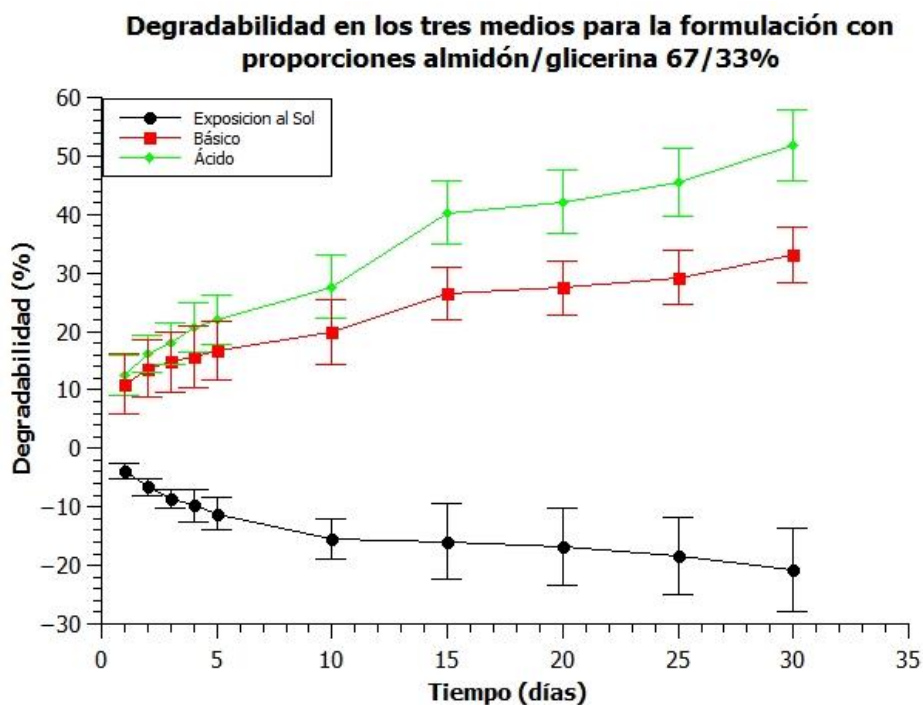
Figura 11. **Degradabilidad de la formulación con proporción almidón/glicerina 50/50 % en medio ácido, básico y por exposición a los rayos UV provenientes del Sol**



Medio	Modelo matemático de 1 a 5 días	R ²	Error del modelo	Modelo matemático de 10 a 30 días	R ²	Error del modelo
Ácido	$y = 4,92x - 2,27$	0,99	3 %	$y = 0,0076x^3 - 0,42x^2 + 7,90x - 14,27$	0,99	2 %
Básico	$y = 2,25x - 0,50$	0,99	10 %	$y = -0,0018x^3 + 0,13x^2 - 2,24x + 33,49$	0,99	3 %
Rayos del Sol	$y = -0,57x - 0,30$	0,99	7 %	$y = -0,0030x^2 - 0,39x - 1,02$	0,99	3 %

Fuente: elaboración propia.

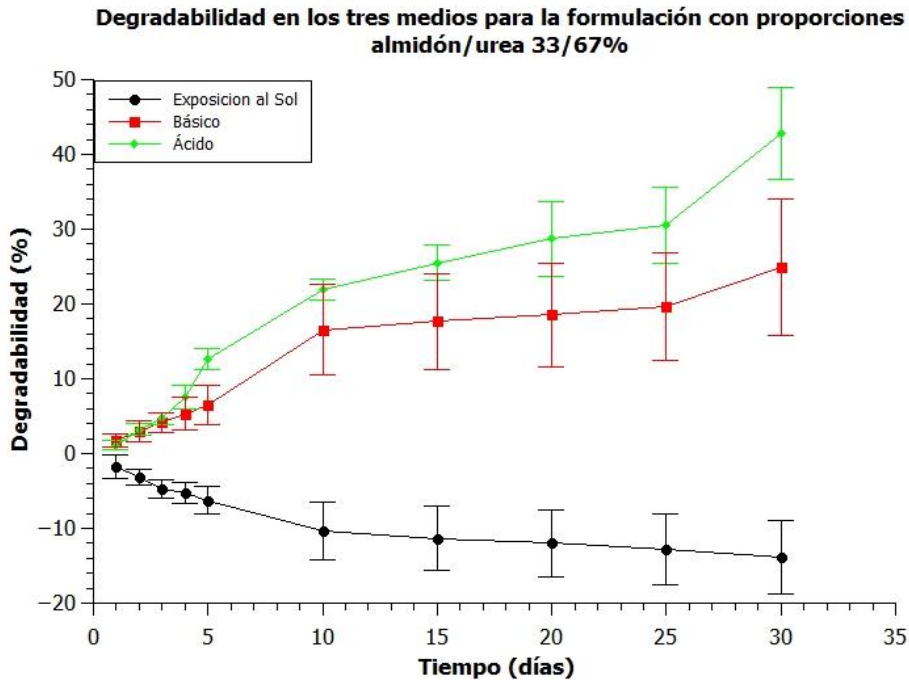
Figura 12. **Degradabilidad de la formulación con proporción almidón/glicerina 67/33 % en medio ácido, básico y por exposición a los rayos UV provenientes del Sol**



Medio	Modelo matemático de 1 a 5 días	R ²	Error del modelo	Modelo matemático de 10 a 30 días	R ²	Error del modelo
Ácido	$y = -0,28x^2 + 4,03x + 8,83$	0,99	2 %	$y = 0,0093x^3 - 0,59x^2 + 12,69x - 49,63$	0,99	1 %
Básico	$y = -0,26x^2 + 2,92x + 8,48$	0,99	1 %	$y = 0,0052x^3 - 0,32x^2 + 6,88x - 21,59$	0,99	7 %
Rayos del Sol	$y = 0,27x^2 - 3,37x - 0,87$	0,99	1 %	$y = -0,012x^2 + 0,23x - 16,67$	0,99	0 %

Fuente: elaboración propia.

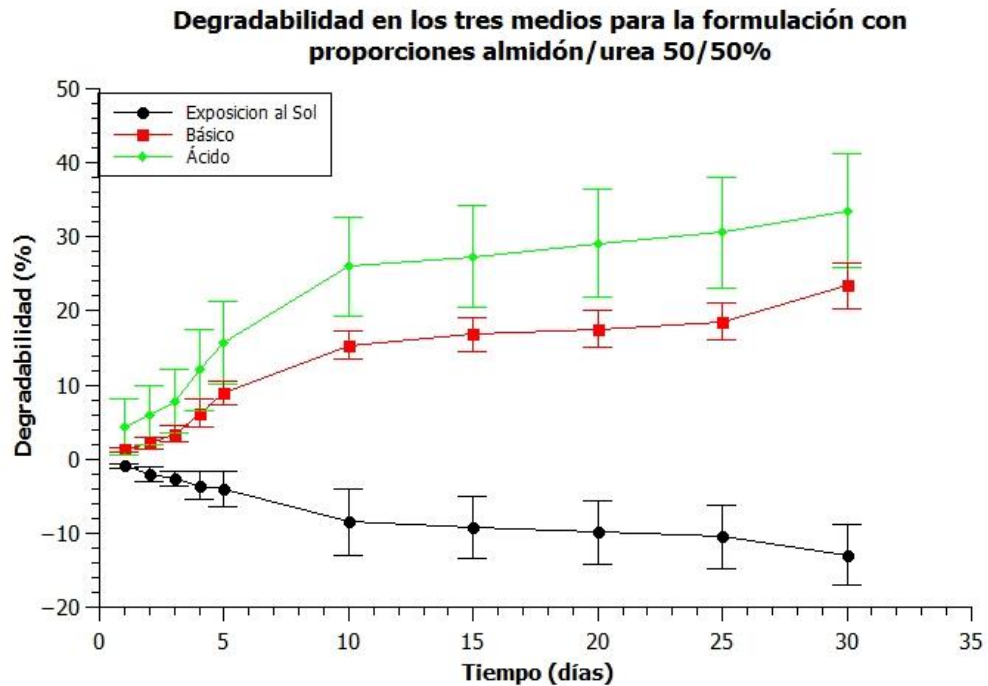
Figura 13. **Degradabilidad de la formulación con proporción almidón/urea 33/67 % en medio ácido, básico y por exposición a los rayos UV provenientes del Sol**



Medio	Modelo matemático de 1 a 5 días	R ²	Error del modelo	Modelo matemático de 10 a 30 días	R ²	Error del modelo
Ácido	$y = 0,42x^2 + 0,16x + 0,60$	0,99	8 %	$y = 0,025x^2 - 0,071x + 20,25$	0,98	4 %
Básico	$y = 1,19x + 0,55$	0,99	1 %	$y = 0,021x^2 - 0,48x + 19,52$	0,98	3 %
Rayos del Sol	$y = -1,15x - 0,83$	0,98	6 %	$y = -0,00015x^2 - 0,16x - 8,77$	0,99	1 %

Fuente: elaboración propia.

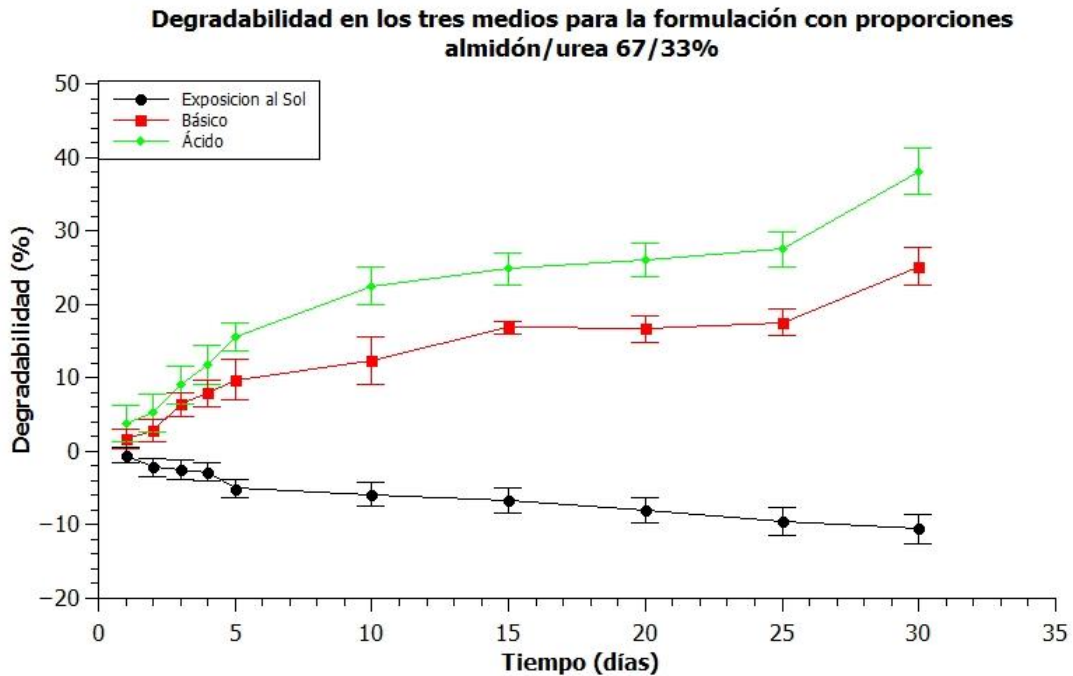
Figura 14. **Degradabilidad de la formulación con proporción almidón/urea 50/50 % en medio ácido, básico y por exposición a los rayos UV provenientes del Sol**



Medio	Modelo matemático de 1 a 5 días	R ²	Error del modelo	Modelo matemático de 10 a 30 días	R ²	Error del modelo
Ácido	$y = 0,50x^2 - 0,13x + 3,98$	0,99	2 %	$y = 0,36x + 22,13$	0,98	1 %
Básico	$y = 0,40x^2 - 0,47x + 1,37$	0,98	3 %	$y = 0,0029x^3 - 0,154x^2 + 2,80x - 0,069$	0,99	1 %
Rayos del Sol	$y = -0,85x - 0,11$	0,99	5 %	$y = -0,010x^2 + 0,19x - 9,68$	0,97	2 %

Fuente: elaboración propia.

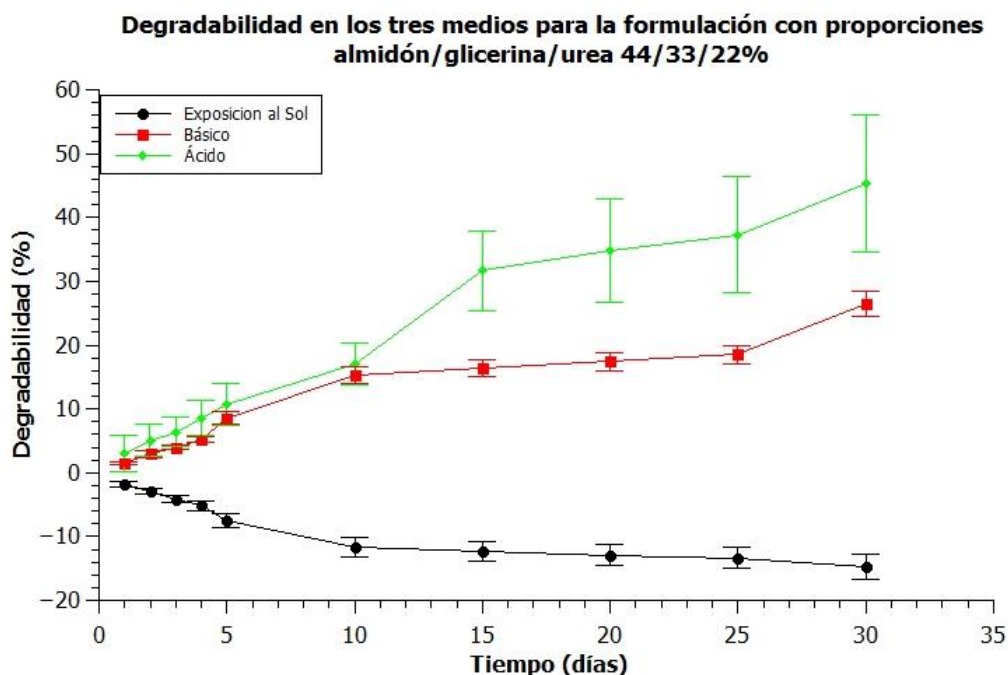
Figura 15. **Degradabilidad de la formulación con proporción almidón/urea 67/33 % en medio ácido, básico y por exposición a los rayos UV provenientes del Sol**



Medio	Modelo matemático de 1 a 5 días	R ²	Error del modelo	Modelo matemático de 10 a 30 días	R ²	Error del modelo
Ácido	$y = 3,05x - 0,022$	0,99	8 %	$y = 0,0067x^3 - 0,36x^2 + 6,27x - 11,52$	0,99	7 %
Básico	$y = -0,0064x^2 + 2,19x - 0,77$	0,97	7 %	$y = 0,0077x^3 - 0,44x^2 + 8,31x - 34,27$	0,98	5 %
Rayos del Sol	$y = -0,26x^3 + 2,28x^2 - 6,66x + 4,11$	0,99	10 %	$y = -0,0019x^2 - 0,17x - 3,92$	0,99	9 %

Fuente: elaboración propia.

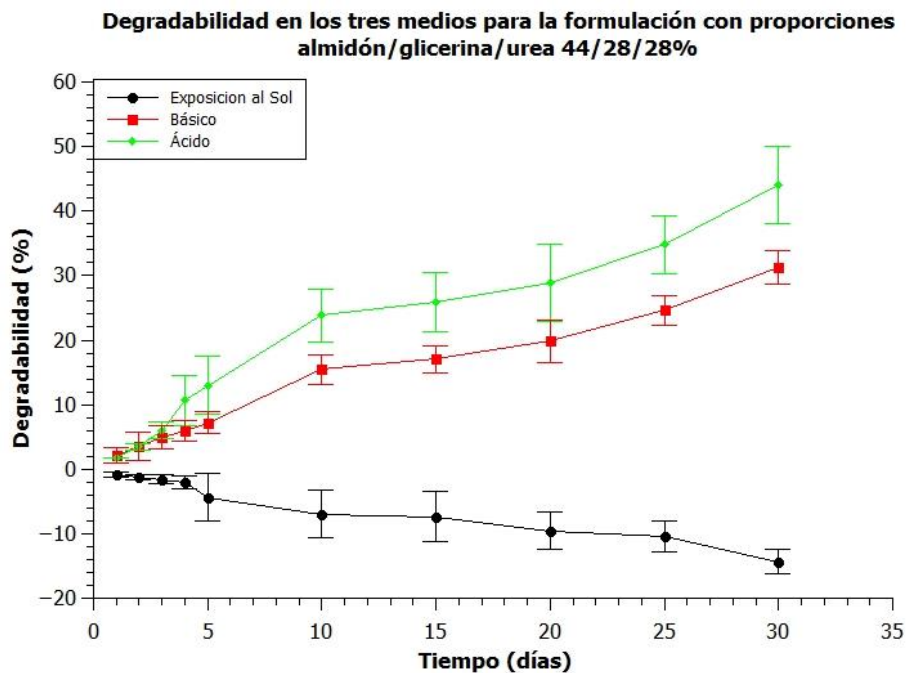
Figura 16. **Degradabilidad de la formulación con proporción almidón/glicerina/urea 44/33/22 % en medio ácido, básico y por exposición a los rayos UV provenientes del Sol**



Medio	Modelo matemático de 1 a 5 días	R ²	Error del modelo	Modelo matemático de 10 a 30 días	R ²	Error del modelo
Ácido	$y = 1,87x + 1,08$	0,99	3 %	$y = -0,066x^2 + 3,86x - 14,59$	0,98	7 %
Básico	$y = 1,37x + 0,094$	0,99	7 %	$y = 0,0043x^3 - 0,22x^2 + 3,70x - 4,28$	0,99	4 %
Rayos del Sol	$y = -1,28x - 0,38$	0,98	5 %	$y = -0,0030x^2 - 0,03x - 11,15$	0,97	1 %

Fuente: elaboración propia.

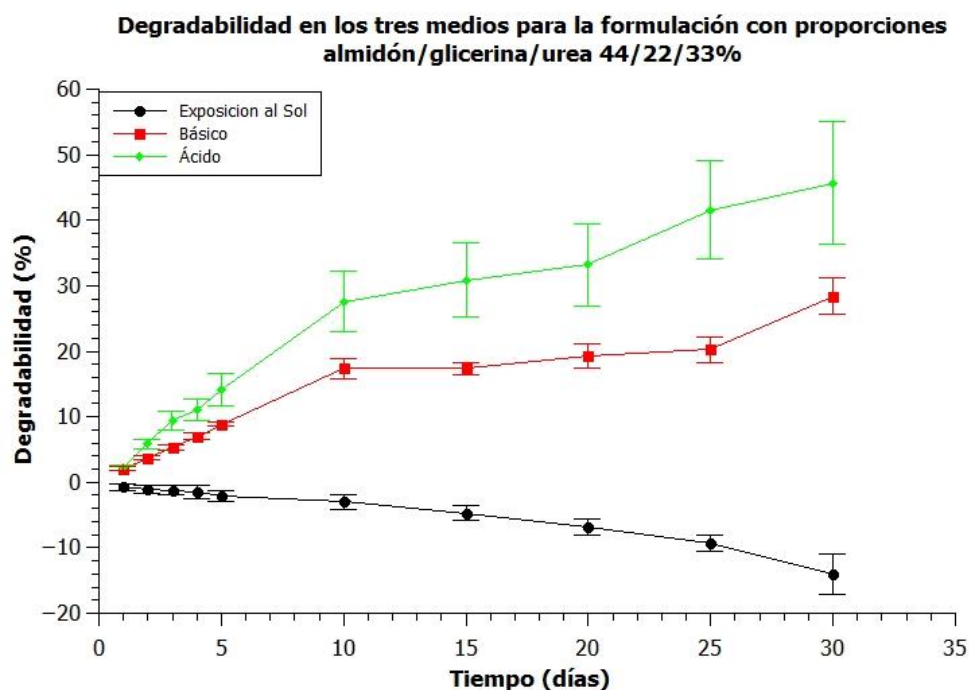
Figura 17. **Degradabilidad de la formulación con proporción almidón/glicerina/urea 44/28/28 % en medio ácido, básico y por exposición a los rayos UV provenientes del Sol**



Medio	Modelo matemático de 1 a 5 días	R ²	Error del modelo	Modelo matemático de 10 a 30 días	R ²	Error del modelo
Ácido	$y = 0,41x^2 + 0,51x + 0,81$	0,99	3 %	$y = 0,048x^2 - 0,93x + 28,58$	0,99	1 %
Básico	$y = 1,26x + 0,91$	0,99	3 %	$y = 0,034x^2 - 0,59x + 17,99$	0,98	1 %
Rayos del Sol	$y = -0,075x^2 - 0,044x - 0,78$	0,98	10 %	$y = -0,018x^2 + 0,37x - 9,01$	0,98	4 %

Fuente: elaboración propia.

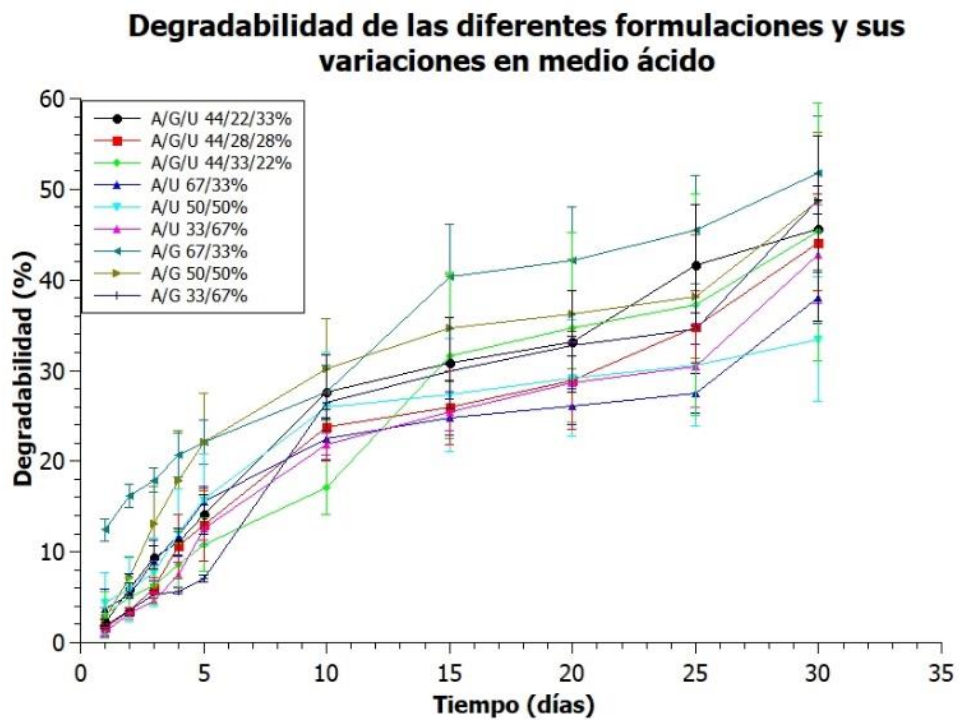
Figura 18. **Degradabilidad de la formulación con proporción almidón/glicerina/urea 44/22/33 % en medio ácido, básico y por exposición a los rayos UV provenientes del Sol**



Medio	Modelo matemático de 1 a 5 días	R ²	Error del modelo	Modelo matemático de 10 a 30 días	R ²	Error del modelo
Ácido	$y = 3,18x - 0,88$	0,99	6 %	$y = 0,88x + 18,04$	0,97	4 %
Básico	$y = 1,68x + 0,38$	0,99	1 %	$y = 0,037x^2 - 1,01x + 24,04$	0,98	4 %
Rayos del Sol	$y = -0,29x - 0,44$	0,98	6 %	$y = -0,45x + 1,89$	0,97	8 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Comparación del efecto de la variación de las formulaciones y sus variaciones en la degradabilidad de las películas de bioplástico en medio ácido



Inicial	Componente
A	Almidón
G	Glicerina
U	Urea

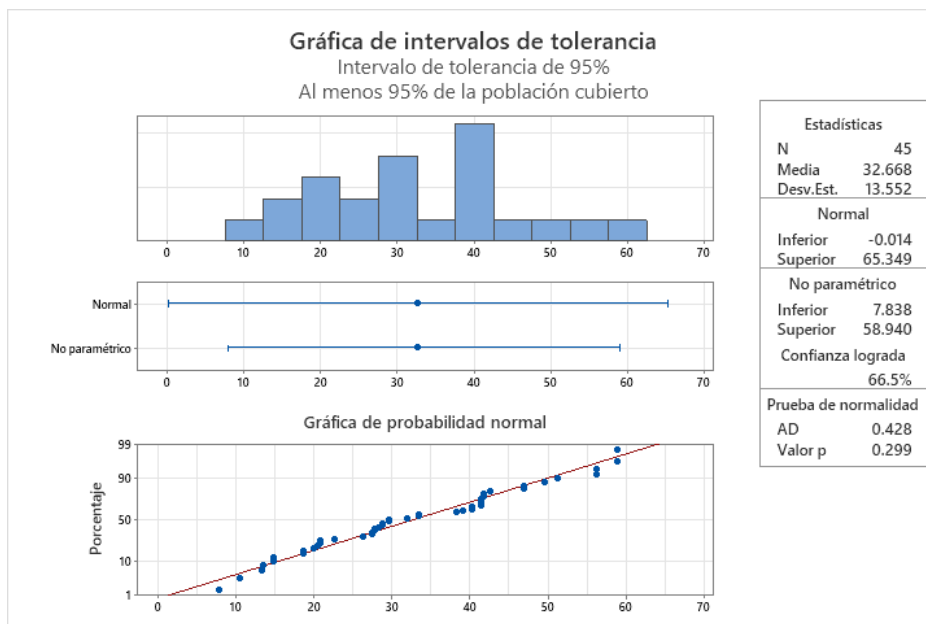
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Modelos matemáticos experimentales de la comparación del efecto de la variación de las formulaciones y sus variaciones en la degradabilidad en medio ácido**

Formulación	Modelo matemático de 1 a 5 días	R ²	Error	Modelo matemático de 10 a 30 días	R ²	Error
A/G 33/67 %	$y = 1,37x + 0,54$	0,99	7 %	$y = 0,0070x^3 - 0,37x^2 + 6,63x - 10,27$	0,99	3 %
A/G 50/50 %	$y = 4,92x - 2,27$	0,99	3 %	$y = 0,0076x^3 - 0,42x^2 + 7,90x - 14,27$	0,99	2 %
A/G 67/33 %	$y = -0,28x^2 + 4,03x + 8,83$	0,99	2 %	$y = 0,0093x^3 - 0,59x^2 + 12,69x - 49,63$	0,99	1 %
A/U 33/67 %	$y = 0,42x^2 + 0,16x + 0,60$	0,99	8 %	$y = 0,025x^2 - 0,071x + 20,25$	0,98	4 %
A/U 50/50 %	$y = 0,50x^2 - 0,13x + 3,98$	0,99	2 %	$Y = 0,36x + 22,13$	0,98	1 %
A/U 67/33 %	$y = 3,05x - 0,022$	0,99	8 %	$y = 0,0067x^3 - 0,36x^2 + 6,27x - 11,52$	0,99	7 %
A/G/U 44/33/22 %	$y = 1,87x + 1,08$	0,99	3 %	$Y = -0,066x^2 + 3,86x - 14,59$	0,98	7 %
A/G/U 44/28/28 %	$y = 0,41x^2 + 0,51x + 0,81$	0,99	3 %	$y = 0,048x^2 - 0,93x + 28,58$	0,99	1 %
A/G/U 44/22/33 %	$y = 3,18x - 0,88$	0,99	6 %	$y = 0,88x + 18,04$	0,97	4 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Intervalos de tolerancia y prueba de normalidad de Anderson Darling para la comparación de degradabilidad de las películas de bioplástico en medio ácido**



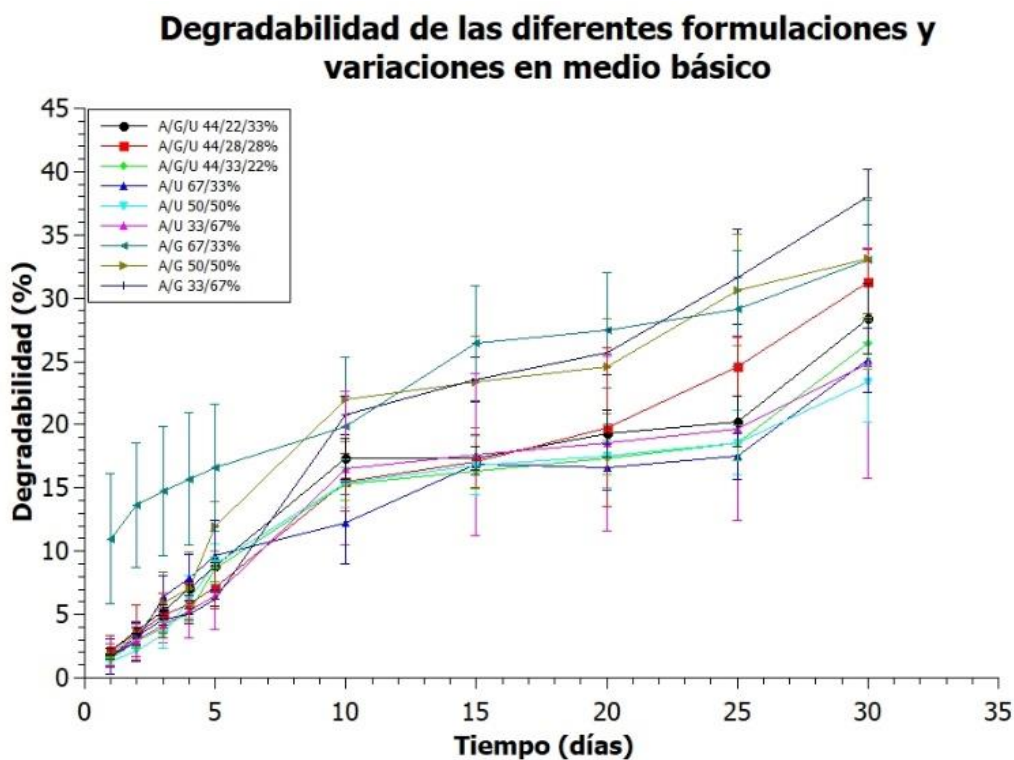
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **ANOVA de dos factores para la comparación de degradabilidad de las películas de bioplástico en medio ácido**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Formulación	2	1 309,5	654,77	19,93	0,000
Tiempo	2	11 601,1	5 800,55	176,56	0,000
Error	40	1 314,1	32,85		
Falta de ajuste	4	431,9	107,98	4,41	0,005
Error puro	36	882,2	24,51		
Total	44	14 224,8			

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. Comparación del efecto de la variación de las formulaciones y sus variaciones en la degradabilidad de las películas de bioplástico en medio básico



Inicial	Componente
A	Almidón
G	Glicerina
U	Urea

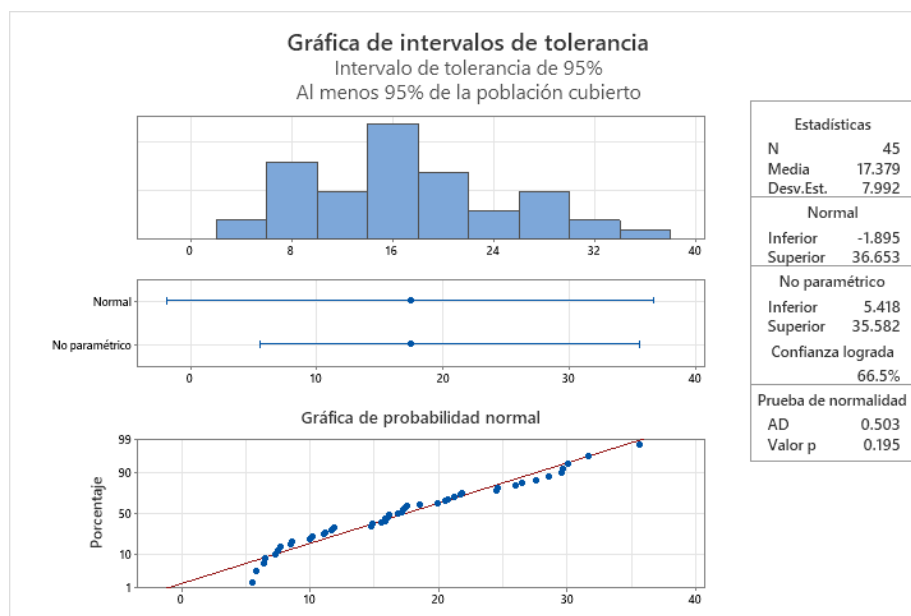
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Modelos matemáticos experimentales de la comparación del efecto de la variación de las formulaciones y sus variaciones en la degradabilidad en medio básico**

Formulación	Modelo matemático de 1 a 5 días	R ²	Error	Modelo matemático de 10 a 30 días	R ²	Error
A/G 33/67 %	$y = 1,21x + 0,49$	0,99	8 %	$y = 0,0316x^2 - 0,418x + 21,99$	0,99	2 %
A/G 50/50 %	$y = 2,25x - 0,50$	0,99	10 %	$y = -0,0018x^3 + 0,13x^2 - 2,24x + 33,49$	0,99	3 %
A/G 67/33 %	$y = -0,26x^2 + 2,92x + 8,48$	0,99	1 %	$y = 0,0052x^3 - 0,32x^2 + 6,88x - 21,59$	0,99	7 %
A/U 33/67 %	$y = 1,19x + 0,55$	0,99	1 %	$y = 0,021x^2 - 0,48x + 19,52$	0,98	3 %
A/U 50/50 %	$y = 0,40x^2 - 0,47x + 1,37$	0,98	3 %	$Y = 0,0029x^3 - 0,154x^2 + 2,80x - 0,069$	0,99	1 %
A/U 67/33 %	$y = -0,0064x^2 + 2,19x - 0,77$	0,97	7 %	$y = 0,0077x^3 - 0,44x^2 + 8,31x - 34,27$	0,98	5 %
A/G/U 44/33/22 %	$y = 1,37x + 0,094$	0,99	7 %	$Y = 0,0043x^3 - 0,22x^2 + 3,70x - 4,28$	0,99	4 %
A/G/U 44/28/28 %	$y = 1,26x + 0,91$	0,99	3 %	$y = 0,034x^2 - 0,59x + 17,99$	0,98	1 %
A/G/U 44/22/33 %	$y = 1,68x + 0,38$	0,99	1 %	$y = 0,037x^2 - 1,01x + 24,04$	0,98	4 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Intervalos de tolerancia y prueba de normalidad de Anderson Darling para la comparación de degradabilidad de las películas de bioplástico en medio básico**



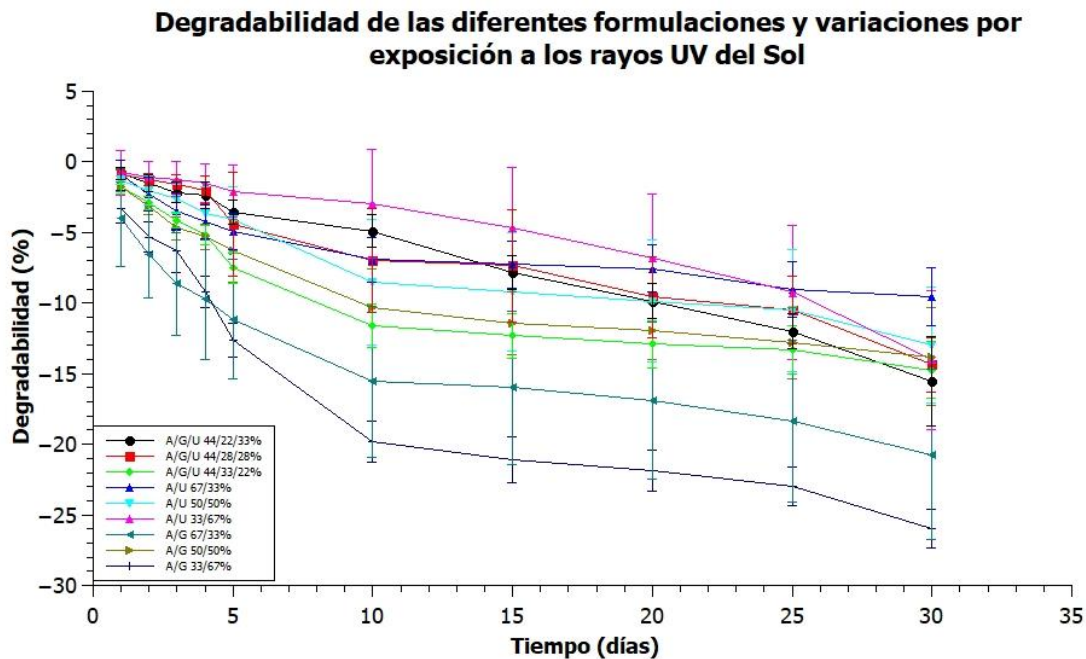
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **ANOVA de dos factores para la comparación de degradabilidad de las películas de bioplástico en medio básico**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Formulación	2	996,1	498,064	43,93	0,000
Tiempo	2	1 833,1	916,542	80,84	0,000
Error	40	453,5	11,338		
Falta de ajuste	4	330,8	82,701	24,26	0,000
Error puro	36	122,7	3,409		
Total	44	3 282,7			

Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Comparación del efecto de la variación de las formulaciones y sus variaciones en el cambio de peso de las películas de bioplástico por acción de los rayos UV del sol**



Inicial	Componente
A	Almidón
G	Glicerina
U	Urea

Fuente: elaboración propia.

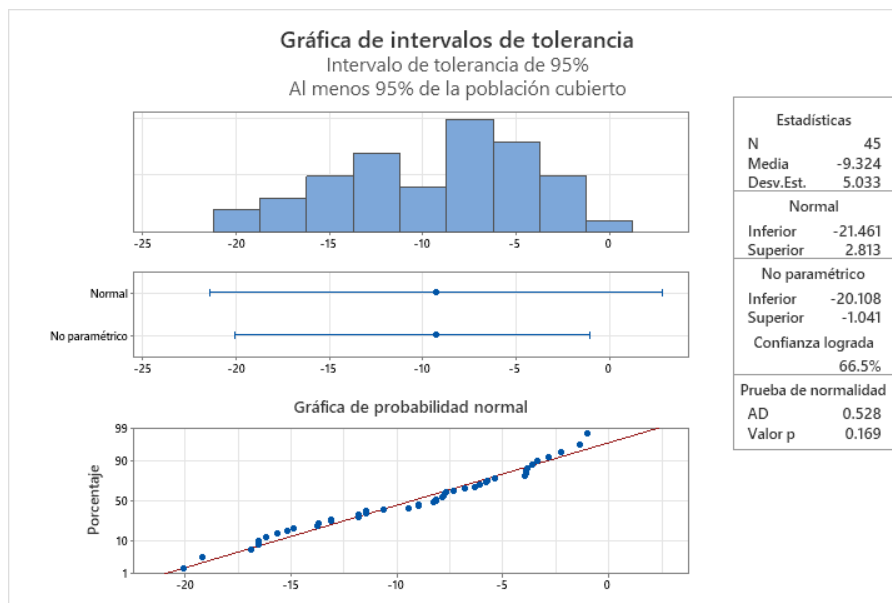
No se determinó que exista una degradabilidad debido a que no se tomaron los factores del entorno que afectaron el experimento por lo que se realizó un gráfico que representa un aumento porcentual en el peso de las muestras.

Tabla XXVII. **Modelos matemáticos experimentales de la comparación del efecto de la variación de las formulaciones y sus variaciones en la degradabilidad por acción de los rayos UV del sol**

Formulación	Modelo matemático de 1 a 5 días	R ²	Error	Modelo matemático de 10 a 30 días	R ²	Error
A/G 33/67 %	$y = -0,29x^2 - 0,52x - 2,65$	0,99	5 %	$y = -0,011x^2 + 0,16x - 20,51$	0,99	1 %
A/G 50/50 %	$y = -0,57x - 0,30$	0,99	7 %	$y = -0,0030x^2 - 0,39x - 1,02$	0,99	3 %
A/G 67/33 %	$y = 0,27x^2 - 3,37x - 0,87$	0,99	1 %	$y = -0,012x^2 + 0,23x - 16,67$	0,99	0 %
A/U 33/67 %	$y = -1,15x - 0,83$	0,98	6 %	$y = -0,00015x^2 - 0,16x - 8,77$	9,99	1 %
A/U 50/50 %	$y = -0,85x - 0,11$	0,99	5 %	$Y = -0,010x^2 + 0,19x - 9,68$	0,97	2 %
A/U 67/33 %	$y = -0,26x^3 + 2,28x^2 - 6,66x + 4,11$	0,99	10 %	$y = -0,0019x^2 - 0,17x - 3,92$	0,99	9 %
A/G/U 44/33/22 %	$y = -1,28x - 0,38$	0,98	5 %	$Y = -0,0030x^2 - 0,03x - 11,15$	0,97	1 %
A/G/U 44/28/28 %	$y = -0,075x^2 - 0,044x - 0,78$	0,98	10 %	$y = -0,018x^2 + 0,37x - 9,01$	0,98	4 %
A/G/U 44/22/33 %	$y = -0,29x - 0,44$	0,98	6 %	$y = -0,45x + 1,89$	0,97	8 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Intervalos de tolerancia y prueba de normalidad de Anderson Darling para la comparación de degradabilidad de las películas de bioplástico por radiación UV del sol**



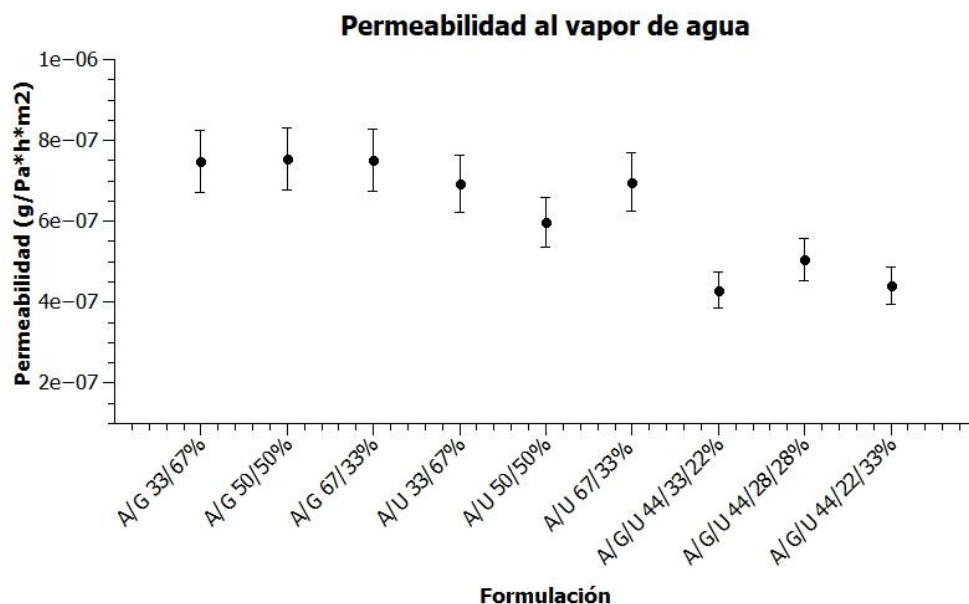
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **ANOVA de dos factores para la comparación de degradabilidad de las películas de bioplástico por radiación UV del sol**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Formulación	2	70,93	35,47	6,04	0,005
Tiempo	2	5 069,81	2 534,91	431,49	0,000
Error	40	234,99	5,87		
Falta de ajuste	4	90,92	22,73	5,68	0,001
Error puro	36	144,06	4,00		
Total	44	5 375,73			

Fuente: elaboración propia.

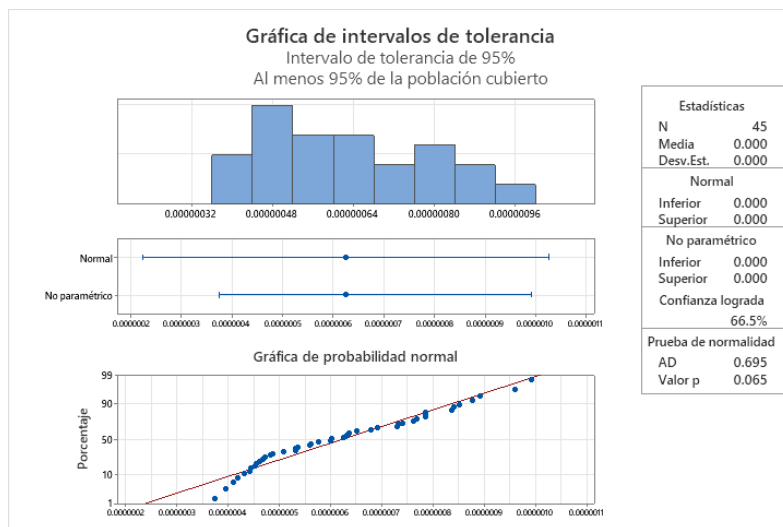
Figura 25. Comparación de la permeabilidad al vapor de agua de las películas de bioplástico en función de las diferentes formulaciones



Formulación/variación	Permeabilidad (g/Pa*h*m ²)
Proporción almidón/glicerina (A/G) 33/67 %	7,49E-07±7,68E-08
Proporción almidón/glicerina (A/G) 50/50 %	7,54E-07±7,73E-08
Proporción almidón/glicerina (A/G) 67/33 %	7,52E-07±7,70E-08
Proporción almidón/urea (A/U) 33/67 %	6,92E-07±7,10E-08
Proporción almidón/urea (A/U) 50/50 %	5,98E-07±6,13E-08
Proporción almidón/urea (A/U) 67/33 %	6,97E-07±7,14E-08
Proporción almidón/glicerina/urea (A/G/U) 44/33/22 %	4,30E-07±4,41E-08
Proporción almidón/glicerina/urea (A/G/U) 44/28/28 %	5,06E-07±5,19E-08
Proporción almidón/glicerina/urea (A/G/U) 44/22/33 %	4,41E-07±4,52E-08

Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Intervalos de tolerancia y prueba de normalidad de Anderson Darling para la determinación de la permeabilidad al vapor de agua de las películas de bioplástico**



Intervalo de tolerancia de 95%

Variable	Método normal	Método no paramétrico	Confianza lograda
Permeabilidad (0.0000002227; 0.0000010258)	(0.0000003738; 0.0000009923)		66.5%

El nivel de confianza alcanzado se aplica sólo al método no paramétrico

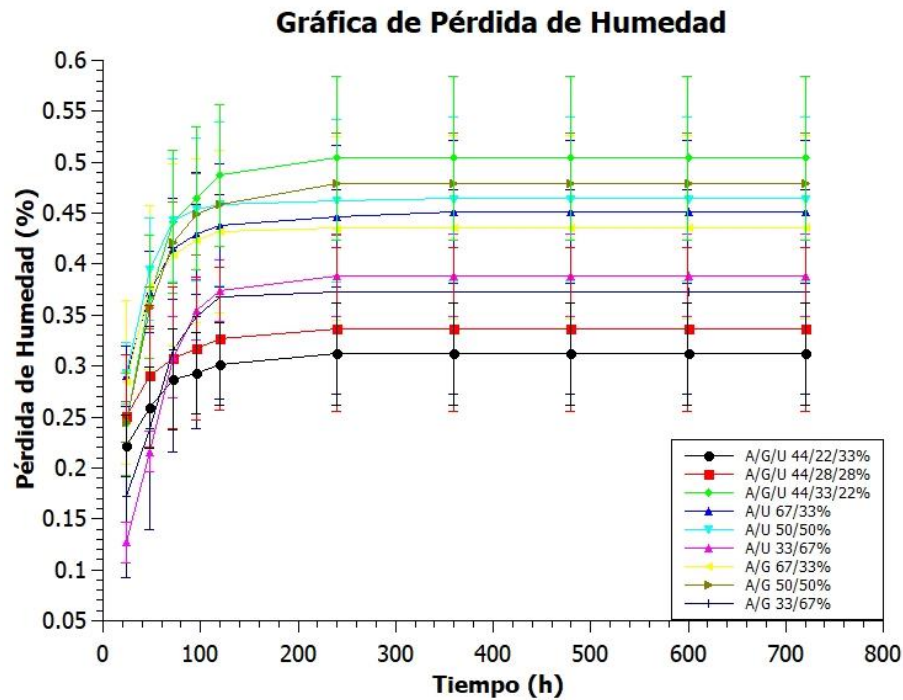
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **ANOVA de un factor para la determinación de la permeabilidad al vapor de agua de las películas de bioplástico**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	8	0,000000000007223	0,000000000000903	6,53	0,000
Error	36	0,000000000004976	0,000000000000138		
Total	44	0,000000000012199			

Fuente: elaboración propia.

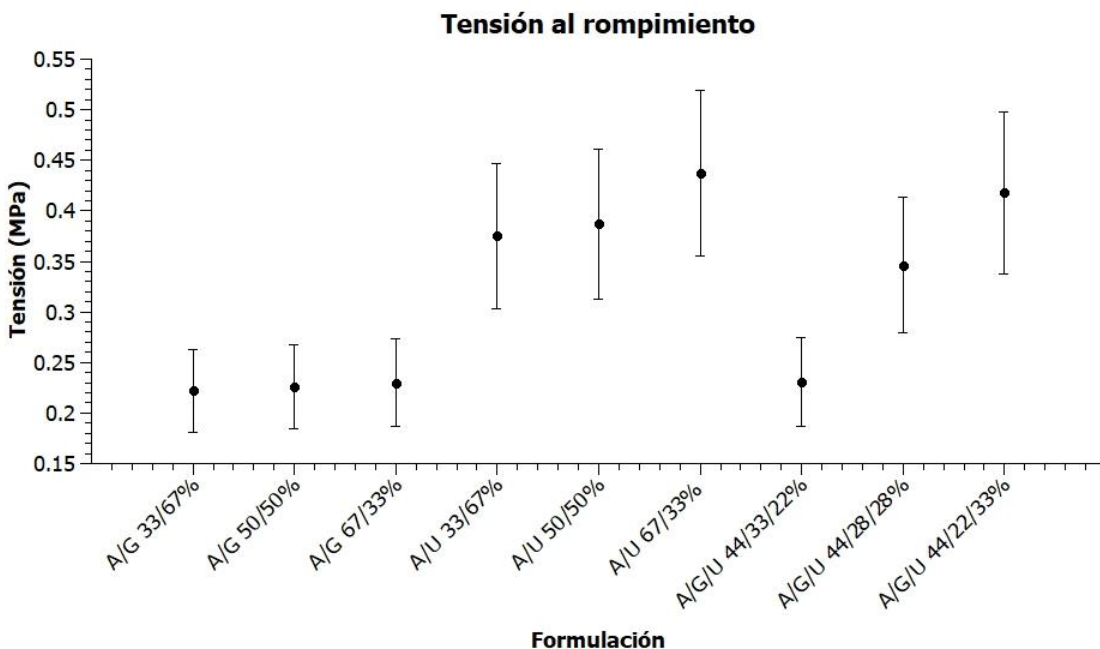
Figura 27. Comparación de la desorción de agua y modelos de Peleg



Formulación, variación	Modelo de Peleg para pérdida de humedad	R ²	Error del modelo matemático
A/G 33/67 %	$M_t = M_i + \frac{t}{(88,37) + (3,52) * t}$	0,99	9 %
A/G 50/50 %	$M_t = M_i + \frac{t}{(51,85) + (2,38) * t}$	0,99	6 %
A/G 67/33 %	$M_t = M_i + \frac{t}{(46,20) + (3,39) * t}$	0,99	6 %
A/U 33/67 %	$M_t = M_i + \frac{t}{(75,50) + (2,85) * t}$	0,99	13 %
A/U 50/50 %	$M_t = M_i + \frac{t}{(46,48) + (3,15) * t}$	0,99	6 %
A/U 67/33 %	$M_t = M_i + \frac{t}{(55,61) + (3,15) * t}$	0,99	4 %
A/G/U 44/33/22 %	$M_t = M_i + \frac{t}{(61,06) + (2,62) * t}$	0,99	6 %
A/G/U 44/28/28 %	$M_t = M_i + \frac{t}{(96,30) + (5,05) * t}$	0,99	12 %
A/G/U 44/22/33 %	$M_t = M_i + \frac{t}{(70,75) + (4,45) * t}$	0,99	11 %
Humedad relativa promedio (%)		64,7	

Fuente: elaboración propia.

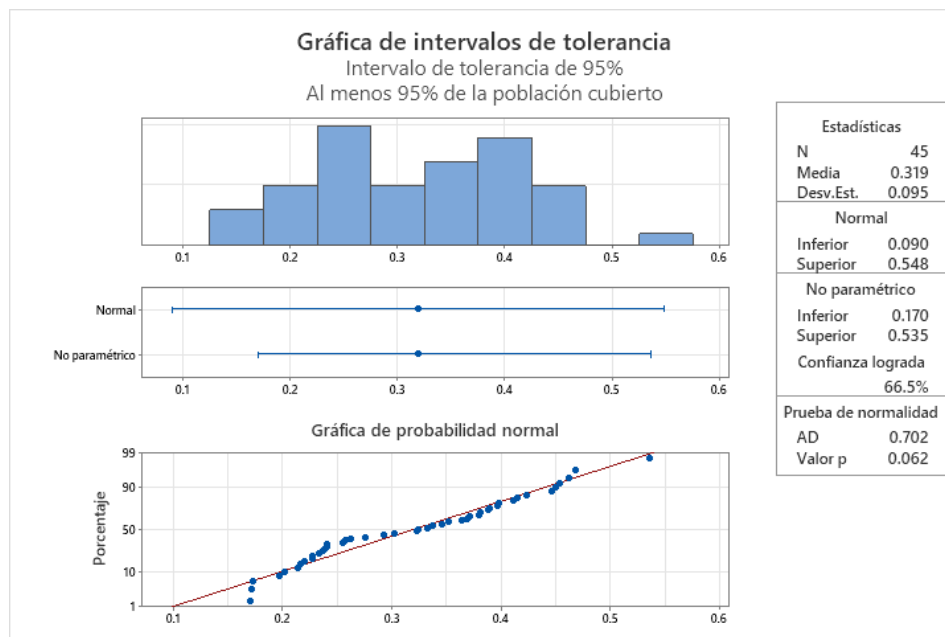
Figura 28. **Evaluación de la tensión al rompimiento de las películas de bioplástico en función de las diferentes formulaciones**



Formulación/variación	Tensión (Mpa)
Proporción almidón/glicerina (A/G) 33/67 %	0,22±0,01
Proporción almidón/glicerina (A/G) 50/50 %	0,23±0,04
Proporción almidón/glicerina (A/G) 67/33 %	0,23±0,02
Proporción almidón/urea (A/U) 33/67 %	0,37±0,03
Proporción almidón/urea (A/U) 50/50 %	0,39±0,04
Proporción almidón/urea (A/U) 67/33 %	0,44±0,02
Proporción almidón/glicerina/urea (A/G/U) 44/33/22 %	0,23±0,04
Proporción almidón/glicerina/urea (A/G/U) 44/28/28 %	0,35±0,04
Proporción almidón/glicerina/urea (A/G/U) 44/22/33 %	0,42±0,07

Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Intervalos de tolerancia y prueba de normalidad de Anderson Darling para la determinación de la tensión al rompimiento de las películas de bioplástico**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **ANOVA de un factor para la determinación de la tensión al rompimiento de las películas de bioplástico**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	8	0,32919	0,041149	21,60	0,000
Error	36	0,06859	0,001905		
Total	44	0,39778			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **ANOVA para el análisis de permeabilidad al vapor de agua, pérdida de humedad por método de Peleg y tensión**

Análisis	Variables	F	A	F_{crítica}	Hipótesis aceptada
Permeabilidad al Vapor de Agua	Tiempo	760,427	0,000E+00	1,684	Alternativa
	Formulación	28,051	6,492E-37	1,954	
	Tiempo – Formulación	4,387	2,752E-33	1,251	
Modelo de Peleg	Tiempo	103,066	1,134E-103	1,855	Nula
	Formulación	42,167	1,362E-48	1,962	
	Tiempo – Formulación	0,856	0,800	1,311	
Tensión al rompimiento	Tensión – Formulación	42,380	1,916E-18	2,152	Alternativa

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En el presente trabajo de investigación se analizó la variación de aditivos en películas de bioplástico y su efecto en las variables de degradabilidad en medio ácido, básico y por exposición a los rayos UV del Sol; desorción, permeabilidad al vapor de agua y tensión al rompimiento. Las películas se hicieron con almidón de plátano verde (*Musa balbisiana*) como materia prima principal y se realizó una variación de las proporciones de glicerina y urea como aditivos.

Se hizo una comparación entre el rendimiento de extracción de almidón a partir de la pulpa y de la cáscara del plátano verde por separado, se determinó que el mayor rendimiento corresponde a la pulpa con un 24,14 % (figura 8) y se seleccionó como materia prima para la formulación de las películas ya que la cantidad presente de almidón en una planta de plátano es mayor en la pulpa que en la cáscara según Angélica Afanador²². Se hizo un modelo experimental en función de las variables a analizar y se hicieron tres formulaciones diferentes utilizando glicerina y urea por separado y mezcladas. Para cada formulación se hicieron tres variaciones diferentes en proporciones de los aditivos.

En las figuras 9 a la 17 se comparó el efecto de la variación de los aditivos en la degradabilidad y se obtuvo una variación significativa provocada por las diferentes proporciones. Se determinó que a 30 días hay una mayor degradación en las muestras que contienen únicamente glicerina tanto en medio ácido como

²² AFANADOR, Angélica María. *El banano verde de rechazo en la producción de alcohol carburante*. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S179412372005000100005 &lng=en&tlng=es. Consulta: febrero de 2021.

en medio básico, esto se debe a que el glicerol contribuye en la formación de enlaces de hidrógeno por lo que al utilizar un electrólito fuerte, cumplió la función de catalizador en el proceso de hidrólisis y esto sumado a que la glicerina es completamente miscible en agua provocó que la pérdida de masa provocada por la ruptura de enlaces, fue mayor que en las muestras que contenían urea debido a que este compuesto aumenta la estabilidad de los bioplásticos.

Al utilizar urea y glicerina en conjunto, se obtuvo un valor intermedio ya que los enlaces de hidrógeno favorecieron más la hidrólisis que las amidas de la urea, por lo que se obtuvo una variación. En la figura 9 se observa que la degradabilidad en las películas que contenían únicamente urea como plastificante fue menor debido a que la urea es un compuesto con mayor densidad indicando que hay más enlaces que se deben romper por unidad de volumen.

Los electrolitos en solución van provocando un aumento en la porosidad por lo que el ataque del ácido o la base desde afuera hacia adentro de la estructura del polímero va provocando un desprendimiento de la matriz de las películas hasta separarlas completamente con el paso del tiempo.

En las figuras 9 – 17 se observa que las películas de bioplástico presentan una mayor velocidad de degradación o absorción de humedad durante los primeros 5 días de medición, debido a que tienen una mayor concentración de materia prima y aditivos y los medios de degradación atacan con mayor facilidad ya que tienen más componentes que van atacando y conforme pasan los días estos componentes se van reduciendo y la tasa de degradabilidad va en disminución.

Al momento de comparar la degradación por acción de los rayos del Sol se obtuvo un aumento en el peso de las muestras en un período de treinta días (figuras 9-17), las muestras se encontraban a la intemperie por lo que no se pudo determinar si existe o no una degradabilidad como tal, existe la covariable del medio ambiente que influyo en la absorción de compuestos de los alrededores por parte de las muestras de análisis; sin embargo, se observó que las muestras que contenían únicamente glicerina fueron las que presentaron un mayor aumento de peso.

Se utilizaron referencias para comparar la degradabilidad de la materia prima sin aditivos y se determinó que la aplicación de compuestos que le proporcionan propiedades al almidón tiene un efecto considerado en la degradabilidad. En el estudio presentado se determinó que al añadir glicerina al almidón y colocar en una solución microbial, se logró disminuir la degradabilidad desde 1 hora con 32 min hasta 1 hora con 7 min si solo se agregan 5 mL de glicerina y hasta 31 min si se agregan 10 mL con lo cual se demuestra la importancia de la aplicación de estos aditivos para mejorar esta propiedad. También se realizó la variación de otros aditivos como el quitosano y se determinó un comportamiento similar en cuanto a la degradabilidad de los compuestos.

En otro estudio realizado por Shafqat²³, se observó que la muestra control tenía la menor biodegradación. Al agregar plastificantes se aumenta la biodegradación ya que las muestras le aportan una mayor capacidad de absorción de agua debido a la afinidad de los aditivos y esto mejora la degradabilidad (ver anexo 2).

²³ SHAFQAT, Arifa; AL-ZAQRI, Nabil; TAHIR, Arifa; ALSALME, Ali. *Synthesis and characterization of starch based bioplastics using varying plant-based ingredients, plasticizers and natural fillers*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319562X20306707>. Consulta: junio de 2021.

A través del análisis de varianza con la prueba F de Fischer, se obtuvo una variación significativa entre las medias de los valores de degradabilidad para cada una de las formulaciones y variaciones. Con un intervalo de confianza del 95 % y un $p < 0,05$ se rechaza la hipótesis nula ya que la variación de aditivos tiene un efecto significativo en la degradabilidad de las películas de bioplástico.

Como se muestra en las figuras 18 a la 20, se realizó el estudio de la degradabilidad en medio ácido, básico y por efecto de la radiación solar en la que se evaluaron las tres formulaciones y sus variaciones en cada medio por separado, esto se hizo con el objetivo de evaluar el comportamiento de cada muestra tomando los diferentes medios como constantes y determinar si hay una variación en la degradabilidad provocada por la diferencia de proporciones.

Se determinó que hay una mayor degradación en medio ácido que en medio básico, esto puede deberse a que el ácido clorhídrico presentó una leve, pero mayor reactividad que el hidróxido de sodio, el ácido clorhídrico reacciona con los enlaces de hidrógeno y enlaces éster o las amidas presentes en el biopolímero favoreciendo la pérdida de masa con mayor rapidez que con el hidróxido de sodio.

En la figura 19 se muestra la degradabilidad en medio básico; sin embargo, existe poca información sobre la acción de las bases fuertes sobre los biopolímeros debido a que en la mayoría de los estudios se utilizan ácidos para evaluar la degradación polimérica a través de una reacción de hidrólisis ácida, en la cual el ácido utilizado (en este caso ácido clorhídrico) rompe los enlaces de hidrógeno presentes en el almidón o en los aditivos provocando una degradación de las películas.

De igual forma se observó que las muestras que tienen la proporción almidón/glicerina 67 %/33 % (figuras 18 y 19) tienen una mayor degradabilidad inicial que las demás formulaciones debido a que en proporciones más pequeñas la glicerina se degrada con más facilidad (comparado con las muestras que contenían 50 % y 67 % de glicerina) y esto permite un ataque del medio de degradación con mayor facilidad en los primeros días; conforme se pasa de 5 días esta cantidad de moléculas también van disminuyendo y por lo tanto se mantiene una velocidad de degradación más igualada al resto.

Se determinó que existe una variación significativa ($p < 0,05$) en la influencia de la variación de plastificantes y en la influencia de la variación del medio de degradación. La degradación en medio acuoso utilizando electrolitos fuertes es causada por la acción del agua en conjunto con un ácido o una base trabajando como catalizadores para acelerar el proceso de ruptura de enlaces de hidrógeno, y en los enlaces de tipo éster favoreciendo el envejecimiento del almidón provocando una disminución de la masa de las películas.

En la figura 20 se muestra el análisis de la degradación por acción de los rayos del sol, en el cual se obtuvo un comportamiento contrario al esperado ya que el peso de las muestras fue en aumento en lugar de disminuir esto se debe a que los almidones presentaron absorción de compuestos del ambiente y en esta investigación no se pudo determinar de forma cualitativa de qué compuestos se trató. Debido a que las muestras no estaban aisladas completamente de la humedad del ambiente ya que la Ciudad de Guatemala presenta valores promedio de 75 %, puede ser un factor que influya en el aumento de peso de las muestras.

Se realizó la comparación de las tendencias (figura 20) para evaluar si existe una diferencia entre las formulaciones y esta variación obtenida en el

experimento; sin embargo, se determinó que todas las formulaciones presentaron el mismo comportamiento de aumento de peso provocado por variable aleatorias que no fueron tomadas.

La radiación solar y la iluminación son factores que influyen en el proceso de degradación; sin embargo, en el experimento realizado se determinó un aumento de peso provocado por la absorción de compuestos de los alrededores (análisis que puede ser mejorado al aislar las muestras y exponer a luz UV).

En el ambiente de estudio hay una diferencia significativa en los efectos de la radiación solar e iluminación que depende de los horarios: durante el día se pueden alcanzar valores de radiación solar de 5,6 a 5,8 kWh/m², un índice UV de 11 y una emitancia luminosa de hasta 600 luxes; durante los horarios de menos radiación se pueden tener valores entre 5,0 y 5,6 kWh/m², un índice UV de 1 y una emitancia de 1 lux. Estos factores influyeron en las variaciones de peso de las muestras al no estar aisladas (ya que el objetivo consistía en evaluar si existía una degradabilidad y cuantificar dicha variable en las condiciones establecidas).

En el anexo 3 se describe un procedimiento para realizar un análisis experimental de la degradación por acción de los rayos UV aislando las muestras del entorno y obtener un dato que determine si hay una relación con las variaciones obtenidas en los medios ácido y base.

A través del análisis de varianza con la prueba F de Fischer, se obtuvo una variación significativa entre las medias de los valores de degradabilidad para cada uno de los medios evaluados. Con un intervalo de confianza del 95 % y un $p < 0,05$ se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa en la que

el medio de degradación tiene un efecto significativo en la degradabilidad de las películas de bioplástico.

Posteriormente se evaluó la permeabilidad al vapor de agua de las películas de bioplástico. Para la realización de este análisis se utilizó la norma ASTM E96/E96M-16 como referencia para la metodología experimental, en la norma se indican requerimientos como: la utilización de una cámara especializada con humedad y temperatura controladas, cloruro de calcio como desecante, cápsulas para agregar las soluciones y cubrirlas con las membranas que se están estudiando.

Debido a que el objetivo del análisis no consistía en realizar una réplica de la metodología expuesta en la norma, se realizaron modificaciones fundamentadas las investigaciones mencionadas y se aseguró que los resultados se ajustaran a una distribución normal.

Debido a restricciones de recursos, se utilizó una desecadora como cámara para el análisis de las muestras según la metodología propuesta por Othman y se tomaron los pesos respectivos en un intervalo de 30 días de análisis. Como desecante se colocó sílica gel según se menciona en la metodología utilizada por Joaqui, para analizar la permeabilidad al vapor de agua en películas elaboradas a base de almidón de yuca y se colocó un higrómetro en la desecadora para monitorear que la humedad del sistema se mantuviera constante. La norma ASTM E96/E96M – 16 indica que se puede utilizar sílica gel como desecante mientras la humedad ganada no sea mayor al 4 %, por lo que con el higrómetro se estuvo monitoreando la variación dando como resultado un aumento máximo de 68 % de humedad con respecto al 64 % en la medición inicial del experimento, ver apéndice 3.

Por la cantidad de muestras a analizar y la disponibilidad de recipientes, se utilizaron beakers utilizados por Vicentini en lugar de cápsulas como se indica en la norma ASTM E96/E96M-16.

Como se observa en la figura 21, las películas que fueron formuladas únicamente con glicerina presentaron una mayor permeabilidad al vapor de agua debido a que el glicerol es un plastificante con una alta capacidad de interacción con las moléculas de agua y es completamente miscible, esto facilita la permeación de agua a través de las membranas.

La adición de urea disminuyó la permeabilidad al vapor de agua (ver figura 21), esto se debe a que la urea es un compuesto que mejora la cristalinidad de las películas, previene la retrogradación por más tiempo que otros plastificantes y aumenta la estabilidad de los polímeros, además que se trata de un compuesto menos soluble y que puede tener menor capacidad de interacción con el agua al momento de compararlo con la glicerina, esto provoca una mayor estabilidad y ordenamiento en el bioplástico, mejorando su permeabilidad.

Al momento de mezclar la urea y la glicerina se tuvo una disminución más marcada en la permeabilidad al vapor de agua que utilizando únicamente glicerina o urea, esto se debe a que al utilizar ambos plastificantes se obtenga un mejor ordenamiento de la estructura de las películas, la glicerina aporta elasticidad y la urea aporta mayor cristalinidad en la estructura y una mejora en la retrogradación. La urea y la glicerina estabilizan las capas cristalinas líquidas a baja humedad relativa (hasta 75 % de humedad a 27°C) comparable con las humedades iniciales obtenidas al momento de realizar el análisis de pérdida de humedad, las cuales se encontraron entre un 9 y un 14 %.

Los polisacáridos como los almidones contienen grupos polares hidrofílicos que interactúan con las moléculas de agua, esto provoca variaciones en la constante de permeabilidad. La interacción con los plastificantes como la glicerina provocan un aumento en la humedad de las muestras por lo que aumenta la permeabilidad al vapor de agua por la variación en la presión de vapor a través de la película lo cual resulta en la permeación. La actividad del agua juega un factor importante en la transferencia de masa desde la alta presión de vapor hacia los alrededores de baja presión.

La permeabilidad al vapor de agua es proporcionalmente constante y se supone que es independiente del gradiente de vapor de agua a través de la película, por lo que para todas las formulaciones y sus variaciones tuvieron el comportamiento esperado. Conforme aumenta el tiempo de exposición de las muestras, la porosidad de las películas va aumentando por lo que el flujo de vapor de agua también lo hace, esto provoca un aumento en la permeabilidad al vapor de agua y esta propiedad puede ser reforzada con plastificantes que aumenten la fuerza entre las moléculas.

A través del análisis de varianza con la prueba F de Fischer, se obtuvo una variación significativa entre las medias de los valores de permeabilidad al vapor de agua. Con un intervalo de confianza del 95 % y un $p < 0,05$ se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa en la que el medio de degradación tiene un efecto significativo en la permeabilidad de las películas de bioplástico.

Posteriormente se analizó la pérdida de humedad utilizando el modelo de Peleg aplicado para desorción (figura 22) en el que no se obtuvo un orden de mayor a menor por formulación en cuanto a la desorción de agua de las películas, esto puede deberse a que esta propiedad no depende directamente del tipo de

enlace que se puede formar entre el glicerol, la urea y el almidón. Los resultados mayor y menor para la determinación de pérdida de humedad fueron 0,50 % para la formulación almidón/glicerina/urea 44/33/22 % y 0,31 % para la formulación almidón/glicerina/urea 44/22/33 % y se observa que los extremos no tienen diferencias considerables entre sí.

La humedad es transferida al aire por medio de convección y luego absorbida por la sílica gel presente en la desecadora y esta tasa no tuvo una diferencia por el tipo de formulación o variación, es decir, que el más influyente en este proceso de secado es la transferencia de masa hacia el ambiente provocada en mayor proporción por el aire.

La constante de ratio de Peleg “k1” y la constante capacidad de Peleg “k2” son variables que dependen de la temperatura y la humedad del sistema, a menor valor de “k1” se tiene una mayor velocidad inicial de sorción y, mientras más bajo es el valor de “k2” más alta es la capacidad de absorción de agua, este resultado indica que la tasa de sorción y capacidad de sorción son variables que aumentan junto a la humedad relativa por lo que almacenan más agua cuando se mantiene un entorno de alta humedad o pierden más agua cuando el ambiente tiene una menor humedad relativa, esto se debe a la concentración de moléculas en el aire, lo que resulta de una alta o baja energía cinética que mejora las propiedades de absorción o desorción del agua.

El experimento se realizó a una temperatura y humedad constante; pero, estas dos variables tienen una influencia directa en la evaluación de la absorción o desorción. Al realizar un aislamiento de las muestras y hacer variaciones de temperatura y humedad en el ambiente es posible apreciar mejor las variaciones en la pérdida de humedad evaluada en este experimento.

A través del análisis de varianza con la prueba F de Fischer, se obtuvo que no existe una variación significativa entre las medias de los valores de desorción evaluados. Con un intervalo de confianza del 95 % y un $p > 0,05$ se acepta la hipótesis nula en la que la variación de aditivos no tiene un efecto significativo en la propiedad de desorción de las películas de bioplástico.

Por último, determinó la tensión al rompimiento de las películas de bioplástico, en la cual se obtuvo que las muestras que contenían urea registraron una mayor tensión al rompimiento con 0,44 Mpa como máxima tensión registrada (figura 23) en comparación con las que contenían glicerina. En las mezclas de glicerina con urea se obtuvo que conforme aumentaba la proporción de urea, aumenta la resistencia de estas. Esto se debe a que la urea posee una mayor densidad que la glicerina lo cual nos indicaría que proporciona una mayor masa por unidad de volumen, además de una mayor cantidad de enlaces que romper por unidad de masa.

Al comparar la carga de ruptura de las muestras obtenidas con las presentadas por Navia, en la cual elaboró los bioplásticos con fibra de dique y realizó un proceso de compresión, se obtuvo que las muestras de la presente investigación son menores (1,8 Mpa para las muestras de la comparación y 0,44 Mpa para la mayor tensión registrada en este documento), por lo cual, se puede observar que relativamente son muestras que no tienen una resistencia considerable.

De la misma forma, si los análisis se comparan con las cargas que soportan materiales como el polietileno de baja densidad para películas de 0,001 mm posee una resistencia a la rotura de 23,58 Mpa (ASTM, 2018), se puede observar que es muy poca resistencia relativamente para poder sustituir películas del material mencionado, por lo que sería necesario utilizar otro tipo de aditivos que

proporcionen mayor resistencia a la rotura y así poder cumplir con las propiedades de polímeros utilizados para la elaboración de películas en el área de empaques flexibles para alimentos, por mencionar una aplicación.

Como información complementaria, en la prueba de análisis de tensión al rompimiento se determinó el porcentaje de elongación de las muestras para cada formulación, se obtuvo la mayor elongación en la muestra de proporción almidón/glicerina 33/67 % con un 546 % y la menor elongación en la muestra con proporción almidón/urea 67/33 % con un 198 %. Estos datos se pueden verificar en el apéndice 7.

A través del análisis de varianza con la prueba F de Fischer, se obtuvo que existe una variación significativa entre las medias de los valores de tensión al rompimiento para cada una de las formulaciones y variaciones evaluadas. Con un intervalo de confianza del 95 % y un $p < 0,05$ se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa en la que la variación de aditivos tiene un efecto significativo en la tensión al rompimiento de las películas de bioplástico.

CONCLUSIONES

1. Se obtuvo mayor rendimiento de extracción de almidón para la pulpa (24,14 %) que para la cáscara (16,74 %) del plátano verde.
2. La degradabilidad de las formulaciones fue mayor en medio ácido que en medio básico con valores de 51,76 %, 37,99 % respectivamente en comparación con las formulaciones expuestas a la radiación solar que presentaron aumento de masa en lugar de degradación, con una absorción máxima de 25,98 %.
3. La degradabilidad en medio ácido y medio básico fue mayor para las muestras que contenían únicamente glicerina con 51,76 % en medio ácido para la formulación almidón/glicerina 67/33 % y 37,99 % en medio básico para la formulación almidón/glicerina 33/67 % como valores máximos de degradabilidad.
4. No se determinó que las muestras de películas de bioplástico se degradaran por efecto de la radiación UV del Sol y se tuvo un efecto de aumento del peso de las muestras (lo cual fue incongruente al resultado esperado) y las muestras que contenían únicamente glicerina presentaron un mayor aumento con un máximo de 25,98 % para la formulación de almidón/glicerina 33/67 %.

5. En el análisis de permeabilidad al vapor de agua mediante la norma ASTM E96/E96M-16 que se usó como referencia para la metodología experimental, las muestras que contenían la mezcla de glicerina y urea presentaron una menor permeabilidad al vapor de agua con $4,30\text{E-}07 \text{ g/Pa}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^2$ para la formulación almidón/glicerina/urea 44/33/22 % y las muestras que contenían únicamente glicerina presentaron la mayor permeabilidad con $7,60\text{E-}07 \text{ g/Pa}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^2$ para la formulación almidón/glicerina 50/50 %.
6. El mayor porcentaje de pérdida de humedad al equilibrio corresponde a la formulación almidón/glicerina/urea 44/33/22 % con 0,50 % y la menor corresponde a la formulación almidón/glicerina/urea 44/22/33 % con 0,31 %.
7. Las películas de bioplástico elaboradas únicamente con urea y la mezcla de urea con glicerina presentan una mayor tensión aplicada para lograr el rompimiento de las películas con valores máximos de tensión de 0,44 Mpa para la formulación almidón/urea 60/30 % y 0,43 Mpa para la formulación almidón/glicerina/urea 44/22/33 %.
8. Se rechaza la hipótesis nula para el análisis de degradabilidad en medio ácido y se acepta la hipótesis alternativa que indica que la variación de aditivos tiene un efecto significativo en la degradabilidad con un máximo de 51,76 % para la formulación almidón/glicerina 67/33 %.
9. Con un $F > F_c$ y $p < 0,05$, se rechaza la hipótesis nula para el análisis de degradabilidad en medio básico y se acepta la hipótesis alternativa que indica que la variación de aditivos tiene un efecto significativo en la

degradabilidad con un máximo de 37,99 % para la formulación almidón/glicerina 33/67 % para una confiabilidad del 95 %.

10. No se pudo comprobar que exista una variación significativa en el análisis de degradabilidad por efecto de la radiación solar ya que las muestras presentaron un aumento de peso, el cual no indica si se tuvo una degradación de los compuestos como indican las referencias.
11. Con un $F > F_c$ y $p < 0,05$, se rechaza la hipótesis nula para el análisis de permeabilidad al vapor de agua y se acepta la hipótesis alternativa indicando que la variación de aditivos tiene un efecto significativo en la permeabilidad al vapor de agua con una permeabilidad menor de $1,194E-07 \text{ g/Pa}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^2$ para la formulación almidón/glicerina/urea 44/33/22 % para una confiabilidad del 95 %.
12. Con un $F > F_c$ y $p < 0,05$, se rechaza la hipótesis nula para el análisis de tensión al rompimiento y se acepta la hipótesis alternativa indicando que la variación de aditivos tiene un efecto significativo en la tensión, con un valor mayor de tensión de 0,44 Mpa para la formulación almidón/urea 67/33 % para una confiabilidad del 95 %.
13. Con un $F < F_c$ y $p > 0,05$, Se acepta la hipótesis nula, la cual indica que no existe diferencia significativa en la propiedad de desorción al realizar una variación de proporciones de aditivos y de almidón en las películas de bioplástico para una confiabilidad del 95 %.

RECOMENDACIONES

1. Evaluar la variación de temperatura en el proceso de extracción de almidón para poder comparar los rendimientos de extracción y poder mejorar este proceso.
2. Realizar una comparación en la degradabilidad de las películas de bioplástico variando la concentración de los electrolitos fuertes y para el análisis de degradación por efecto de la radiación solar evaluar la influencia de la humedad del ambiente para establecer una relación con el aumento de peso.
3. Evaluar la variación del espesor de las películas, la influencia de la temperatura y humedad del sistema en la permeabilidad al vapor de agua y la pérdida de humedad para establecer diferentes escenarios para posibles usos de los bioplásticos a partir del almidón y la variación de los plastificantes, además de la porosidad de las películas ya que puede ser un factor que influye en el aumento de la permeabilidad.
4. Evaluar la variación de la permeabilidad al vapor de agua entre el método utilizado de acuerdo con la disponibilidad de recursos para esta investigación y una réplica de la norma ASTM E96/E96M-16.
5. Aplicar la evaluación de la elongación, densidad y energía de rompimiento de las películas de bioplásticos para profundizar más en las propiedades mecánicas de las películas.

6. Estudiar el efecto de la aplicación de otros plastificantes en las propiedades de las películas de bioplásticos tales como la celulosa, el papel (el cual contiene celulosa), alcoholes, aceites vegetales para proponer estrategias para el uso de los residuos.
7. Evaluar el efecto de la degradación de las películas de bioplástico por acción de los rayos UV, dentro de recipiente de vidrio transparente con sílica y sellado para aislar las muestras de los factores que no fueron tomados en cuenta en este trabajo (ver anexo 3).
8. Realizar el experimento de degradación por efecto de la radiación solar y evaluar de forma cualitativa y cuantitativa la influencia de los alrededores para determinar si existe una degradabilidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. AFANADOR, Angélica María. *El banano verde de rechazo en la producción de alcohol carburante*. [en línea]. <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372005000100005&lng=en&tlng=es>. [Consulta: febrero de 2021].
2. AFP. *Guatemala busca un respiro ante el sofoco de las bolsas plásticas*. [en línea]. <<https://www.soy502.com/articulo/guatemala-busca-respiro-ante-sofoco-bolsas-plasticas-50172>>. [Consulta: mayo de 2020].
3. ARBOLEDA, Jorge. *Polímeros naturales y su aplicación como ayudantes de floculación*. Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. [en línea]. <<https://www.ircwash.org/sites/default/files/253-75PO.pdf>>. [Consulta: 18 de agosto de 2019].
4. ASTM Internacional. *Standad Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials. ASTM Book of Standards, E96/E96M – 16*. West Conshohocken, Philadelphia, USA. [en línea]. <[http://43,252.73,26/files/sistem_mutu/ASTM %20E96-E96M-16 %20- %20Test %20Method %20of %20WVTR.pdf](http://43,252.73,26/files/sistem_mutu/ASTM%20E96-E96M-16%20-%20Test%20Method%20of%20WVTR.pdf)>. [Consulta: abril de 2021].

5. BOLIO-LÓPEZ, Gloria Ivette. *El intemperismo y la biodegradación de material compuesto de ácido poliláctico reforzado con whiskers de celulosa*. [en línea]. <<http://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v12n1/v12n1a14.pdf>>. [Consulta: agosto de 2019].
6. CONTRERAS, Roxana; TORRES, Lazaro; GONZÁLEZ, Nicolas; JÍMENEZ, Roman. *Caracterización funcional de almidones de plátano cuadrado (Musa balbisiana Colla*. [en línea]. <<https://doi.org/10,19044/esj.2018.v14n30p82>>. [Consulta: 22 de agosto del 2019].
7. COSTAS, Biliaderis. *The structure and interactions of starch with food constituents*. [en línea]. <<https://doi.org/10,1139/y91-011>>. [Consulta 18 de agosto de 2019].
8. DE LA TORRE, Lazaro; TORRUCO, Juan; Castellanos, Arturo; CHEL, Luis; Betancour, David. *Isolation and structure investigations of square banana (Musa balbisiana) starch*. [en línea]. <<https://doi.org/10,1002/star.200700607>>. [Consulta: agosto de 2019].
9. DeGuate. *Producción de Plátano en Guatemala*. [en línea]. <<https://www.deguate.com/artman/publish/produccion-guatemala/produccion-de-platano-en-guatemala.shtml>>. [Consulta: 15 de agosto del 2019].

10. Dirección General de Energía. *Energía Solar en Guatemala. Obtenido de Ministerio de Energía y Minas, Dirección General de Energía.* [en línea]. <<https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2018/07/Energ%C3%ADa-Solar-en-Guatemala.pdf>>. [Consulta: 20 de agosto de 2019].
11. GARCÍA BARRERA, Alma Verónica. *Obtención de un polímero biodegradable a partir de almidón de maíz.* [en línea]. <<http://www.redicces.org.sv/jspui/handle/10972/2436>>. [Consulta: agosto de 2020].
12. HERNÁNDEZ MEDINA, Marilyn. *Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México.* [en línea]. <<https://www.scielo.br/j/cta/a/BFmq3pZQMP33pwHsyNJk9Yf/?format=pdf&lang=es>>. [Consulta: junio de 2020].
13. HIDALGO APAZA, Angie Arlette. *Bioplásticos obtenidos a partir del almidón de la cascara de plátano (Musa paradisiaca); una nueva y ecológica alternativa a los plátanos convencionales.* [en línea]. <https://prezi.com/nutoyi_r8tdr/investigadores/>. [Consulta: mayo de 2020].
14. INSIVUMEH. *Índice Ultravioleta, pronóstico para la República de Guatemala. Actualizado por Ixcamparij López, C. Obtenido de INSIVUMEH.* [en línea]. <<https://insivumeh.gob.gt/meteorologia/indice-ultravioleta/>>. [Consulta: 19 de agosto del 2019].

15. LARA GONZÁLEZ, Luis Ángel. *Efecto de la degradación por inmersión en ácido nítrico sobre las propiedades de un poliéster reforzado con fibras de vidrio.* [en línea]. <https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/articloe/view/918/918;>. [Consulta: agosto de 2019].
16. MARTÍN SÁNCHEZ, Manuela. *Reactivo de Lugol: Historia de su descubrimiento y aplicaciones didácticas.* [en línea]. <<http://www.scielo.org.mx/pdf/eq/v24n1/v24n1a6.pdf>>. [Consulta: junio de 2020].
17. MERÉ MARCOS, Javier. *Estudio del procesado de un polímero termoplástico basado en almidón de patata amigable con el medio ambiente.* [en línea]. <https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10823/PFC_Javier_Mere_Marcos.pdf;jsessionid=8FF9E3AA934C55C3929E89FFD9B508CB?sequence=1>. [Consulta: junio de 2020].
18. MONTGOMERY, Douglas. *Diseño y análisis de experimentos.* 2a ed. México: LIMUSA, 2005. 686 p.
19. NAVIA-PORRAS, Diana Paola. *Evaluación de propiedades físicas de bioplásticos termo-comprimidos elaborados con harina de yuca.* [en línea]. <<http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v12n2/v12n2a05.pdf>>. [Consulta: agosto de 2019].

20. OTHMAN, Siti Hajar. *Water sorption and water permeability properties of edible film made from potato peel waste*. [en línea]. <https://www.researchgate.net/publication/314653435_Water_sorption_and_water_permeability_properties_of_edible_film_made_from_potato_peel_waste>. [Consulta: agosto de 2019].
21. Portal Innova. *Limpiando con luz ultravioleta para erradicar covid 19*. [en línea]. <<https://portalinnova.cl/limpiando-con-luz-ultravioleta-para-erradicar-coronavirus-covid-19/>>. [Consulta: abril de 2021].
22. RUIZ, Gladys. Obtención y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca. *Ingeniería y Ciencia*. [en línea] <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=83520401>>. [Consulta: 18 de agosto de 2019].
23. SHAFQAT Arifa; AL-ZAQRI nabil; TAHIR Arifa; ALSALME Ali. *Synthesis and characterization of starch*. [en línea]. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319562X20306707>>. [Consulta: abril de 2021].
24. SPIEGEL, Murray. *Teoría y problemas de probabilidad y estadística*. Colombia: McGraw-Hill, 1976. 465 p.
25. VACLAVIK, Vickie. *Fundamentos de Ciencia de los Alimentos*. [en línea]. <https://www.editorialacribia.com/libro/fundamentos-de-ciencia-de-los-alimentos_54069/>. [Consulta: 18 de agosto de 2019].

APÉNDICES

Apéndice 1. Rendimiento de extracción de almidón

Fuente de almidón	Tratamiento	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Rendimiento (%)	Rendimiento Promedio (%)
Cáscara de plátano	1	250,01	41,74	16,70	16,74±0,96
	2	249,99	42,25	16,90	
	3	250,00	45,26	18,10	
	4	250,01	37,76	15,10	
	5	250,00	42,21	16,88	
Pulpa de plátano	1	250,00	59,71	23,88	24,15±2,10
	2	249,99	64,21	25,68	
	3	249,99	52,10	20,84	
	4	250,00	58,42	23,37	
	5	250,01	67,45	26,98	
T secado de pasta (°C)				60	
T secado de polvos (°C)				70	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Toma de datos para ensayo de degradabilidad

Pérdida de peso en HCl al 3 % - proporción almidón/glicerina 33/67 %						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	
0	10,05	10,0 7	10,0 7	10,05	10,07	
1	9,86	9,87	9,89	9,86	9,87	
2	9,67	9,68	9,70	9,67	9,68	
3	9,48	9,49	9,52	9,48	9,49	
4	9,46	9,47	9,48	9,46	9,47	
5	9,29	9,32	9,38	9,29	9,32	
10	7,41	7,35	7,29	7,41	7,35	
15	7,08	6,98	6,91	7,08	6,98	
20	6,78	6,68	6,62	6,78	6,68	
25	6,58	6,60	6,25	6,58	6,60	
30	10,05	10,0 7	10,0 7	10,05	10,07	
Degradabilidad en HCl al 3 % - proporción almidón/glicerina 33/67 %						
Día	D ₁ (%)	D ₂ (%)	D ₃ (%)	D ₄ (%)	D ₅ (%)	Promedio (%)
1	1,89	1,97	1,84	1,74	1,80	1,85±0,08
2	3,83	3,80	3,72	3,42	3,51	3,66±0,16
3	5,67	5,77	5,47	4,59	5,03	5,31±0,44
4	5,96	5,91	5,90	5,22	5,40	5,68±0,31
5	7,64	7,40	6,83	6,67	6,83	7,07±0,38
10	26,27	27,0 0	27,6 5	25,7 0	25,5 6	26,44±0,79
15	29,58	30,6 4	31,4 0	28,9 5	28,9 1	29,89±0,98
20	32,61	33,6 2	34,2 4	31,5 6	31,6 2	32,73±1,07
25	34,58	34,4 3	37,9 0	33,3 2	32,8 6	34,62±1,76
30	48,76	50,9 8	50,0 4	46,7 7	47,4 2	48,80±1,57

Continuación del apéndice 2.

Pérdida de peso en HCl al 3 % - proporción almidón/glicerina 50/50 %						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	
0	10,15	10,00	9,91	10,11	10,34	
1	9,75	9,62	9,69	10,00	10,09	
2	9,15	9,61	9,26	9,18	9,68	
3	9,03	9,21	7,95	8,55	9,17	
4	8,51	9,06	7,43	7,81	8,72	
5	8,28	8,53	7,06	7,30	8,20	
10	7,57	7,67	6,23	6,47	7,35	
15	7,15	7,26	5,77	5,93	6,88	
20	7,02	7,13	5,60	5,75	6,72	
25	6,90	6,98	5,19	5,61	6,58	
30	5,94	5,99	4,07	4,43	5,49	
Degradabilidad en HCl al 3 % - proporción almidón/glicerina 50/50 %						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	Promedio (%)
1	3,97	3,88	2,13	1,08	2,40	2,69±1,10
2	9,88	3,90	6,55	9,18	6,37	7,18±2,15
3	11,08	7,89	19,79	15,37	11,33	13,09±4,11
4	16,23	9,39	24,98	22,76	15,67	17,81±5,55
5	18,51	14,71	28,74	27,77	20,69	22,08±5,40
10	25,50	23,37	37,11	36,01	28,91	30,18±5,51
15	29,62	27,38	41,77	41,32	33,45	34,71±5,91
20	30,87	28,75	43,45	43,10	34,98	36,23±6,09
25	32,02	30,27	47,59	44,48	36,39	38,15±6,81
30	41,46	40,16	58,94	56,14	46,87	48,71±7,60

Continuación del apéndice 2.

Pérdida de peso en HCl al 3 % - proporción almidón/glicerina 67/33 %						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	
0	9,84	9,94	10,10	10,06	10,28	
1	8,50	8,62	9,07	8,80	8,99	
2	8,18	8,22	8,72	8,39	8,58	
3	8,03	8,05	8,56	8,19	8,40	
4	7,80	7,90	8,45	7,64	8,05	
5	7,78	7,74	8,25	7,48	7,89	
10	7,10	7,28	7,80	6,83	7,33	
15	6,16	6,09	6,81	5,05	5,85	
20	6,00	5,84	6,68	4,88	5,63	
25	5,63	5,45	6,40	4,57	5,29	
30	4,99	4,82	5,87	3,90	4,64	
Degradabilidad en HCl al 3 % - proporción almidón/glicerina 67/33 %						
Día	D ₁ (%)	D ₂ (%)	D ₃ (%)	D ₄ (%)	D ₅ (%)	Promedio (%)
1	13,54	13,27	10,23	12,47	12,52	12,41±1,17
2	16,84	17,31	13,70	16,58	16,48	16,18±1,27
3	18,31	19,03	15,26	18,61	18,31	17,91±1,35
4	20,67	20,56	16,36	24,04	21,71	20,67±2,49
5	20,91	22,15	18,35	25,65	23,27	22,07±2,43
10	27,77	26,81	22,73	32,06	28,66	27,60±3,01
15	37,38	38,72	32,60	49,76	43,08	40,31±5,79
20	38,97	41,30	33,90	51,53	45,20	42,18±5,93
25	42,72	45,15	36,59	54,60	48,56	45,52±5,99
30	49,22	51,50	41,90	61,26	54,89	51,76±6,38

Continuación del apéndice 2.

Pérdida de peso en HCl al 3 % - proporción almidón/urea 33/67 %						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	
0	10,02	10,02	10,06	10,00	10,35	
1	10,01	9,89	9,90	9,87	10,22	
2	9,59	9,77	9,71	9,69	10,07	
3	9,42	9,59	9,59	9,58	9,92	
4	9,04	9,19	9,44	9,39	9,63	
5	8,54	8,71	8,89	8,86	9,12	
10	7,60	7,87	7,87	7,87	8,21	
15	7,11	7,64	7,68	7,35	7,83	
20	6,32	7,48	7,54	7,05	7,60	
25	6,13	7,34	7,37	6,84	7,43	
30	4,72	6,23	6,08	5,59	6,25	
Degradabilidad en HCl al 3 % - proporción almidón/urea 33/67 %						
Día	D ₁ (%)	D ₂ (%)	D ₃ (%)	D ₄ (%)	D ₅ (%)	Promedio (%)
1	0,18	1,34	1,55	1,32	1,29	1,13±0,49
2	4,38	2,49	3,47	3,13	2,71	3,24±0,66
3	5,99	4,31	4,63	4,28	4,15	4,67±0,68
4	9,78	8,31	6,18	6,17	7,00	7,49±1,39
5	14,78	13,09	11,59	11,46	11,87	12,56±1,25
10	24,21	21,45	21,80	21,30	20,67	21,89±1,22
15	29,09	23,78	23,62	26,54	24,33	25,47±2,09
20	36,94	25,40	25,06	29,52	26,56	28,69±4,41
25	38,88	26,80	26,79	31,65	28,27	30,48±4,56
30	52,93	37,85	39,60	44,12	39,64	42,83±5,46

Continuación del apéndice 2.

Pérdida de peso en HCl al 3 % - proporción almidón/urea 50/50 %						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	
0	10,05	10,04	10,01	10,09	10,34	
1	9,93	9,82	9,81	9,06	9,71	
2	9,80	9,69	9,65	8,87	9,55	
3	9,64	9,52	9,47	8,63	9,35	
4	9,31	9,20	9,05	8,01	8,88	
5	8,92	8,86	8,68	7,60	8,51	
10	7,94	7,84	7,83	6,39	7,39	
15	7,84	7,72	7,68	6,22	7,24	
20	7,71	7,61	7,42	5,99	7,07	
25	7,58	7,48	7,28	5,81	6,92	
30	6,99	6,87	7,62	5,62	6,52	
Degradabilidad en HCl al 3 % - proporción almidón/urea 50/50 %						
Día	D ₁ (%)	D ₂ (%)	D ₃ (%)	D ₄ (%)	D ₅ (%)	Promedio (%)
1	1,19	2,14	2,03	10,27	6,05	4,34±3,41
2	2,50	3,45	3,62	12,17	7,61	5,87±3,61
3	4,14	5,21	5,43	14,46	9,58	7,76±3,83
4	7,41	8,32	9,62	20,62	14,10	12,01±4,88
5	11,23	11,77	13,27	24,67	17,75	15,74±5,02
10	21,05	21,95	21,80	36,69	28,56	26,01±5,99
15	21,98	23,08	23,29	38,41	29,95	27,34±6,21
20	23,31	24,19	25,91	40,67	31,59	29,14±6,45
25	24,59	25,49	27,29	42,44	33,08	30,58±6,62
30	30,50	31,59	23,84	44,36	36,98	33,45±6,87

Continuación del apéndice 2.

Pérdida de peso en HCl al 3 % - proporción almidón/urea 67/33 %						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	
0	10,06	10,02	10,07	10,01	10,38	
1	9,83	9,75	9,91	9,80	10,14	
2	9,40	9,37	9,47	9,52	9,81	
3	9,27	8,90	9,26	9,04	9,33	
4	8,85	8,77	9,24	8,89	9,20	
5	8,55	8,40	9,07	8,54	8,84	
10	7,01	7,03	8,14	7,03	7,40	
15	6,71	6,63	7,97	6,63	6,99	
20	6,48	6,40	7,84	6,32	6,72	
25	5,66	5,49	7,22	5,36	5,79	
30	6,34	5,03	6,96	4,15	4,96	
Degradabilidad en HCl al 3 % - proporción almidón/urea 67/33 %						
Día	D ₁ (%)	D ₂ (%)	D ₃ (%)	D ₄ (%)	D ₅ (%)	Promedio (%)
1	2,36	2,70	1,64	2,03	2,28	2,20±2,21
2	6,64	6,49	5,96	4,84	5,46	5,88±2,28
3	7,93	11,21	8,06	9,64	10,06	9,38±2,27
4	12,06	12,51	8,30	11,12	11,40	11,08±2,37
5	15,02	16,14	9,98	14,63	14,84	14,12±1,70
10	30,38	29,85	19,23	29,73	28,74	27,58±2,33
15	33,31	33,80	20,87	33,80	32,61	30,88±2,01
20	35,60	36,15	22,14	36,84	35,21	33,19±2,01
25	43,80	45,21	28,30	46,42	44,20	41,59±2,19
30	46,98	49,76	30,88	58,50	52,22	45,67±2,80

Continuación del apéndice 2.

Pérdida de peso en HCl al 3 % - proporción almidón/glicerina/urea 44/33/22 %						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	
0	10,05	10,04	10,01	9,82	10,34	
1	9,86	9,82	9,19	9,69	10,16	
2	9,50	9,55	9,11	9,58	9,98	
3	9,41	9,29	9,07	9,50	9,81	
4	9,07	9,01	8,90	9,37	9,60	
5	8,67	8,74	8,78	9,25	9,40	
10	8,03	8,13	8,11	8,62	8,78	
15	5,52	6,12	7,38	7,90	7,42	
20	5,12	5,58	7,21	7,77	7,09	
25	4,52	5,28	7,16	7,68	6,89	
30	3,74	3,974±	6,65	7,13	5,96	
Degradabilidad en HCl al 3 % - proporción almidón/glicerina/urea 44/33/22 %						
Dí a	D ₁ (%)	D ₂ (%)	D ₃ (%)	D ₄ (%)	D ₅ (%)	Promedio (%)
1	1,92	2,19	8,11	1,34	1,70	3,05±2,54
2	5,50	4,83	8,91	2,40	3,49	5,03±2,22
3	6,43	7,43	9,37	3,25	5,15	6,33±2,06
4	9,77	10,30	11,03	4,55	7,16	8,56±2,39
5	13,74	12,97	12,26	5,80	9,05	10,77±2,95
10	20,08	19,04	18,95	12,27	15,07	17,08±2,95
15	45,06	39,03	26,23	19,58	28,25	31,63±9,17
20	49,03	44,38	27,98	20,85	31,45	34,74±10,46
25	55,01	47,44	28,48	21,83	33,40	37,23±12,24
30	62,81	60,41	33,49	27,42	42,36	45,30±14,16

Continuación del apéndice 2.

Pérdida de peso en HCl al 3 % - proporción almidón/glicerina/urea 44/28/28 %						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	
0	10,06	10,02	10,03	10,01	10,35	
1	9,88	9,83	9,86	9,84	10,18	
2	9,65	9,65	9,66	9,72	10,03	
3	9,25	9,53	9,37	9,44	9,83	
4	8,97	9,40	9,18	8,33	9,20	
5	8,72	9,23	8,97	8,02	8,97	
10	7,38	8,15	7,14	7,59	8,21	
15	7,21	7,96	6,82	7,38	8,01	
20	7,80	7,25	6,14	7,16	7,55	
25	6,45	7,00	5,87	6,51	7,09	
30	5,08	6,18	4,89	5,76	6,31	
Degradabilidad en HCl al 3 % - proporción almidón/glicerina/urea 44/28/28 %						
Dí a	D ₁ (%)	D ₂ (%)	D ₃ (%)	D ₄ (%)	D ₅ (%)	Promedio (%)
1	1,74	1,82	1,68	1,71	1,71	1,73±0,05
2	4,01	3,65	3,68	2,85	3,14	3,46±0,41
3	7,99	4,81	6,53	5,70	5,08	6,02±1,15
4	10,80	6,15	8,40	16,77	11,08	10,64±3,55
5	13,28	7,84	10,50	19,86	13,39	12,97±4,00
10	26,63	18,67	28,80	24,20	20,73	23,81±3,71
15	28,30	20,48	31,93	26,30	22,62	25,93±4,06
20	28,46	27,60	38,80	28,41	27,08	28,87±5,38
25	35,87	30,15	41,49	34,95	31,47	34,78±3,96
30	49,50	38,25	51,23	42,47	39,03	44,10±5,34

Continuación del apéndice 2.

Pérdida de peso en HCl al 3 % - proporción almidón/glicerina/urea 44/22/33 %						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	
0	10,18	9,91	9,850±	10,03	10,32	
1	9,85	9,73	9,70	9,27	9,86	
2	9,68	9,59	9,56	9,10	9,70	
3	9,30	9,22	9,18	8,72	9,33	
4	8,98	8,96	8,92	8,43	9,05	
5	8,55	8,65	8,25	8,24	8,80	
10	7,69	7,88	7,92	7,45	8,02	
15	7,56	7,77	7,25	7,33	7,90	
20	7,40	7,65	7,15	7,21	7,79	
25	7,16	7,53	7,02	7,10	7,67	
30	6,06	6,57	5,90	5,99	6,64	
Degradabilidad en HCl al 3 % - proporción almidón/glicerina/urea 44/22/33 %						
Día	D ₁ (%)	D ₂ (%)	D ₃ (%)	D ₄ (%)	D ₅ (%)	Promedio (%)
1	3,24	1,80	1,50	7,57	4,54	3,73±0,35
2	4,86	3,18	3,00	9,23	6,01	5,25±0,67
3	8,60	6,98	6,85	13,05	9,68	9,03±1,24
4	11,75	9,61	9,43	15,96	12,36	11,82±1,47
5	16,04	12,72	16,22	17,79	14,74	15,50±2,14
10	24,47	20,44	19,56	25,71	22,29	22,50±4,21
15	25,71	21,60	26,43	26,94	23,45	24,83±5,02
20	27,31	22,81	27,39	28,06	24,57	26,03±5,55
25	29,62	24,04	28,75	29,20	25,72	27,47±6,70
30	40,46	33,69	40,08	40,28	35,73	38,05±10,19

Continuación del apéndice 2.

Pérdida de peso en NaOH al 3 % - proporción almidón/glicerina 33/67 %						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	
0	10,03	10,05	10,07	10,01	10,36	
1	9,86	9,89	9,93	9,83	9,89	
2	9,69	9,73	9,79	9,66	9,86	
3	9,60	9,58	9,65	9,48	9,85	
4	9,52	9,57	9,63	9,45	9,83	
5	9,41	9,43	9,53	9,32	9,70	
10	7,94	7,85	8,24	7,84	8,17	
15	7,57	7,56	8,01	7,58	7,90	
20	7,44	7,32	7,79	7,35	7,66	
25	7,44	6,52	7,03	6,63	6,90	
30	6,22	5,99	6,59	6,14	6,39	
Degradabilidad en NaOH al 3 % - proporción almidón/glicerina 33/67 %						
Dí a	D ₁ (%)	D ₂ (%)	D ₃ (%)	D ₄ (%)	D ₅ (%)	Promedio (%)
1	1,68	1,59	1,41	1,80	1,64	1,62±0,13
2	3,39	3,18	2,76	3,56	3,26	3,23±0,27
3	4,26	4,75	4,15	5,35	4,89	4,68±0,44
4	5,07	4,82	4,38	5,65	5,07	5,00±0,41
5	6,16	6,21	5,31	6,92	6,36	6,19±0,52
10	20,85	21,95	18,13	21,75	21,17	20,77±1,38
15	24,57	24,77	20,48	24,36	23,79	23,59±1,59
20	25,84	27,19	22,64	26,56	26,04	25,65±1,58
25	25,80	35,14	30,23	33,83	33,41	31,68±3,36
30	37,95	40,44	34,52	38,72	38,34	37,99±1,93

Continuación del apéndice 2.

Pérdida de peso en NaOH al 3 % - proporción almidón/glicerina 50/50 %						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	
0	10,09	10,08	10,03	10,08	10,37	
1	9,90	9,92	9,84	9,89	10,19	
2	9,63	9,85	9,58	9,74	10,08	
3	9,23	9,85	9,37	9,33	9,87	
4	9,21	9,82	9,19	9,10	9,74	
5	9,04	8,58	9,00	8,92	9,03	
10	8,26	7,40	8,07	7,87	7,92	
15	8,15	7,22	7,95	7,73	7,76	
20	8,04	7,08	7,83	7,61	7,63	
25	7,45	6,36	7,32	7,02	6,97	
30	7,27	6,05	7,09	6,76	6,69	
Degradabilidad en NaOH al 3 % - proporción almidón/glicerina 50/50 %						
Dí a	D ₁ (%)	D ₂ (%)	D ₃ (%)	D ₄ (%)	D ₅ (%)	Promedio (%)
1	1,82	1,58	1,83	1,93	1,71	1,77±0,12
2	4,49	2,29	4,45	3,36	2,75	3,47±0,89
3	8,51	2,34	6,49	7,49	4,78	5,92±2,17
4	8,68	2,65	8,36	9,73	6,02	7,09±2,53
5	10,34	14,91	10,23	11,57	12,88	11,99±1,75
10	18,14	26,65	19,55	21,91	23,62	21,97±3,00
15	19,19	28,38	20,73	23,32	25,15	23,35±3,25
20	20,25	29,83	21,95	24,51	26,43	24,59±3,37
25	26,16	36,96	26,97	30,40	32,76	30,65±3,95
30	27,89	39,96	29,27	32,93	35,45	33,10±4,35

Continuación del apéndice 2.

Pérdida de peso en NaOH al 3 % - proporción almidón/glicerina 67/33 %						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	
0	10,01	9,96	10,06	10,09	10,35	
1	9,81	8,44	8,80	8,89	8,99	
2	9,50	8,20	8,54	8,62	8,73	
3	9,41	8,03	8,45	8,53	8,60	
4	9,35	7,96	8,38	8,37	8,48	
5	9,21	7,85	8,29	8,33	8,41	
10	8,96	7,54	8,00	7,89	8,03	
15	8,16	6,95	7,28	7,28	7,44	
20	8,07	6,87	7,16	7,18	7,34	
25	7,90	6,70	6,97	7,00	7,17	
30	7,53	6,36	6,44	6,63	6,82	
Degradabilidad en NaOH al 3 % - proporción almidón/glicerina 67/33 %						
Dí a	D ₁ (%)	D ₂ (%)	D ₃ (%)	D ₄ (%)	D ₅ (%)	Promedio (%)
1	2,05	15,25	12,50	11,89	13,14	10,97±4,60
2	5,08	17,69	15,06	14,57	15,62	13,60±4,39
3	6,05	19,39	15,95	15,51	16,90	14,76±4,56
4	6,61	20,09	16,71	17,05	17,99	15,69±4,69
5	8,01	21,24	17,61	17,43	18,73	16,60±4,51
10	10,50	24,33	20,44	21,78	22,34	19,88±4,85
15	18,55	30,21	27,63	27,83	28,12	26,47±4,07
20	19,46	31,08	28,81	28,84	29,03	27,44±4,08
25	21,13	32,71	30,73	30,59	30,67	29,17±4,09
30	24,78	36,17	35,97	34,26	34,13	33,06±4,23

Continuación del apéndice 2.

Pérdida de peso en NaOH al 3 % - proporción almidón/urea 33/67 %						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	
0	10,10	10,01	10,06	10,05	10,39	
1	9,76	9,86	9,91	9,94	10,26	
2	9,56	9,74	9,84	9,82	10,14	
3	9,44	9,63	9,77	9,66	10,01	
4	9,17	9,52	9,69	9,62	9,93	
5	8,98	9,41	9,61	9,52	9,82	
10	7,38	8,44	8,97	8,58	8,87	
15	7,22	8,31	8,90	8,50	8,76	
20	7,05	8,15	8,84	8,50	8,68	
25	6,87	8,10	8,76	8,34	8,58	
30	6,02	7,56	8,38	7,96	8,12	
Degradabilidad en NaOH al 3 % - proporción almidón/urea 33/67 %						
Día	D ₁ (%)	D ₂ (%)	D ₃ (%)	D ₄ (%)	D ₅ (%)	Promedio (%)
1	3,35	1,51	1,46	1,08	1,25	1,73±0,82
2	5,34	2,68	2,15	2,30	2,40	2,97±1,20
3	6,50	3,79	2,88	3,85	3,69	4,14±1,23
4	9,15	4,93	3,70	4,30	4,45	5,31±1,96
5	11,03	6,02	4,46	5,29	5,46	6,45±2,34
10	26,87	15,67	10,85	14,64	14,63	16,53±5,42
15	28,51	17,02	11,55	15,46	15,68	17,65±5,73
20	30,19	18,62	12,11	15,40	16,42	18,55±6,19
25	31,94	19,04	12,91	16,97	17,38	19,65±6,47
30	40,39	24,52	16,71	20,81	21,88	24,86±8,16

Continuación del apéndice 2.

Pérdida de peso en NaOH al 3 % - proporción almidón/urea 50/50 %						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	
0	10,04	10,09	10,48	10,09	10,57	
1	9,87	9,96	10,31	9,99	10,46	
2	9,75	9,87	10,17	9,98	10,40	
3	9,61	9,75	10,00	9,87	10,29	
4	9,30	9,48	9,58	9,67	10,06	
5	9,02	9,23	9,32	9,33	9,76	
10	8,34	8,55	8,63	8,73	9,12	
15	8,18	8,47	8,40	8,59	9,01	
20	8,08	8,45	8,30	8,50	8,95	
25	7,97	8,35	8,17	8,39	8,85	
30	7,43	7,89	7,59	7,95	8,40	
Degradabilidad en NaOH al 3 % - proporción almidón/urea 50/50 %						
Día	D ₁ (%)	D ₂ (%)	D ₃ (%)	D ₄ (%)	D ₅ (%)	Promedio (%)
1	1,64	1,25	1,62	0,95	1,05	1,30±0,29
2	2,84	2,20	2,97	1,05	1,55	2,12±0,74
3	4,21	3,40	4,61	2,10	2,63	3,39±0,94
4	7,35	6,09	8,64	4,10	4,86	6,21±1,64
5	10,11	8,52	11,07	7,50	7,65	8,97±1,40
10	16,92	15,23	17,62	13,42	13,67	15,37±1,69
15	18,48	16,08	19,86	14,82	14,75	16,80±2,04
20	19,50	16,29	20,80	15,75	15,29	17,52±2,21
25	20,56	17,23	22,04	16,82	16,25	18,58±2,29
30	25,96	21,83	27,57	21,19	20,53	23,41±2,81

Continuación del apéndice 2.

Pérdida de peso en NaOH al 3 % - proporción almidón/urea 67/33 %						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	
0	9,95	10,00	9,89	10,02	10,23	
1	9,77	9,94	9,50	9,92	10,15	
2	9,78	9,80	9,35	9,75	9,99	
3	9,14	9,35	9,12	9,59	9,69	
4	9,01	9,13	8,98	9,49	9,53	
5	8,84	8,82	8,74	9,48	9,37	
10	8,70	8,44	8,44	9,29	9,08	
15	8,41	8,27	8,16	8,31	8,51	
20	8,31	8,58	8,06	8,20	8,61	
25	8,24	8,50	7,98	8,10	8,52	
30	7,51	7,84	7,27	7,17	7,72	
Degradabilidad en NaOH al 3 % - proporción almidón/urea 67/33 %						
Día	D ₁ (%)	D ₂ (%)	D ₃ (%)	D ₄ (%)	D ₅ (%)	Promedio (%)
1	1,83	0,61	3,97	1,05	0,81	1,65±1,23
2	1,70	2,04	5,43	2,69	2,32	2,84±1,34
3	8,16	6,53	7,74	4,28	5,29	6,40±1,46
4	9,47	8,75	9,23	5,29	6,87	7,92±1,60
5	11,19	11,81	11,61	5,42	8,43	9,69±2,46
10	12,59	15,61	14,62	7,31	11,21	12,27±2,91
15	15,49	17,35	17,54	17,06	16,84	16,85±0,72
20	16,46	14,21	18,50	18,22	15,87	16,65±1,58
25	17,22	15,03	19,29	19,23	16,76	17,51±1,61
30	24,49	21,64	26,45	28,51	24,55	25,13±2,29

Continuación del apéndice 2.

Pérdida de peso en NaOH al 3 % - proporción almidón/glicerina/urea 44/33/22						
%						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	
0	10,00	10,06	10,07	10,09	10,35	
1	9,86	9,90	9,94	9,94	10,19	
2	9,68	9,78	9,70	9,85	10,09	
3	9,65	9,68	9,67	9,63	9,93	
4	9,53	9,56	9,55	9,48	9,79	
5	9,24	9,25	9,23	9,07	9,43	
10	8,57	8,59	8,60	8,33	8,73	
15	8,47	8,49	8,51	8,22	8,63	
20	8,36	8,38	8,41	8,11	8,52	
25	8,27	8,27	8,26	7,98	8,40	
30	7,64	7,50	7,30	7,17	7,60	
Degradabilidad en NaOH al 3 % - proporción almidón/glicerina/urea 44/33/22						
%						
Dí a	D ₁ (%)	D ₂ (%)	D ₃ (%)	D ₄ (%)	D ₅ (%)	Promedio (%)
1	1,36	1,64	1,35	1,53	1,54	1,48±0,11
2	3,24	2,77	3,70	2,35	2,49	2,91±0,50
3	3,51	3,78	3,98	4,53	4,05	3,97±0,34
4	4,66	4,95	5,19	6,03	5,35	5,24±0,46
5	7,62	8,09	8,32	10,09	8,85	8,60±0,85
10	14,30	14,58	14,61	17,44	15,60	15,31±1,16
15	15,27	15,58	15,54	18,53	16,61	16,31±1,20
20	16,40	16,66	16,49	19,66	17,69	17,38±1,23
25	17,30	17,75	17,99	20,91	18,83	18,56±1,28
30	23,65	25,49	27,56	28,98	26,52	26,44±1,81

Continuación del apéndice 2.

Pérdida de peso en NaOH al 3 % - proporción almidón/glicerina/urea 44/28/28 %						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	
0	10,02	10,02	10,01	10,01	10,32	
1	9,60	9,83	9,84	9,89	10,17	
2	9,28	9,68	9,74	9,83	10,06	
3	9,24	9,49	9,63	9,66	9,88	
4	9,16	9,42	9,49	9,56	9,79	
5	9,02	9,29	9,36	9,44	9,67	
10	8,09	8,43	8,57	8,66	8,85	
15	7,95	8,30	8,42	8,43	8,67	
20	7,28	8,89	7,74	7,83	8,67	
25	7,15	7,53	7,69	7,70	7,92	
30	6,45	6,85	7,00	7,05	7,26	
Degradabilidad en NaOH al 3 % - proporción almidón/glicerina/urea 44/28/28 %						
Día	D ₁ (%)	D ₂ (%)	D ₃ (%)	D ₄ (%)	D ₅ (%)	Promedio (%)
1	4,21	1,85	1,69	1,25	1,50	2,10±1,07
2	7,36	3,42	2,69	1,83	2,55	3,57±1,96
3	7,77	5,29	3,82	3,49	4,26	4,92±1,55
4	8,55	6,00	5,16	4,57	5,13	5,88±1,41
5	9,98	7,30	6,46	5,73	6,32	7,16±1,50
10	19,25	15,88	14,37	13,54	14,27	15,46±2,04
15	20,70	17,19	15,85	15,77	15,99	17,10±1,87
20	27,39	11,22	22,66	21,76	16,00	19,81±5,62
25	28,64	24,87	23,13	23,12	23,28	24,61±2,12
30	35,58	31,64	30,05	29,55	29,69	31,30±2,27

Continuación del apéndice 2.

Pérdida de peso en NaOH al 3 % - proporción almidón/glicerina/urea 44/22/33 %						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	
0	10,16	10,10	10,10	10,02	10,44	
1	9,94	9,90	9,91	9,78	10,22	
2	9,79	9,76	9,76	9,63	10,07	
3	9,64	9,62	9,61	9,45	9,91	
4	9,47	9,46	9,44	9,26	9,74	
5	9,25	9,24	9,26	9,12	9,55	
10	8,53	8,51	8,49	8,11	8,69	
15	8,43	8,45	8,43	8,19	8,69	
20	8,36	8,34	8,32	7,89	8,49	
25	8,27	8,25	8,25	7,78	8,39	
30	7,49	7,52	7,53	6,89	7,58	
Degradabilidad en NaOH al 3 % - proporción almidón/glicerina/urea 44/22/33 %						
Día	D ₁ (%)	D ₂ (%)	D ₃ (%)	D ₄ (%)	D ₅ (%)	Promedio (%)
1	2,16	1,98	1,80	2,41	2,12	2,09±0,20
2	3,66	3,36	3,97	3,97	3,53	3,70±0,24
3	5,13	4,80	5,75	5,75	5,08	5,30±0,38
4	6,75	6,37	7,60	7,60	6,73	7,01±0,50
5	8,98	8,53	9,06	9,06	8,48	8,82±0,26
10	16,02	15,77	19,06	19,06	16,79	17,34±1,45
15	17,01	16,38	18,33	18,33	16,73	17,36±0,82
20	17,74	17,46	21,26	21,26	18,66	19,28±1,67
25	18,64	18,35	22,36	22,36	19,62	20,26±1,76
30	26,23	25,56	31,32	31,32	27,41	28,36±2,48

Continuación del apéndice 2.

Pérdida de peso por exposición a rayos UV del Sol - proporción almidón/glicerina 33/67 %						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	
0	9,98	10,09	9,91	9,85	9,63	
1	10,28	10,37	10,18	10,13	10,12	
2	10,47	10,58	10,37	10,33	10,33	
3	10,36	10,78	10,56	10,51	10,37	
4	10,85	10,98	10,75	10,70	10,72	
5	11,10	11,25	11,22	11,14	10,98	
10	11,92	12,06	11,77	11,71	11,79	
15	12,09	12,18	11,90	11,80	11,93	
20	12,11	12,26	11,98	11,93	11,99	
25	12,21	12,36	12,14	12,03	12,09	
30	12,48	12,67	12,43	12,33	12,38	
Degradabilidad por exposición a rayos UV del Sol - proporción almidón/glicerina 33/67 %						
Día	Degradabilidad 1 (%)	Degradabilidad 2 (%)	Degradabilidad 3 (%)	Degradabilidad 4 (%)	Degradabilidad 5 (%)	Promedio (%)
1	-2,93	-2,84	-2,75	-2,85	-5,08	-3,29±0,90
2	-4,90	-4,91	-4,69	-4,89	-7,18	-5,31±0,94
3	-4,80	-6,88	-6,56	-6,75	-7,65	-6,33±1,32
4	-8,72	-8,84	-8,49	-8,71	-11,22	-9,20±1,02
5	-11,21	-11,53	-13,26	-13,15	-13,92	-12,61±1,05
10	-19,38	-19,55	-18,87	-18,96	-22,35	-19,82±1,29
15	-21,10	-20,70	-20,15	-19,80	-23,84	-21,12±1,43
20	-21,31	-21,55	-20,94	-21,19	-24,40	-21,88±1,28
25	-22,33	-22,54	-22,55	-22,22	-25,45	-23,02±1,22
30	-25,04	-25,62	-25,52	-25,25	-28,46	-25,98±1,26
Radiación solar menor (kWh/m²/h)			5,5	Radiación solar mayor (kWh/m²/h)		5,8
Índice UV menor			1	Índice UV mayor		11
Iluminancia menor (luxes)			2,4	Iluminancia mayor (luxes)		572,9

Continuación del apéndice 2.

Pérdida de peso por exposición a rayos UV del Sol - proporción almidón/glicerina 50/50 %						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	
0	9,23	8,99	9,31	9,01	8,77	
1	9,27	9,05	9,34	9,07	8,82	
2	9,39	9,23	9,45	9,25	8,97	
3	9,41	9,26	9,48	9,28	9,00	
4	9,45	9,31	9,49	9,31	9,04	
5	9,58	9,57	9,65	9,57	9,23	
10	9,64	9,65	9,70	9,66	9,31	
15	9,67	9,75	9,79	9,75	9,37	
20	9,77	9,91	9,90	9,87	9,50	
25	9,95	10,01	9,98	10,02	9,64	
30	10,00	10,07	10,00	10,07	9,93	
Degradabilidad por exposición a rayos UV del Sol - proporción almidón/glicerina 50/50 %						
Día	Degradabilidad 1 (%)	Degradabilidad 2 (%)	Degradabilidad 3 (%)	Degradabilidad 4 (%)	Degradabilidad 5 (%)	Promedio (%)
1	-0,51	-0,57	-0,19	-0,58	-2,85	-0,94±0,32
2	-2,32	-1,60	-1,08	-2,05	-4,28	-2,27±0,56
3	-3,30	-3,14	-2,16	-3,19	-5,56	-3,47±0,74
4	-3,62	-4,19	-3,02	-4,11	-6,25	-4,24±0,78
5	-4,21	-5,02	-3,55	-5,02	-6,97	-4,95±2,02
10	-5,49	-7,58	-5,09	-7,62	-8,91	-6,94±2,51
15	-5,89	-8,00	-5,28	-7,86	-9,33	-7,27±1,99
20	-6,10	-8,35	-5,54	-8,17	-9,61	-7,55±1,83
25	-7,35	-10,09	-6,62	-9,97	-11,12	-9,03±2,28
30	-7,71	-10,71	-6,98	-10,59	-11,62	-9,52±3,09
Radiación solar menor (kWh/m²/h)			5,5	Radiación solar mayor (kWh/m²/h)		5,8
Índice UV menor			1	Índice UV mayor		11
Iluminancia menor (luxes)			2,4	Iluminancia mayor (luxes)		572,9

Continuación del apéndice 2.

Pérdida de peso por exposición a rayos UV del Sol - proporción almidón/glicerina 67/33 %						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	
0	9,60	9,88	10,08	10,07	9,84	
1	10,55	10,23	10,21	10,27	10,14	
2	10,69	10,62	10,39	10,59	10,40	
3	10,94	10,87	10,50	10,75	10,65	
4	11,13	10,98	10,55	10,80	10,80	
5	11,25	11,12	10,68	10,96	10,94	
10	11,76	11,66	10,93	11,32	11,46	
15	11,80	11,72	10,96	11,35	11,51	
20	11,90	11,81	11,05	11,43	11,60	
25	12,07	11,96	11,17	11,57	11,76	
30	12,31	12,21	11,36	11,79	12,01	
Degradabilidad por exposición a rayos UV del Sol - proporción almidón/glicerina 67/33 %						
Día	Degradabilidad 1 (%)	Degradabilidad 2 (%)	Degradabilidad 3 (%)	Degradabilidad 4 (%)	Degradabilidad 5 (%)	Promedio (%)
1	-9,89	-3,55	-1,26	-2,03	-3,05	-3,96±3,07
2	-11,35	-7,47	-3,09	-5,21	-5,73	-6,57±2,77
3	-13,92	-9,98	-4,21	-6,76	-8,25	-8,62±3,26
4	-15,90	-11,08	-4,67	-7,26	-9,77	-9,74±3,78
5	-17,24	-12,54	-5,90	-8,91	-11,15	-11,15±3,78
10	-22,46	-17,98	-8,45	-12,43	-16,43	-15,55±4,79
15	-22,91	-18,66	-8,73	-12,74	-16,99	-16,01±4,89
20	-23,94	-19,52	-9,57	-13,51	-17,93	-16,90±4,95
25	-25,70	-21,04	-10,78	-14,94	-19,55	-18,40±5,13
30	-28,25	-23,59	-12,65	-17,10	-22,07	-20,73±5,39
Radiación solar menor (kWh/m²/h)			5,5	Radiación solar mayor (kWh/m²/h)		5,8
Índice UV menor			1	Índice UV mayor		11
Iluminancia menor (luxes)			2,4	Iluminancia mayor (luxes)		572,9

Continuación del apéndice 2.

Pérdida de peso por exposición a rayos UV del Sol - proporción almidón/urea 33/67 %						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	
0	10,29	10,09	9,62	9,83	9,69	
1	10,29	10,10	9,98	10,10	9,90	
2	10,51	10,29	10,02	10,12	10,10	
3	10,70	10,56	10,08	10,17	10,33	
4	10,85	10,58	10,11	10,19	10,41	
5	10,99	10,73	10,14	10,23	10,56	
10	11,52	11,32	10,33	10,37	11,12	
15	11,64	11,48	10,36	10,44	11,26	
20	11,71	11,56	10,41	10,46	11,33	
25	11,81	11,66	10,46	10,52	11,43	
30	11,90	11,79	10,49	10,65	11,55	
Degradabilidad por exposición a rayos UV del Sol - proporción almidón/urea 33/67 %						
Día	Degradabilidad 1 (%)	Degradabilidad 2 (%)	Degradabilidad 3 (%)	Degradabilidad 4 (%)	Degradabilidad 5 (%)	Promedio (%)
1	-0,01	-0,16	-3,68	-2,69	-2,15	-1,74±1,44
2	-2,11	-2,03	-4,14	-2,94	-4,24	-3,09±0,95
3	-3,98	-4,74	-4,76	-3,38	-6,64	-4,70±1,10
4	-5,41	-4,91	-5,08	-3,63	-7,50	-5,31±1,25
5	-6,80	-6,37	-5,37	-4,00	-8,99	-6,31±1,65
10	-11,95	-12,26	-7,30	-5,46	-14,79	- 10,35±3,44
15	-13,15	-13,79	-7,70	-6,11	-16,23	- 11,40±3,84
20	-13,79	-14,59	-8,16	-6,40	-16,99	- 11,99±4,02
25	-14,74	-15,64	-8,73	-6,99	-18,03	- 12,83±4,23
30	-15,68	-16,92	-9,00	-8,29	-19,20	- 13,82±4,38
Radiación solar menor (kWh/m²/h)			5,5	Radiación solar mayor (kWh/m²/h)		5,8
Índice UV menor			1	Índice UV mayor		11
Iluminancia menor (luxes)			2,4	Iluminancia mayor (luxes)		572,9

Continuación del apéndice 2.

Pérdida de peso por exposición a rayos UV del Sol - proporción almidón/urea 50/50 %						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	
0	10,05	10,04	10,05	10,00	9,94	
1	10,20	10,17	10,21	10,12	9,85	
2	10,32	10,28	10,32	10,22	9,96	
3	10,38	10,34	10,38	10,26	10,02	
4	10,42	10,36	10,41	10,64	10,05	
5	10,44	10,38	10,44	10,78	10,07	
10	10,78	10,71	10,82	11,63	10,41	
15	10,88	10,82	10,84	11,66	10,51	
20	10,95	10,84	10,94	11,74	10,56	
25	11,01	10,91	11,00	11,80	10,62	
30	11,24	11,20	11,24	12,01	10,88	
Degradabilidad por exposición a rayos UV del Sol - proporción almidón/urea 50/50 %						
Día	Degradabilidad 1 (%)	Degradabilidad 2 (%)	Degradabilidad 3 (%)	Degradabilidad 4 (%)	Degradabilidad 5 (%)	Promedio (%)
1	-1,51	-1,30	-1,66	-1,14	-0,88	-0,95±0,27
2	-2,63	-2,39	-2,77	-2,14	-0,24	-2,03±0,92
3	-3,29	-2,96	-3,37	-2,62	-0,86	-2,62±0,92
4	-3,65	-3,18	-3,66	-6,38	-1,15	-3,61±1,67
5	-3,91	-3,39	-3,89	-7,80	-1,39	-4,08±2,08
10	-7,24	-6,66	-7,69	-16,29	-4,73	-8,52±4,01
15	-8,20	-7,74	-7,86	-16,57	-5,76	-9,23±3,77
20	-8,92	-8,00	-8,85	-17,38	-6,26	-9,88±3,87
25	-9,55	-8,62	-9,49	-18,03	-6,88	- 10,51±3,88
30	-11,85	-11,49	-11,86	-20,11	-9,50	- 12,96±3,68
Radiación solar menor (kWh/m²/h)			5,5	Radiación solar mayor (kWh/m²/h)		5,8
Índice UV menor			1	Índice UV mayor		11
Iluminancia menor (luxes)			2,4	Iluminancia mayor (luxes)		572,9

Continuación del apéndice 2.

Pérdida de peso por exposición a rayos UV del Sol - proporción almidón/urea 67/33 %						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	
0	10,03	10,04	10,04	10,00	9,93	
1	10,11	10,13	10,13	10,04	10,06	
2	10,19	10,21	10,21	10,05	10,14	
3	10,24	10,30	10,30	10,08	10,20	
4	10,28	10,32	10,31	10,09	10,23	
5	10,38	10,44	10,66	10,00	10,35	
10	10,69	10,45	10,80	10,04	10,50	
15	11,01	10,74	10,97	10,44	10,81	
20	11,18	10,94	11,19	10,67	10,99	
25	11,38	11,05	11,57	10,89	11,15	
30	11,90	11,37	11,90	11,07	11,57	
Degradabilidad por exposición a rayos UV del Sol - proporción almidón/urea 67/33 %						
Día	Degradabilidad 1 (%)	Degradabilidad 2 (%)	Degradabilidad 3 (%)	Degradabilidad 4 (%)	Degradabilidad 5 (%)	Promedio (%)
1	-0,80	-0,95	-0,89	-0,33	-1,33	-0,86±0,96
2	-1,60	-1,75	-1,66	-0,48	-2,14	-1,53±1,09
3	-2,01	-2,64	-2,52	-0,77	-2,80	-2,15±1,12
4	-2,47	-2,79	-2,68	-0,88	-3,10	-2,39±1,09
5	-3,47	-4,04	-6,15	-3,43	-4,24	-3,57±1,15
10	-6,52	-4,16	-7,58	-4,19	-5,84	-4,90±1,43
15	-9,71	-6,99	-9,26	-4,31	-8,88	-7,83±1,48
20	-11,38	-9,06	-11,44	-6,63	-10,78	-9,86±1,51
25	-13,43	-10,08	-15,23	-8,90	-12,33	-11,99±1,73
30	-18,63	-13,30	-18,45	-10,67	-16,59	-15,53±1,83
Radiación solar menor (kWh/m²/h)			5,5	Radiación solar mayor (kWh/m²/h)		5,8
Índice UV menor			1	Índice UV mayor		11
Iluminancia menor (luxes)			2,4	Iluminancia mayor (luxes)		572,9

Continuación del apéndice 2.

Pérdida de peso por exposición a rayos UV del Sol - proporción almidón/glicerina/urea 44/33/22 %						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	
0	10,01	10,04	10,03	10,09	9,92	
1	10,16	10,19	10,19	10,26	10,18	
2	10,25	10,29	10,35	10,38	10,27	
3	10,36	10,45	10,40	10,53	10,41	
4	10,44	10,57	10,51	10,67	10,50	
5	10,63	10,83	10,71	10,96	10,73	
10	10,97	11,29	11,08	11,44	11,13	
15	11,04	11,36	11,14	11,52	11,20	
20	11,09	11,42	11,21	11,58	11,26	
25	11,11	11,47	11,25	11,63	11,29	
30	11,18	11,71	11,43	11,71	11,45	
Degradabilidad por exposición a rayos UV del Sol - proporción almidón/glicerina/urea 44/33/22 %						
Día	Degradabilidad 1 (%)	Degradabilidad 2 (%)	Degradabilidad 3 (%)	Degradabilidad 4 (%)	Degradabilidad 5 (%)	Promedio (%)
1	-1,47	-1,51	-1,55	-1,68	-2,62	-1,76±0,43
2	-2,39	-2,48	-3,20	-2,87	-3,57	-2,90±0,44
3	-3,49	-4,08	-3,69	-4,42	-4,94	-4,12±0,52
4	-4,30	-5,24	-4,73	-5,80	-5,93	-5,20±0,62
5	-6,19	-7,89	-6,71	-8,65	-8,23	-7,53±0,93
10	-9,57	-12,41	-10,45	-13,42	-12,22	-11,62±1,40
15	-10,25	-13,17	-11,08	-14,20	-12,95	-12,33±1,45
20	-10,74	-13,83	-11,74	-14,79	-13,53	-12,93±1,47
25	-11,02	-14,25	-12,12	-15,34	-13,89	-13,32±1,55
30	-11,64	-16,66	-13,92	-16,04	-15,42	-14,74±1,80
Radiación solar menor (kWh/m²/h)			5,5	Radiación solar mayor (kWh/m²/h)		5,8
Índice UV menor			1	Índice UV mayor		11
Iluminancia menor (luxes)			2,4	Iluminancia mayor (luxes)		572,9

Continuación del apéndice 2.

Pérdida de peso por exposición a rayos UV del Sol - proporción almidón/glicerina/urea 44/28/28 %						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	
0	10,09	10,07	10,02	10,09	9,97	
1	10,21	10,18	10,06	10,14	9,90	
2	10,22	10,24	10,13	10,15	9,93	
3	10,31	10,26	10,13	10,15	9,98	
4	10,39	10,29	10,16	10,16	10,05	
5	10,49	10,36	11,09	10,20	10,13	
10	10,88	10,64	11,25	10,31	10,46	
15	10,92	10,66	11,34	10,32	10,49	
20	10,95	10,75	11,43	11,15	10,56	
25	10,98	10,96	11,45	11,24	10,67	
30	11,60	11,23	11,54	11,76	11,12	
Degradabilidad por exposición a rayos UV del Sol - proporción almidón/glicerina/urea 44/28/28 %						
Día	Degradabilidad 1 (%)	Degradabilidad 2 (%)	Degradabilidad 3 (%)	Degradabilidad 4 (%)	Degradabilidad 5 (%)	Promedio (%)
1	-1,16	-1,05	-0,44	-0,53	-1,27	-0,89±0,34
2	-1,23	-1,71	-1,10	-0,57	-1,65	-1,25±0,41
3	-2,10	-1,84	-1,13	-0,60	-2,16	-1,57±0,61
4	-2,97	-2,18	-1,38	-0,66	-2,79	-2,00±0,87
5	-3,88	-2,86	-10,68	-1,04	-3,61	-4,42±3,29
10	-7,84	-5,62	-12,29	-2,16	-7,08	-7,00±3,29
15	-8,18	-5,80	-13,16	-2,24	-7,23	-7,35±3,55
20	-8,53	-6,77	-14,06	-10,46	-8,03	-9,57±2,54
25	-8,80	-8,78	-14,26	-11,43	-9,20	-10,49±2,12
30	-14,89	-11,47	-15,21	-16,57	-13,73	-14,38±1,71
Radiación solar menor (kWh/m²/h)			5,5	Radiación solar mayor (kWh/m²/h)		5,8
Índice UV menor			1	Índice UV mayor		11
Iluminancia menor (luxes)			2,4	Iluminancia mayor (luxes)		572,9

Continuación del apéndice 2.

Pérdida de peso por exposición a rayos UV del Sol - proporción almidón/glicerina/urea 44/22/33 %						
Día	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	
0	9,88	9,95	10,04	10,02	9,81	
1	10,01	10,02	10,09	10,13	9,83	
2	10,01	10,03	10,14	10,20	9,83	
3	10,02	10,03	10,17	10,24	9,84	
4	10,03	10,04	10,22	10,31	9,85	
5	10,11	10,10	10,26	10,36	9,91	
10	10,19	10,17	10,32	10,51	9,99	
15	10,28	10,59	10,36	10,57	10,24	
20	10,42	10,82	10,65	10,75	10,43	
25	10,65	11,08	10,95	10,94	10,67	
30	11,35	11,23	11,08	11,92	11,10	
Degradabilidad por exposición a rayos UV del Sol - proporción almidón/glicerina/urea 44/22/33 %						
Día	Degradabilidad 1 (%)	Degradabilidad 2 (%)	Degradabilidad 3 (%)	Degradabilidad 4 (%)	Degradabilidad 5 (%)	Promedio (%)
1	-1,29	-0,69	-0,58	-1,09	-0,19	-0,77±0,39
2	-1,37	-0,73	-1,09	-1,76	-0,25	-1,04±0,52
3	-1,42	-0,78	-1,36	-2,18	-0,30	-1,21±0,63
4	-1,55	-0,86	-1,87	-2,84	-0,41	-1,51±0,84
5	-2,33	-1,44	-2,23	-3,34	-1,09	-2,09±0,78
10	-3,14	-2,19	-2,81	-4,85	-1,88	-2,97±1,04
15	-4,04	-6,34	-3,26	-5,45	-4,44	-4,71±1,08
20	-5,48	-8,73	-6,11	-7,24	-6,38	-6,79±1,12
25	-7,80	-11,30	-9,11	-9,19	-8,85	-9,25±1,14
30	-14,87	-12,83	-10,40	-18,89	-13,19	-14,04±2,81
Radiación solar menor (kWh/m²/h)			5,5	Radiación solar mayor (kWh/m²/h)		5,8
Índice UV menor			1	Índice UV mayor		11
-Iluminancia menor (luxes)			2,4	Iluminancia mayor (luxes)		572,9

Continuación del apéndice 2.

Valores de índice de radiación UV, radiación solar y emitancia luminosa				
Día	Índice UV menor	Índice UV mayor	Emitancia luminosa menor (luxes)	Emitancia luminosa mayor (luxes)
1	1	11	1	552
2	1	11	2	503
3	1	11	4	573
4	1	11	1	554
5	1	11	2	602
10	1	11	1	597
15	1	11	4	543
20	1	11	3	576
25	1	11	4	603
30	1	11	2	626
Promedio	1	11	2,4±1,2	572,90±34,26
Radiación solar menor (kWh/m2)			5,5	
Radiación solar mayor (kWh/m2)			5,8	

Fuente: elaboración propia, con información de Índice UV obtenido de INSIVUMEH.

Apéndice 3. Datos para análisis de permeabilidad al vapor de agua

Toma de datos para análisis de permeabilidad al vapor de agua – proporción almidón/glicerina 33/67 %							
Tiempo (horas)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	Promedio (g)	h (%)
0	20,01	20,01	19,99	20,00	20,00	20,00±0,01	60
1	20,01	19,99	19,98	19,89	19,99	19,97±0,05	65
2	20,00	19,98	19,98	19,89	19,99	19,97±0,04	63
3	20,00	19,98	19,98	19,89	19,99	19,97±0,04	66
4	19,99	19,97	19,98	19,88	19,98	19,96±0,04	65
5	19,98	19,96	19,98	19,88	19,98	19,96±0,04	68
24	19,94	19,90	19,91	19,82	19,91	19,90±0,05	65
48	19,85	19,81	19,82	19,74	19,83	19,81±0,04	64
72	19,83	19,74	19,73	19,72	19,74	19,75±0,04	62
96	19,77	19,72	19,72	19,65	19,73	19,72±0,04	63
120	19,74	19,71	19,70	19,64	19,72	19,70±0,03	67
240	19,50	19,48	19,45	19,37	19,47	19,46±0,05	64
360	18,55	18,61	18,87	18,82	18,75	18,72±0,14	66
480	18,07	18,17	18,58	18,53	18,38	18,35±0,22	65
600	17,75	17,87	18,38	18,34	18,13	18,10±0,28	67
720	17,40	17,53	18,16	18,13	17,85	17,81±0,34	65
Radio (m)	0,02						
Área (m ²)	1,34E-03						
Espesor (mm)	3,72						
Presión (kPa)	3167						

Continuación del apéndice 3.

Toma de datos para análisis de permeabilidad al vapor de agua - proporción almidón/glicerina 50/50 %							
Tiempo (horas)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	Promedio (g)	h (%)
0	20,01	20,02	19,99	20,09	20,04	20,03±0,04	60
1	19,96	20,01	19,97	19,99	19,98	19,98±0,02	65
2	19,95	20,01	19,97	19,99	19,98	19,98±0,02	63
3	19,94	20,00	19,96	19,98	19,97	19,97±0,02	66
4	19,94	19,99	19,96	19,98	19,97	19,97±0,02	65
5	19,93	19,99	19,96	19,97	19,96	19,96±0,02	68
24	19,84	19,93	19,89	19,92	19,90	19,89±0,03	65
48	19,79	19,88	19,80	19,84	19,83	19,83±0,04	64
72	19,70	19,83	19,72	19,82	19,76	19,77±0,06	62
96	19,62	19,81	19,70	19,74	19,74	19,72±0,07	63
120	19,58	19,74	19,69	19,74	19,71	19,69±0,06	67
240	19,30	19,47	19,44	19,47	19,45	19,42±0,07	64
360	18,50	18,83	18,86	18,91	18,84	18,79±0,16	66
480	18,09	18,62	18,57	18,63	18,58	18,50±0,23	65
600	17,82	18,31	18,37	18,44	18,33	18,25±0,25	67
720	17,52	18,06	17,17	17,56	17,61	17,58±0,32	65
Radio (m)	0,02						
Área (m ²)	1,31E-03						
Espesor (mm)	4,06						
Presión (kPa)	3167						

Continuación del apéndice 3.

Toma de datos para análisis de permeabilidad al vapor de agua - proporción almidón/glicerina 67/33 %							
Tiempo (horas)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	Promedio (g)	h (%)
0	20,02	20,02	19,99	20,00	20,01	20,01±0,01	60
1	19,94	20,01	19,96	19,98	19,98	19,97±0,03	65
2	19,94	20,00	19,96	19,98	19,98	19,97±0,03	63
3	19,93	19,99	19,95	19,96	19,97	19,96±0,02	66
4	19,93	19,99	19,95	19,96	19,97	19,96±0,02	65
5	19,92	19,98	19,95	19,96	19,96	19,95±0,02	68
24	19,88	19,90	19,89	19,88	19,90	19,89±0,01	65
48	19,82	19,78	19,87	19,84	19,82	19,83±0,03	64
72	19,75	19,75	19,82	19,83	19,78	19,79±0,04	62
96	19,73	19,67	19,79	19,71	19,73	19,72±0,04	63
120	19,72	19,66	19,72	19,61	19,69	19,68±0,05	67
240	19,52	19,40	19,52	19,36	19,46	19,45±0,07	64
360	18,87	18,53	18,87	18,56	18,70	18,71±0,16	66
480	18,56	18,10	18,55	18,17	18,32	18,34±0,21	65
600	18,34	17,81	18,33	17,90	18,07	18,09±0,24	67
720	18,12	17,50	18,10	17,59	17,80	17,82±0,29	65
Radio (m)	0,02						
Área (m ²)	1,33E-03						
Espesor (mm)	3,72						
Presión (kPa)	3167						

Continuación del apéndice 3.

Toma de datos para análisis de permeabilidad al vapor de agua - proporción almidón/urea 33/67 %							
Tiempo (horas)	m1(g)	m2(g)	m3(g)	m4(g)	m5(g)	Promedio (g)	h (%)
0	20,09	20,04	19,98	20,05	20,10	20,05±0,05	64
1	20,03	20,00	19,98	19,94	19,98	19,98±0,03	64
2	20,01	19,99	19,97	19,93	19,98	19,98±0,03	62
3	19,99	19,98	19,97	19,93	19,97	19,97±0,02	61
4	19,98	19,96	19,97	19,93	19,96	19,96±0,02	65
5	19,96	19,95	19,96	19,93	19,95	19,95±0,01	65
24	19,77	19,82	19,93	19,88	19,87	19,85±0,06	65
48	19,71	19,80	19,92	19,86	19,86	19,83±0,08	63
72	19,63	19,71	19,85	19,78	19,78	19,75±0,08	63
96	19,55	19,66	19,82	19,73	19,73	19,70±0,10	63
120	19,46	19,56	19,75	19,66	19,65	19,62±0,11	66
240	19,20	19,34	19,50	19,41	19,42	19,37±0,11	62
360	18,41	18,78	18,93	18,92	18,65	18,74±0,22	64
480	18,23	18,41	18,78	18,70	18,29	18,48±0,25	65
600	17,97	17,98	18,61	18,62	18,11	18,26±0,33	65
720	17,76	17,64	18,39	18,35	17,77	17,98±0,36	62
Radio (m)	0,02						
Área (m ²)	1,32E-03						
Espesor (mm)	3,92						
Presión (kPa)	3167						

Continuación del apéndice 3.

Toma de datos para análisis de permeabilidad al vapor de agua - proporción almidón/urea 50/50 %							
Tiempo (horas)	m1(g)	m2(g)	m3(g)	m4(g)	m5(g)	Promedio (g)	h (%)
0	20,00	20,05	19,98	20,05	20,06	20,03±0,04	64
1	19,96	20,01	19,97	19,98	19,98	19,98±0,02	64
2	19,96	20,01	19,96	19,98	19,97	19,98±0,02	62
3	19,96	20,00	19,96	19,98	19,97	19,97±0,02	61
4	19,95	20,00	19,96	19,97	19,97	19,97±0,02	65
5	19,95	20,00	19,96	19,97	19,97	19,97±0,02	65
24	19,91	19,95	19,93	19,97	19,93	19,94±0,02	65
48	19,86	19,86	19,87	19,91	19,86	19,87±0,02	63
72	19,83	19,84	19,86	19,88	19,84	19,85±0,02	63
96	19,78	19,78	19,84	19,86	19,80	19,81±0,04	63
120	19,76	19,76	19,81	19,84	19,77	19,79±0,04	66
240	19,57	19,57	19,62	19,64	19,58	19,59±0,03	62
360	18,96	18,89	19,02	19,18	18,94	19,00±0,11	64
480	18,66	18,54	18,73	18,95	18,62	18,70±0,16	65
600	18,46	18,30	18,54	18,79	18,41	18,50±0,18	65
720	18,22	18,02	18,31	18,61	18,15	18,26±0,22	62
Radio (m)	0,02						
Área (m ²)	1,32E-03						
Espesor (mm)	3,98						
Presión (kPa)	3167						

Continuación del apéndice 3.

Toma de datos para análisis de permeabilidad al vapor de agua - proporción almidón/urea 67/33 %							
Tiempo (horas)	m1(g)	m2(g)	m3(g)	m4(g)	m5(g)	Promedio (g)	h (%)
0	19,96	20,05	20,05	19,99	20,12	20,03±0,06	64
1	19,95	20,00	19,96	19,99	20,01	19,98±0,03	64
2	19,94	19,99	19,95	19,99	20,00	19,97±0,03	62
3	19,93	19,98	19,94	19,98	19,99	19,97±0,03	61
4	19,92	19,97	19,94	19,97	19,98	19,96±0,03	65
5	19,90	19,94	19,94	19,96	19,97	19,94±0,03	65
24	19,72	19,84	19,88	19,89	19,94	19,86±0,08	65
48	19,63	19,76	19,79	19,79	19,93	19,78±0,11	63
72	19,42	19,66	19,72	19,72	19,69	19,64±0,13	63
96	19,33	19,47	19,66	19,68	19,63	19,55±0,15	63
120	19,23	19,37	19,63	19,66	19,61	19,50±0,19	66
240	18,83	18,94	19,40	19,45	19,39	19,20±0,29	62
360	18,16	18,25	19,03	19,13	19,04	18,72±0,48	64
480	17,81	17,90	18,84	18,95	18,86	18,47±0,57	65
600	17,46	17,55	18,64	18,78	18,67	18,22±0,66	65
720	17,11	17,11	18,38	18,64	18,46	17,94±0,76	62
Radio (m)	0,02						
Área (m ²)	1,32E-03						
Espesor (mm)	3,90						
Presión (kPa)	3167						

Continuación apéndice 3.

Toma de datos para análisis de permeabilidad al vapor de agua - Proporción almidón/glicerina/urea 44/33/22 %							
Tiempo (horas)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	Promedio (g)	h (%)
0	20,08	20,04	20,04	19,95	20,01	20,02±0,05	62
1	20,01	19,98	19,98	19,89	19,99	19,97±0,05	65
2	20,00	19,97	19,98	19,89	19,98	19,96±0,04	63
3	20,00	19,97	19,97	19,89	19,98	19,96±0,04	64
4	19,99	19,97	19,97	19,88	19,98	19,96±0,04	65
5	19,99	19,96	19,97	19,88	19,97	19,96±0,04	66
24	19,94	19,92	19,91	19,83	19,93	19,91±0,04	62
48	19,90	19,84	19,85	19,82	19,85	19,85±0,03	65
72	19,84	19,82	19,82	19,76	19,83	19,81±0,03	63
96	19,79	19,78	19,80	19,70	19,80	19,77±0,04	66
120	19,75	19,76	19,73	19,64	19,75	19,73±0,05	68
240	19,57	19,60	19,50	19,46	19,56	19,54±0,06	65
360	19,23	19,33	19,17	19,14	19,26	19,23±0,08	63
480	19,07	19,19	19,00	18,97	19,10	19,07±0,09	65
600	18,90	19,05	18,81	18,81	18,94	18,90±0,10	64
720	18,70	18,89	18,59	18,59	18,75	18,70±0,12	65
Radio (m)	0,02						
Área (m ²)	1,32E-03						
Espesor (mm)	3,80						
Presión (kPa)	3167						

Continuación apéndice 3.

Toma de datos para análisis de permeabilidad al vapor de agua - Proporción almidón/glicerina/urea 44/28/28 %							
Tiempo (horas)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	Promedio (g)	h (%)
0	20,04	20,10	20,12	20,01	20,00	20,05±0,05	62
1	19,96	20,02	19,97	19,98	19,98	19,98±0,02	65
2	19,96	20,01	19,97	19,98	19,98	19,98±0,02	63
3	19,95	20,01	19,96	19,98	19,97	19,97±0,02	64
4	19,94	20,00	19,95	19,97	19,97	19,97±0,02	65
5	19,93	20,00	19,94	19,97	19,96	19,96±0,02	66
24	19,87	19,93	19,88	19,90	19,89	19,89±0,02	62
48	19,82	19,83	19,84	19,87	19,83	19,84±0,02	65
72	19,79	19,80	19,75	19,79	19,77	19,78±0,02	63
96	19,73	19,74	19,64	19,76	19,68	19,71±0,05	66
120	19,65	19,71	19,61	19,70	19,65	19,66±0,04	68
240	19,46	19,50	19,34	19,51	19,41	19,45±0,07	65
360	19,15	19,17	18,92	19,20	19,04	19,10±0,11	63
480	18,99	19,00	18,71	19,03	18,85	18,92±0,14	65
600	18,82	18,81	18,49	18,86	18,64	18,72±0,16	64
720	18,61	18,60	18,20	18,65	18,39	18,49±0,19	65
Radio (m)	0,02						
Área (m ²)	1,33E-03						
Espesor (mm)	3,76						
Presión (kPa)	3167						

Continuación del apéndice 3.

Toma de datos para análisis de permeabilidad al vapor de agua - Proporción almidón/glicerina/urea 44/22/33 %							
Tiempo (horas)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	Promedio (g)	h (%)
0	19,98	20,20	19,97	20,00	20,02	20,03±0,10	62
1	19,94	20,01	19,96	19,98	19,98	19,97±0,03	65
2	19,93	20,00	19,95	19,98	19,98	19,97±0,03	63
3	19,93	20,00	19,95	19,97	19,97	19,96±0,03	64
4	19,92	19,99	19,95	19,96	19,97	19,96±0,03	65
5	19,91	19,98	19,94	19,96	19,96	19,95±0,03	66
24	19,85	19,94	19,90	19,89	19,91	19,90±0,03	62
48	19,84	19,91	19,85	19,81	19,88	19,86±0,04	65
72	19,70	19,84	19,83	19,73	19,83	19,79±0,06	63
96	19,69	19,82	19,78	19,71	19,80	19,76±0,06	66
120	19,63	19,75	19,75	19,66	19,75	19,71±0,06	68
240	19,44	19,57	19,58	19,44	19,57	19,52±0,07	65
360	19,11	19,27	19,28	19,09	19,27	19,20±0,09	63
480	18,94	19,10	19,12	18,89	19,11	19,03±0,11	65
600	18,77	18,96	18,97	18,71	18,96	18,87±0,13	64
720	18,56	18,78	18,79	18,47	18,78	18,68±0,15	65
Radio (m)	0,02						
Área (m ²)	1,33E-03						
Espesor (mm)	3,76						
Presión (kPa)	3167						

Continuación del apéndice 3.

Linealización para determinación de permeabilidad al vapor de agua			
Proporción almidón/glicerina (A/G) 33/67 %			
Formulación	Flujo	Transmisión	Permeabilidad
1	-3,78E-03	-2,824	8,92E-07 ± 9,24E-08
2	-3,54E-03	-2,698	8,52E-07 ± 8,66E-08
3	-2,67E-03	-2,014	6,36E-07 ± 6,53E-08
4	-2,61E-03	-1,983	6,26E-07 ± 6,39E-08
5	-3,10E-03	-2,344	7,40E-07 ± 7,59E-08
Proporción almidón/glicerina (A/G) 50/50 %			
Formulación	Flujo	Transmisión	Permeabilidad
1	-3,56E-03	-2,663	8,41E-07 ± 8,72E-08
2	-2,82E-03	-2,152	6,79E-07 ± 6,91E-08
3	-3,30E-03	-2,489	7,86E-07 ± 8,07E-08
4	-3,04E-03	-2,310	7,30E-07 ± 7,45E-08
5	-3,07E-03	-2,320	7,33E-07 ± 7,51E-08
Proporción almidón/glicerina (A/G) 67/33 %			
Formulación	Flujo	Transmisión	Permeabilidad
1	-2,67E-03	-1,997	6,30E-07 ± 6,53E-08
2	-3,65E-03	-2,781	8,78E-07 ± 8,93E-08
3	-2,73E-03	-2,060	6,51E-07 ± 6,68E-08
4	-3,50E-03	-2,653	8,38E-07 ± 8,55E-08
5	-3,19E-03	-2,410	7,61E-07 ± 7,81E-08

Proporción almidón/urea (A/U) 33/67 %			
Formulación	Flujo	Transmisión	Permeabilidad
1	-3,33E-03	-2,490	7,86E-07 ± 8,15E-08
2	-3,27E-03	-2,489	7,86E-07 ± 7,99E-08
3	-2,35E-03	-1,771	5,59E-07 ± 5,74E-08
4	-2,35E-03	-1,781	5,62E-07 ± 5,74E-08
5	-3,22E-03	-2,434	7,69E-07 ± 7,88E-08
Proporción almidón/urea (A/U) 50/50 %			
Formulación	Flujo	Transmisión	Permeabilidad
1	-2,54E-03	-1,898	5,99E-07 ± 6,21E-08
2	-2,88E-03	-2,193	6,92E-07 ± 7,04E-08
3	-2,42E-03	-1,824	5,76E-07 ± 5,91E-08
4	-2,03E-03	-1,539	4,86E-07 ± 4,96E-08
5	-2,66E-03	-2,009	6,34E-07 ± 6,51E-08
Proporción almidón/urea (A/U) 67/33 %			
Formulación	Flujo	Transmisión	Permeabilidad
1	-4,07E-03	-3,041	9,60E-07 ± 9,95E-08
2	-4,12E-03	-3,143	9,92E-07 ± 1,01E-07
3	-2,23E-03	-1,680	5,31E-07 ± 5,45E-08
4	-1,95E-03	-1,483	4,68E-07 ± 4,78E-08
5	-2,23E-03	-1,684	5,32E-07 ± 5,45E-08

Continuación del apéndice 3.

Proporción almidón/glicerina/urea (A/G/U) 44/33/22 %			
Formulación	Flujo	Transmisión	Permeabilidad
1	-1,87E-03	-1,398	4,42E-07 ± 4,58E-08
2	-1,55E-03	-1,184	3,74E-07 ± 3,80E-08
3	-1,98E-03	-1,491	4,71E-07 ± 4,83E-08
4	-1,85E-03	-1,406	4,44E-07 ± 4,53E-08
5	-1,76E-03	-1,327	4,19E-07 ± 4,30E-08
Proporción almidón/glicerina/urea (A/G/U) 44/28/28 %			
Formulación	Flujo	Transmisión	Permeabilidad
1	-1,93E-03	-1,439	4,54E-07 ± 4,71E-08
2	-2,01E-03	-1,529	4,83E-07 ± 4,91E-08
3	-2,53E-03	-1,910	6,03E-07 ± 6,19E-08
4	-1,89E-03	-1,433	4,53E-07 ± 4,62E-08
5	-2,25E-03	-1,699	5,36E-07 ± 5,50E-08
Proporción almidón/glicerina/urea (A/G/U) 44/22/33 %			
Formulación	Flujo	Transmisión	Permeabilidad
1	-1,96E-03	-1,462	4,62E-07 ± 4,78E-08
2	-1,80E-03	-1,368	4,32E-07 ± 4,39E-08
3	-1,66E-03	-1,249	3,95E-07 ± 4,05E-08
4	-2,12E-03	-1,612	5,09E-07 ± 5,20E-08
5	-1,72E-03	-1,296	4,09E-07 ± 4,20E-08

Cálculo de Permeabilidad al Vapor de Agua	
Formulación	Permeabilidad (g/Pa*h*m²)
Proporción almidón/glicerina 33/67 %	7,49E-07±7,68E-08
Proporción almidón/glicerina 50/50 %	7,54E-07±7,73E-08
Proporción almidón/glicerina 67/33 %	7,52E-07±7,70E-08
Proporción almidón/urea 33/67 %	6,92E-07±7,10E-08
Proporción almidón/urea 50/50 %	5,98E-07±6,13E-08
Proporción almidón/urea 67/33 %	6,97E-07±7,14E-08
Proporción almidón/glicerina/urea 44/33/22 %	4,30E-07±4,41E-08
Proporción almidón/glicerina/urea 44/28/28 %	5,06E-07±5,19E-08
Proporción almidón/glicerina/urea 44/22/33 %	4,41E-07±4,52E-08

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Toma de datos para análisis de desorción

Toma de datos para análisis de desorción - proporción almidón/glicerina 33/67 %							
Tiempo (horas)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	Promedio (g)	h (%)
0	2,43	2,55	2,37	2,45	2,42	2,45±0,06	64
1	2,38	2,50	2,31	2,18	2,09	2,29±0,16	67
2	2,38	2,47	2,29	2,14	2,04	2,26±0,18	62
3	2,37	2,46	2,25	2,12	2,00	2,24±0,19	65
4	2,36	2,42	2,25	2,12	2,00	2,23±0,17	64
5	2,35	2,40	2,23	2,10	2,00	2,22±0,17	66
24	2,17	2,27	2,14	2,03	1,86	2,09±0,16	67
48	2,11	2,17	2,00	1,91	1,73	1,98±0,17	63
72	2,00	2,04	1,87	1,77	1,65	1,87±0,16	66
96	1,93	2,02	1,82	1,71	1,63	1,82±0,16	62
120	1,90	1,98	1,79	1,69	1,61	1,80±0,15	67
240	1,90	1,96	1,79	1,69	1,61	1,79±0,15	63
360	1,90	1,96	1,79	1,69	1,61	1,79±0,14	65
480	1,90	1,96	1,79	1,69	1,61	1,79±0,14	63
600	1,90	1,96	1,79	1,69	1,61	1,79±0,14	65
720	1,90	1,96	1,79	1,69	1,61	1,79±0,14	67

Continuación del apéndice 4.

Toma de datos para análisis de desorción - proporción almidón/glicerina 50/50 %							
Tiempo (horas)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	Promedio (g)	h (%)
0	2,32	2,43	2,51	2,51	2,42	2,44±0,08	64
1	2,22	2,37	2,41	2,42	2,37	2,36±0,08	67
2	2,19	2,34	2,39	2,38	2,33	2,33±0,08	62
3	2,17	2,30	2,32	2,37	2,31	2,29±0,07	65
4	2,16	2,26	2,32	2,33	2,31	2,28±0,07	64
5	2,11	2,26	2,29	2,32	2,30	2,25±0,08	66
24	1,85	1,91	2,05	2,01	1,98	1,96±0,08	67
48	1,69	1,75	1,87	1,87	1,81	1,80±0,08	63
72	1,58	1,67	1,80	1,81	1,73	1,72±0,09	66
96	1,53	1,66	1,77	1,78	1,68	1,69±0,10	62
120	1,54	1,64	1,74	1,78	1,67	1,67±0,09	67
240	1,49	1,64	1,74	1,75	1,64	1,65±0,10	63
360	1,49	1,64	1,74	1,75	1,64	1,65±0,10	65
480	1,49	1,64	1,74	1,75	1,64	1,65±0,10	63
600	1,49	1,64	1,74	1,75	1,64	1,65±0,10	65
720	1,49	1,64	1,74	1,75	1,64	1,65±0,10	67

Continuación del apéndice 4.

Toma de datos para análisis de desorción - proporción almidón/glicerina 67/33 %							
Tiempo (horas)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	Promedio (g)	h (%)
0	2,48	2,37	2,43	2,37	2,42	2,41±0,05	64
1	2,39	2,29	2,30	2,32	2,37	2,33±0,05	67
2	2,31	2,19	2,25	2,31	2,35	2,28±0,06	62
3	2,29	2,14	2,19	2,23	2,33	2,24±0,08	65
4	2,21	2,04	2,15	2,20	2,25	2,17±0,08	64
5	2,18	2,01	2,10	2,19	2,20	2,14±0,08	66
24	1,95	1,94	1,87	1,67	2,00	1,89±0,13	67
48	1,81	1,79	1,77	1,58	1,85	1,76±0,11	63
72	1,77	1,72	1,74	1,53	1,84	1,72±0,12	66
96	1,72	1,71	1,74	1,53	1,81	1,70±0,10	62
120	1,72	1,69	1,74	1,51	1,80	1,69±0,11	67
240	1,71	1,69	1,73	1,51	1,80	1,69±0,11	63
360	1,71	1,68	1,73	1,50	1,80	1,69±0,11	65
480	1,71	1,68	1,73	1,50	1,80	1,69±0,11	63
600	1,71	1,68	1,73	1,50	1,80	1,69±0,11	65
720	1,71	1,68	1,73	1,50	1,80	1,69±0,11	67

Continuación del apéndice 4.

Toma de datos para análisis de desorción - proporción almidón/urea 33/67 %							
Tiempo (horas)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	Promedio (g)	h (%)
0	2,40	2,46	2,44	2,39	2,44	2,42±0,03	64
1	2,30	2,38	2,36	2,32	2,37	2,34±0,03	67
2	2,29	2,37	2,33	2,30	2,33	2,33±0,03	62
3	2,29	2,37	2,33	2,29	2,32	2,32±0,03	65
4	2,27	2,36	2,32	2,27	2,31	2,31±0,03	64
5	2,25	2,33	2,31	2,25	2,29	2,29±0,04	66
24	2,18	2,15	2,18	2,07	2,16	2,15±0,05	67
48	1,94	2,02	2,05	1,93	2,02	1,99±0,05	63
72	1,77	1,90	1,93	1,79	1,88	1,85±0,07	66
96	1,72	1,83	1,85	1,73	1,80	1,79±0,06	62
120	1,70	1,82	1,82	1,72	1,77	1,76±0,06	67
240	1,67	1,80	1,81	1,69	1,76	1,75±0,06	63
360	1,67	1,80	1,81	1,69	1,76	1,75±0,06	65
480	1,67	1,80	1,81	1,69	1,76	1,75±0,06	63
600	1,67	1,80	1,81	1,69	1,76	1,75±0,06	65
720	1,67	1,80	1,81	1,69	1,76	1,75±0,06	67

Continuación del apéndice 4.

Toma de datos para análisis de desorción - proporción almidón/urea 50/50 %							
Tiempo (horas)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	Promedio (g)	h (%)
0	2,49	2,48	2,40	2,54	2,53	2,49±0,06	64
1	2,30	2,36	2,28	2,40	2,43	2,35±0,06	67
2	2,23	2,34	2,24	2,39	2,29	2,30±0,07	62
3	2,18	2,27	2,20	2,36	2,21	2,24±0,07	65
4	2,17	2,22	2,17	2,33	2,13	2,20±0,08	64
5	2,15	2,20	2,14	2,31	2,11	2,18±0,08	66
24	1,95	1,94	1,85	2,00	1,89	1,92±0,06	67
48	1,89	1,82	1,68	1,76	1,78	1,79±0,08	63
72	1,84	1,75	1,63	1,67	1,74	1,73±0,08	66
96	1,84	1,74	1,62	1,64	1,74	1,71±0,09	62
120	1,84	1,74	1,61	1,63	1,73	1,71±0,09	67
240	1,83	1,74	1,60	1,63	1,73	1,70±0,09	63
360	1,83	1,73	1,60	1,63	1,73	1,70±0,09	65
480	1,83	1,73	1,60	1,63	1,73	1,70±0,09	63
600	1,83	1,73	1,60	1,63	1,73	1,70±0,09	65
720	1,83	1,73	1,60	1,63	1,73	1,70±0,09	67

Continuación del apéndice 4.

Toma de datos para análisis de desorción - proporción almidón/urea 67/33 %							
Tiempo (horas)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	Promedio (g)	h (%)
0	2,44	2,53	2,50	2,51	2,44	2,48±0,04	65
1	2,31	2,45	2,37	2,30	2,35	2,36±0,06	63
2	2,26	2,41	2,31	2,24	2,32	2,31±0,07	66
3	2,23	2,38	2,26	2,23	2,29	2,28±0,06	68
4	2,18	2,29	2,15	2,17	2,25	2,21±0,06	63
5	2,17	2,26	2,14	2,15	2,23	2,19±0,05	65
24	1,91	2,00	1,91	1,97	1,84	1,93±0,06	66
48	1,73	1,85	1,79	1,90	1,78	1,81±0,07	63
72	1,64	1,80	1,74	1,85	1,75	1,76±0,08	65
96	1,61	1,78	1,72	1,85	1,74	1,74±0,09	65
120	1,59	1,77	1,71	1,84	1,74	1,73±0,09	66
240	1,57	1,75	1,71	1,82	1,73	1,72±0,09	63
360	1,56	1,75	1,71	1,82	1,73	1,72±0,05	65
480	1,56	1,75	1,71	1,82	1,73	1,72±0,05	66
600	1,56	1,75	1,71	1,82	1,73	1,72±0,05	64
720	1,56	1,75	1,71	1,82	1,73	1,72±0,05	63

Continuación apéndice 4.

Toma de datos para análisis de desorción - Proporción almidón/glicerina/urea 44/33/22 %							
Tiempo (horas)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	Promedio (g)	h (%)
0	2,51	2,47	2,49	2,40	2,51	2,48±0,05	65
1	2,35	2,33	2,32	2,23	2,38	2,32±0,06	63
2	2,23	2,29	2,27	2,16	2,38	2,27±0,08	66
3	2,17	2,26	2,21	2,15	2,33	2,22±0,07	68
4	2,14	2,26	2,20	2,14	2,28	2,2±0,06	63
5	2,12	2,23	2,11	2,13	2,26	2,17±0,07	65
24	1,88	2,09	2,02	1,96	2,02	2,00±0,08	66
48	1,72	1,92	1,85	1,73	1,85	1,81±0,09	63
72	1,61	1,80	1,72	1,68	1,78	1,72±0,08	65
96	1,59	1,76	1,71	1,66	1,75	1,69±0,07	65
120	1,57	1,73	1,67	1,64	1,73	1,67±0,07	66
240	1,54	1,73	1,65	1,60	1,73	1,65±0,08	63
360	1,54	1,73	1,65	1,60	1,73	1,65±0,08	65
480	1,54	1,73	1,65	1,60	1,73	1,65±0,08	66
600	1,54	1,73	1,65	1,60	1,73	1,65±0,08	64
720	1,54	1,73	1,65	1,60	1,73	1,65±0,08	63

Continuación del apéndice 4.

Toma de datos para análisis de desorción - Proporción almidón/glicerina/urea 44/28/28 %							
Tiempo (horas)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	Promedio (g)	h (%)
0	2,44	2,53	2,48	2,62	2,54	2,52±0,07	65
1	2,39	2,48	2,34	2,46	2,31	2,40±0,08	63
2	2,37	2,47	2,31	2,38	2,30	2,37±0,07	66
3	2,32	2,46	2,24	2,26	2,29	2,31±0,09	68
4	2,31	2,43	2,26	2,25	2,20	2,29±0,09	63
5	2,28	2,41	2,24	2,23	2,20	2,27±0,08	65
24	1,92	2,04	2,03	1,95	2,15	2,02±0,09	66
48	1,85	1,96	2,02	1,88	2,08	1,96±0,10	63
72	1,82	1,94	1,97	1,86	2,07	1,93±0,10	65
96	1,82	1,92	1,97	1,85	2,05	1,92±0,09	65
120	1,80	1,90	1,96	1,83	2,03	1,90±0,09	66
240	1,78	1,90	1,95	1,80	2,03	1,89±0,10	63
360	1,78	1,90	1,95	1,80	2,03	1,89±0,10	65
480	1,78	1,90	1,95	1,80	2,03	1,89±0,10	66
600	1,78	1,90	1,95	1,80	2,03	1,89±0,10	64
720	1,78	1,90	1,95	1,80	2,03	1,89±0,10	63

Continuación del apéndice 4.

Toma de datos para análisis de desorción - proporción almidón/glicerina/urea 44/22/33 %							
Tiempo (horas)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	Promedio (g)	h (%)
0	2,57	2,56	2,57	2,50	2,49	2,54±0,04	65
1	2,49	2,48	2,42	2,39	2,37	2,43±0,06	63
2	2,46	2,47	2,40	2,36	2,36	2,41±0,05	66
3	2,45	2,44	2,39	2,33	2,34	2,39±0,05	68
4	2,42	2,43	2,31	2,32	2,34	2,36±0,05	63
5	2,39	2,41	2,30	2,22	2,31	2,33±0,08	65
24	2,12	2,17	2,05	2,01	2,04	2,08±0,07	66
48	2,12	2,10	2,02	1,93	1,93	2,02±0,09	63
72	2,08	2,08	1,97	1,86	1,89	1,98±0,09	65
96	2,06	2,04	1,96	1,88	1,88	1,97±0,09	65
120	2,05	2,03	1,96	1,86	1,86	1,95±0,09	66
240	2,05	2,01	1,95	1,85	1,82	1,94±0,10	63
360	2,05	2,01	1,95	1,85	1,82	1,94±0,10	65
480	2,05	2,01	1,95	1,85	1,82	1,94±0,10	66
600	2,05	2,01	1,95	1,85	1,82	1,94±0,10	64
720	2,05	2,01	1,95	1,85	1,82	1,94±0,10	63

Continuación del apéndice 4.

Cálculo de pérdida de humedad - proporción almidón/glicerina 33/67 %						
Tiempo (horas)	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	Promedio
5	0,03	0,06	0,07	0,17	0,21	0,11±0,08
24	0,12	0,12	0,11	0,21	0,30	0,17±0,08
48	0,15	0,17	0,19	0,29	0,40	0,24±0,10
72	0,22	0,25	0,27	0,38	0,47	0,32±0,10
96	0,26	0,26	0,30	0,43	0,49	0,35±0,11
120	0,28	0,29	0,32	0,45	0,50	0,37±0,10
240	0,28	0,30	0,33	0,45	0,51	0,37±0,10
360	0,28	0,30	0,33	0,45	0,51	0,37±0,10
480	0,28	0,30	0,33	0,45	0,51	0,37±0,10
600	0,28	0,30	0,33	0,45	0,51	0,37±0,10
720	0,28	0,30	0,33	0,45	0,51	0,37±0,10

Cálculo de pérdida de humedad - proporción almidón/glicerina 50/50 %						
Tiempo (horas)	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	Promedio
5	0,10	0,08	0,10	0,08	0,05	0,08±0,02
24	0,26	0,27	0,23	0,25	0,22	0,25±0,02
48	0,38	0,39	0,35	0,34	0,34	0,36±0,02
72	0,47	0,45	0,40	0,39	0,40	0,42±0,04
96	0,52	0,46	0,42	0,41	0,44	0,45±0,04
120	0,51	0,48	0,44	0,41	0,45	0,46±0,04
240	0,56	0,48	0,44	0,44	0,48	0,48±0,05
360	0,56	0,48	0,44	0,44	0,48	0,48±0,05
480	0,56	0,48	0,44	0,44	0,48	0,48±0,05
600	0,56	0,48	0,44	0,44	0,48	0,48±0,05
720	0,56	0,48	0,44	0,44	0,48	0,48±0,05

Cálculo de pérdida de humedad - proporción almidón/glicerina 67/33 %						
Tiempo (horas)	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	Promedio
5	0,14	0,18	0,15	0,08	0,10	0,13±0,04
24	0,27	0,22	0,30	0,42	0,21	0,28±0,08
48	0,37	0,33	0,37	0,50	0,31	0,38±0,08
72	0,41	0,38	0,39	0,55	0,32	0,41±0,09
96	0,44	0,39	0,39	0,55	0,34	0,42±0,08
120	0,45	0,41	0,40	0,57	0,34	0,43±0,08
240	0,45	0,41	0,40	0,57	0,34	0,44±0,09
360	0,45	0,41	0,40	0,58	0,34	0,44±0,09
480	0,45	0,41	0,40	0,58	0,34	0,44±0,09
600	0,45	0,41	0,40	0,58	0,34	0,44±0,09

Continuación del apéndice 4.

Cálculo de pérdida de humedad - proporción almidón/urea 33/67 %						
Tiempo (horas)	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	Promedio
5	0,07	0,05	0,06	0,06	0,07	0,06±0,01
24	0,10	0,14	0,12	0,16	0,13	0,13±0,02
48	0,24	0,22	0,19	0,24	0,21	0,22±0,02
72	0,36	0,30	0,27	0,33	0,29	0,31±0,04
96	0,39	0,34	0,32	0,38	0,35	0,36±0,03
120	0,41	0,35	0,34	0,39	0,38	0,37±0,03
240	0,43	0,36	0,35	0,42	0,39	0,39±0,04
360	0,43	0,36	0,35	0,42	0,39	0,39±0,04
480	0,43	0,36	0,35	0,42	0,39	0,39±0,04
600	0,43	0,36	0,35	0,42	0,39	0,39±0,04
720	0,43	0,36	0,35	0,42	0,39	0,39±0,04

Cálculo de pérdida de humedad - proporción almidón/urea 50/50 %						
Tiempo (horas)	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	Promedio
5	0,15	0,13	0,12	0,10	0,20	0,14±0,04
24	0,28	0,28	0,30	0,28	0,34	0,29±0,03
48	0,32	0,37	0,43	0,45	0,42	0,40±0,05
72	0,35	0,42	0,47	0,52	0,45	0,44±0,06
96	0,35	0,43	0,49	0,55	0,46	0,45±0,07
120	0,35	0,43	0,49	0,56	0,46	0,46±0,08
240	0,36	0,43	0,50	0,56	0,46	0,46±0,08
360	0,36	0,44	0,50	0,56	0,46	0,46±0,08
480	0,36	0,44	0,50	0,56	0,46	0,46±0,08
600	0,36	0,44	0,50	0,56	0,46	0,46±0,08
720	0,36	0,44	0,50	0,56	0,46	0,46±0,08

Cálculo de pérdida de humedad - proporción almidón/urea 67/33 %						
Tiempo (horas)	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	Promedio
5	0,13	0,12	0,17	0,16	0,09	0,13±0,03
24	0,28	0,27	0,31	0,27	0,33	0,29±0,03
48	0,42	0,37	0,39	0,32	0,37	0,37±0,04
72	0,49	0,41	0,43	0,36	0,40	0,42±0,05
96	0,52	0,42	0,45	0,36	0,40	0,43±0,06
120	0,54	0,43	0,46	0,36	0,40	0,44±0,06
240	0,55	0,45	0,46	0,37	0,41	0,45±0,07
360	0,57	0,45	0,46	0,37	0,41	0,45±0,07
480	0,57	0,45	0,46	0,37	0,41	0,45±0,07
600	0,57	0,45	0,46	0,37	0,41	0,45±0,07
720	0,57	0,45	0,46	0,37	0,41	0,45±0,07

Continuación del apéndice 4.

Cálculo de pérdida de humedad - Proporción almidón/glicerina/urea 44/33/22 %						
Tiempo (horas)	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	Promedio
5	0,18	0,11	0,18	0,12	0,11	0,14±0,04
24	0,33	0,18	0,23	0,22	0,25	0,24±0,05
48	0,46	0,29	0,35	0,38	0,36	0,37±0,06
72	0,56	0,37	0,44	0,43	0,41	0,44±0,07
96	0,58	0,41	0,45	0,45	0,44	0,47±0,07
120	0,60	0,43	0,49	0,46	0,45	0,49±0,07
240	0,63	0,43	0,50	0,50	0,45	0,50±0,08
360	0,63	0,43	0,50	0,50	0,45	0,50±0,08
480	0,63	0,43	0,50	0,50	0,45	0,50±0,08
600	0,63	0,43	0,50	0,50	0,45	0,50±0,08
720	0,63	0,43	0,50	0,50	0,45	0,50±0,08

Cálculo de pérdida de humedad - Proporción almidón/glicerina/urea 44/28/28 %						
Tiempo (horas)	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	Promedio
5	0,07	0,05	0,11	0,17	0,16	0,11±0,05
24	0,27	0,24	0,22	0,34	0,18	0,25±0,06
48	0,32	0,29	0,23	0,39	0,22	0,29±0,07
72	0,34	0,31	0,26	0,41	0,23	0,31±0,07
96	0,34	0,32	0,26	0,42	0,24	0,32±0,07
120	0,35	0,33	0,27	0,43	0,25	0,33±0,07
240	0,37	0,33	0,27	0,45	0,25	0,34±0,08
360	0,37	0,33	0,28	0,45	0,25	0,34±0,08
480	0,37	0,33	0,28	0,45	0,25	0,34±0,08
600	0,37	0,33	0,28	0,45	0,25	0,34±0,08
720	0,37	0,33	0,28	0,45	0,25	0,34±0,08

Cálculo de pérdida de humedad - proporción almidón/glicerina/urea 44/22/33 %						
Tiempo (horas)	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	Promedio
5	0,08	0,06	0,11	0,12	0,08	0,09±0,03
24	0,21	0,18	0,25	0,24	0,22	0,22±0,03
48	0,21	0,22	0,27	0,29	0,29	0,26±0,04
72	0,24	0,23	0,31	0,34	0,32	0,29±0,05
96	0,25	0,25	0,31	0,33	0,33	0,29±0,04
120	0,25	0,26	0,31	0,34	0,34	0,30±0,04
240	0,25	0,27	0,31	0,35	0,37	0,31±0,05
360	0,25	0,28	0,31	0,35	0,37	0,31±0,05
480	0,25	0,28	0,31	0,35	0,37	0,31±0,05
600	0,25	0,28	0,31	0,35	0,37	0,31±0,05
720	0,25	0,28	0,31	0,35	0,37	0,31±0,05

Continuación del apéndice 4.

Cálculo de datos para linealización para modelo de Peleg - proporción almidón/glicerina 33/67 %					
Tiempo (h)	$(t/Mt-Mi)_1$	$(t/Mt-Mi)_2$	$(t/Mt-Mi)_3$	$(t/Mt-Mi)_4$	$(t/Mt-Mi)_5$
24	282,02	383,06	529,17	615,41	264,35
48	397,77	423,37	397,27	404,70	261,91
72	390,77	387,63	356,66	332,63	286,07
96	427,48	472,79	405,71	360,13	348,98
120	489,64	533,98	464,40	424,53	412,65
240	979,27	1000,75	915,68	836,36	822,66
360	1460,89	1501,12	1373,52	1250,77	1234,00
480	1947,85	2001,50	1826,18	1667,70	1645,33
600	2434,81	2501,87	2282,73	2084,62	2056,66
720	2921,77	3002,24	2739,28	2501,55	2467,99
Cálculo de datos para linealización para modelo de Peleg - proporción almidón/glicerina 50/50 %					
Tiempo (h)	$(t/Mt-Mi)_1$	$(t/Mt-Mi)_2$	$(t/Mt-Mi)_3$	$(t/Mt-Mi)_4$	$(t/Mt-Mi)_5$
24	154,72	121,37	183,48	147,60	141,34
48	174,22	155,34	193,73	186,11	168,58
72	195,35	192,30	239,30	238,11	206,26
96	229,93	250,56	297,95	296,87	248,31
120	292,95	299,33	346,16	367,49	301,64
240	522,55	598,65	692,32	679,51	567,91
360	783,83	897,98	1038,48	1019,26	851,87
480	1045,10	1197,30	1384,64	1359,01	1135,82
600	1306,38	1496,63	1730,80	1698,77	1419,78
720	1567,65	1795,96	2076,96	2038,52	1703,73

Continuación del apéndice 4.

Cálculo de datos para linealización para modelo de Peleg - proporción almidón/glicerina 67/33 %					
Tiempo (h)	$(t/Mt-Mi)_1$	$(t/Mt-Mi)_2$	$(t/Mt-Mi)_3$	$(t/Mt-Mi)_4$	$(t/Mt-Mi)_5$
24	179,44	576,66	168,55	72,15	215,63
48	203,28	335,16	222,01	114,09	228,13
72	267,43	371,28	302,26	153,51	332,06
96	315,48	460,57	403,01	204,68	399,71
120	385,82	535,50	488,94	248,77	496,87
240	761,29	1063,09	965,15	491,19	990,07
360	1141,94	1588,76	1447,73	730,54	1485,10
480	1522,58	2118,35	1930,31	974,05	1980,14
600	1903,23	2647,93	2412,89	1217,56	2475,17
720	2283,87	3177,52	2895,46	1461,07	2970,20
Cálculo de datos para linealización para modelo de Peleg - proporción almidón/urea 33/67 %					
Tiempo (h)	$(t/Mt-Mi)_1$	$(t/Mt-Mi)_2$	$(t/Mt-Mi)_3$	$(t/Mt-Mi)_4$	$(t/Mt-Mi)_5$
24	744,08	271,06	403,25	251,27	399,66
48	284,58	294,26	362,31	272,16	342,21
72	249,33	295,91	344,41	262,92	315,83
96	294,69	331,77	370,77	303,64	335,55
120	349,90	407,46	418,90	362,97	384,51
240	656,29	777,46	831,98	675,37	750,19
360	979,84	1166,19	1240,62	1013,06	1122,80
480	1306,45	1554,92	1654,16	1350,75	1497,07
600	1633,06	1943,65	2067,70	1688,43	1871,33
720	1959,68	2332,38	2481,24	2026,12	2245,60

Continuación del apéndice 4.

Cálculo de datos para linealización para modelo de Peleg - proporción almidón/urea 50/50 %					
Tiempo (h)	$(t/Mt-Mi)_1$	$(t/Mt-Mi)_2$	$(t/Mt-Mi)_3$	$(t/Mt-Mi)_4$	$(t/Mt-Mi)_5$
24	197,36	154,67	132,92	138,45	174,64
48	296,58	198,95	156,24	138,82	218,39
72	361,66	243,84	205,72	170,85	283,78
96	479,02	319,81	262,04	214,58	371,68
120	598,56	399,76	320,27	262,11	457,15
240	1175,00	790,86	631,11	522,04	905,55
360	1756,11	1160,98	939,71	783,06	1358,32
480	2341,48	1547,97	1252,95	1044,07	1811,10
600	2926,85	1934,96	1566,19	1305,09	2263,87
720	3512,22	2321,96	1879,43	1566,11	2716,64
Cálculo de datos para linealización para modelo de Peleg - proporción almidón/urea 67/33 %					
Tiempo (h)	$(t/Mt-Mi)_1$	$(t/Mt-Mi)_2$	$(t/Mt-Mi)_3$	$(t/Mt-Mi)_4$	$(t/Mt-Mi)_5$
24	157,82	165,18	171,44	223,52	102,58
48	166,78	193,81	212,30	312,80	170,82
72	198,87	252,13	272,25	373,75	237,63
96	245,68	318,59	339,51	492,69	307,86
120	294,16	387,92	410,84	604,41	384,83
240	566,64	737,01	821,68	1140,22	759,78
360	813,56	1105,51	1232,51	1710,32	1139,67
480	1084,75	1474,02	1643,35	2280,43	1519,56
600	1355,93	1842,52	2054,19	2850,54	1899,45
720	1627,12	2211,03	2465,03	3420,65	2279,34

Continuación del apéndice 4.

Cálculo de datos para linealización para modelo de Peleg - Proporción almidón/glicerina/urea 44/33/22 %					
Tiempo (h)	$(t/Mt-Mi)_1$	$(t/Mt-Mi)_2$	$(t/Mt-Mi)_3$	$(t/Mt-Mi)_4$	$(t/Mt-Mi)_5$
24	160,08	324,80	453,64	244,71	179,82
48	170,57	267,71	285,53	185,17	193,44
72	192,52	272,97	272,36	237,77	238,61
96	239,64	321,97	351,95	295,97	296,61
120	286,57	373,22	385,50	357,34	351,82
240	540,99	746,44	735,54	631,70	703,63
360	811,48	1119,67	1103,31	947,55	1055,45
480	1081,97	1492,89	1471,08	1263,41	1407,27
600	1352,47	1866,11	1838,85	1579,26	1759,09
720	1622,96	2239,33	2206,62	1895,11	2110,90
Cálculo de datos para linealización para modelo de Peleg - Proporción almidón/glicerina/urea 44/28/28 %					
Tiempo (h)	$(t/Mt-Mi)_1$	$(t/Mt-Mi)_2$	$(t/Mt-Mi)_3$	$(t/Mt-Mi)_4$	$(t/Mt-Mi)_5$
24	120,46	124,64	216,33	142,49	972,37
48	194,10	198,63	404,02	217,54	739,37
72	265,95	281,60	476,46	309,50	1000,09
96	350,45	354,64	631,80	397,08	1111,24
120	422,77	427,91	763,82	469,33	1213,41
240	798,60	855,81	1466,88	867,93	2426,82
360	1197,90	1283,72	2182,85	1295,49	3640,23
480	1597,20	1711,62	2910,46	1727,31	4853,64
600	1996,50	2139,53	3638,08	2159,14	6067,05
720	2395,80	2567,44	4365,69	2590,97	7280,46

Continuación del apéndice 4.

Cálculo de datos para linealización para modelo de Peleg – proporción almidón/glicerina/urea 44/22/33 %					
Tiempo (h)	(t/Mt-Mi) ₁	(t/Mt-Mi) ₂	(t/Mt-Mi) ₃	(t/Mt-Mi) ₄	(t/Mt-Mi) ₅
24	176,32	210,27	175,25	204,66	168,99
48	351,17	306,28	300,52	284,80	226,80
72	453,77	423,57	374,71	332,41	306,37
96	558,21	507,84	494,66	476,89	389,93
120	681,34	611,88	603,76	550,53	461,96
240	1357,98	1150,36	1203,45	1061,79	840,71
360	2036,97	1708,21	1805,18	1592,69	1257,40
480	2715,96	2277,61	2406,91	2123,59	1675,11
600	3394,95	2847,01	3008,63	2654,48	2093,88
720	4073,94	3416,42	3610,36	3185,38	2512,66
Constantes de Modelo de Peleg					
Formulación / Variación	K1	K2	R2	Humedad promedio (%)	
Proporción almidón/glicerina 33/67 %	88,37	3,52	0,99	64,7±1,48	
Proporción almidón/glicerina 50/50 %	51,85	2,38	0,99		
Proporción almidón/glicerina 67/33 %	46,20	3,39	0,99		
Proporción almidón/urea 33/67 %	75,50	2,85	0,99		
Proporción almidón/urea 50/50 %	46,48	3,15	0,99		
Proporción almidón/urea 67/33 %	55,61	3,15	0,99		
Proporción almidón/glicerina/urea 44/33/22 %	61,06	2,62	0,99		
Proporción almidón/glicerina/urea 44/28/28 %	96,30	5,05	0,99		
Proporción almidón/glicerina/urea 44/22/33 %	70,75	4,45	0,99		

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Análisis de tensión al rompimiento

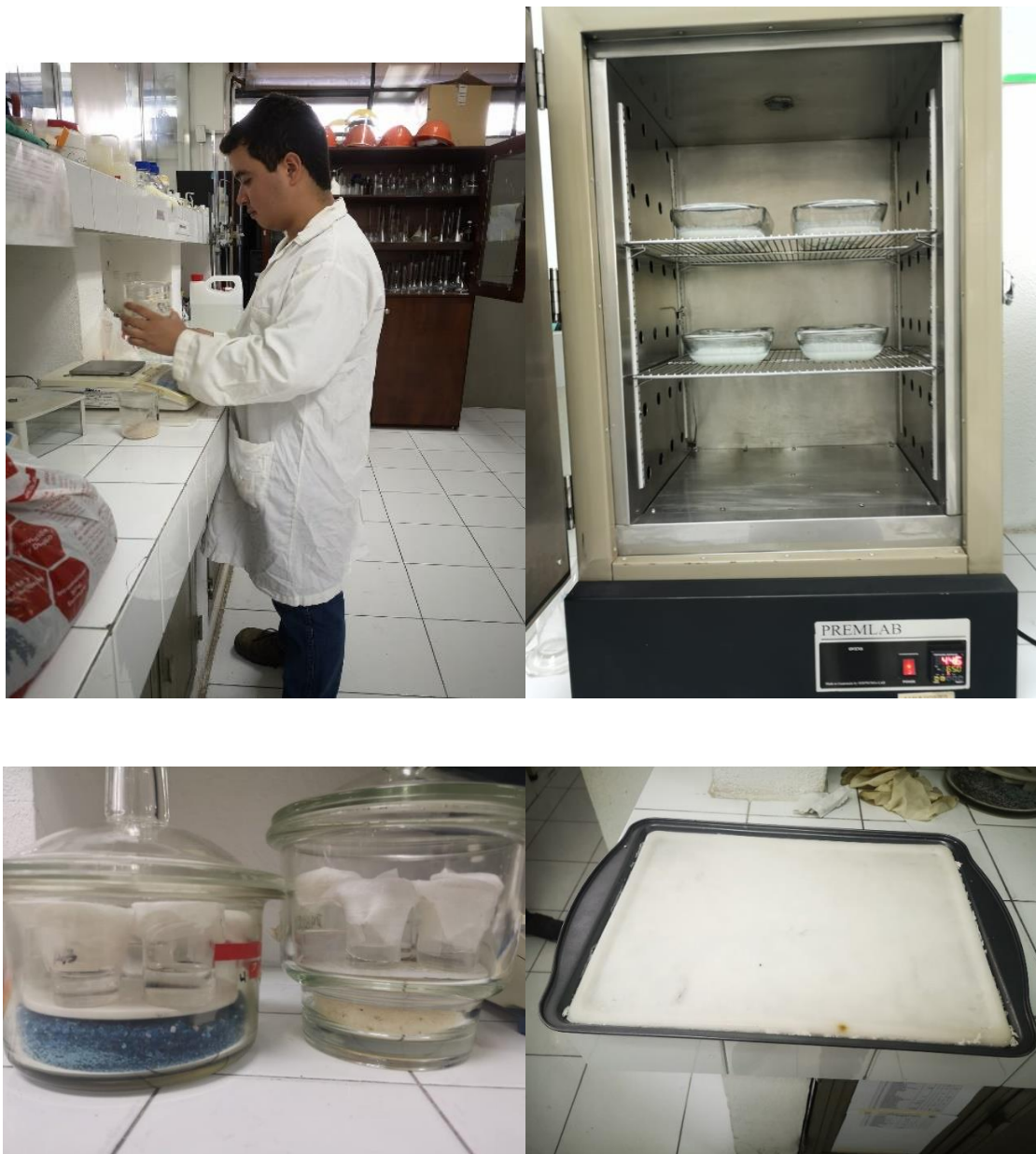
Análisis de tensión al rompimiento (MPa)						
No.	1	2	3	4	5	Promedio
Proporción almidón/glicerina 33/67 %	0,24	0,22	0,23	0,2	0,23	0,22±0,01
Proporción almidón/glicerina 50/50 %	0,28	0,26	0,26	0,17	0,17	0,23±0,04
Proporción almidón/glicerina 67/33 %	0,26	0,24	0,23	0,21	0,2	0,23±0,02
Proporción almidón/urea 33/67 %	0,41	0,36	0,32	0,39	0,39	0,37±0,03
Proporción almidón/urea 50/50 %	0,47	0,37	0,38	0,35	0,37	0,39±0,04
Proporción almidón/urea 67/33 %	0,46	0,45	0,45	0,42	0,4	0,44±0,02
Proporción almidón/glicerina/urea 44/33/22 %	0,24	0,29	0,22	0,17	0,24	0,23±0,04
Proporción almidón/glicerina/urea 44/28/28 %	0,32	0,35	0,41	0,3	0,34	0,35±0,04
Proporción almidón/glicerina/urea 44/22/33 %	0,38	0,33	0,45	0,54	0,4	0,42±0,07
Porcentaje de elongación (%)						
Proporción almidón/glicerina 33/67 %	530	557	563	570	510	546
Proporción almidón/glicerina 50/50 %	503	510	529	490	472	500
Proporción almidón/glicerina 67/33 %	503	482	498	521	470	495
Proporción almidón/urea 33/67 %	203	224	247	261	203	228
Proporción almidón/urea 50/50 %	189	243	212	248	203	219
Proporción almidón/urea 67/33 %	181	176	203	199	230	198
Proporción almidón/glicerina/urea 44/33/22 %	497	448	514	482	502	489
Proporción almidón/glicerina/urea 44/28/28 %	518	360	381	377	424	412
Proporción almidón/glicerina/urea 44/22/33 %	265	283	283	282	276	278

Fuente: elaboración propia.

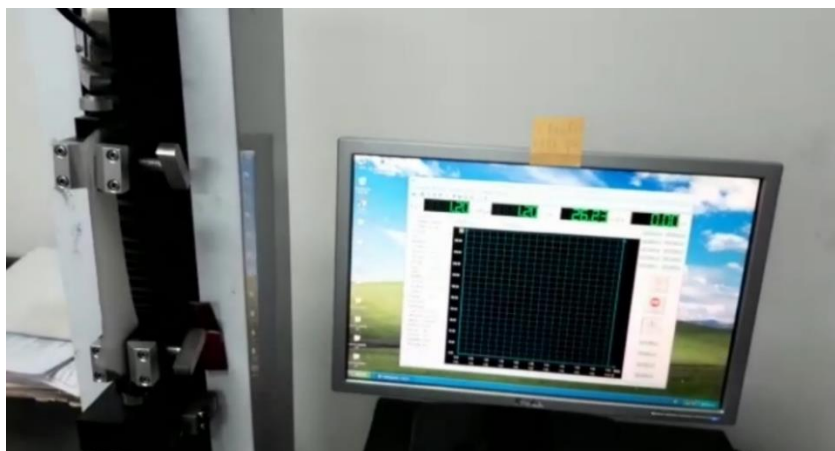
Apéndice 6. **Fotografías del desarrollo experimental**



Continuación del apéndice 6.



Continuación del apéndice 6.



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Norma ASTM E96/E96M – 16

**Designation: E96/E96M – 16**

**Standard Test Methods for
Water Vapor Transmission of Materials¹**

This standard is issued under the fixed designation E96/E96M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.

1. Scope

1.1 These test methods cover the determination of water vapor transmission (WVT) of materials through which the passage of water vapor may be of importance, such as paper, plastic films, other sheet materials, fiberboards, gypsum and plaster products, wood products, and plastics. The test methods are limited to specimens not over 1¼ in. [32 mm] in thickness except as provided in Section 9. Two basic methods, the Desiccant Method and the Water Method, are provided for the measurement of permeance, and two variations include service conditions with one side wetted and service conditions with low humidity on one side and high humidity on the other. Agreement should not be expected between results obtained by different methods. The method should be selected that more nearly approaches the conditions of use.

1.2 The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. The values stated in each system may not be exact equivalents; therefore, each system shall be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in non-conformance with the standard. However, derived results can be converted from one system to the other using appropriate conversion factors (see Table 1).

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety problems, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*²
C168 Terminology Relating to Thermal Insulation

C1809 Practice for Preparation of Specimens and Reporting of Results for Permeance Testing of Pressure Sensitive Adhesive Sealed Joints in Insulation Vapor Retarders
D449/D449M Specification for Asphalt Used in Dampproofing and Waterproofing
D2301 Specification for Vinyl Chloride Plastic Pressure-Sensitive Electrical Insulating Tape
E177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods
E691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

3. Terminology

3.1 Definitions of terms used in this standard will be found in Terminology C168, from which the following is quoted:

*“water vapor permeability—*the time rate of water vapor transmission through unit area of flat material of unit thickness induced by unit vapor pressure difference between two specific surfaces, under specified temperature and humidity conditions.

*Discussion—*Permeability is a property of a material, but the permeability of a body that performs like a material may be used. Permeability is the arithmetic product of permeance and thickness.

*water vapor permeance—*the time rate of water vapor transmission through unit area of flat material or construction induced by unit vapor pressure difference between two specific surfaces, under specified temperature and humidity conditions.

*Discussion—*Permeance is a performance evaluation and not a property of a material.

3.2 *water vapor transmission rate—*the steady water vapor flow in unit time through unit area of a body, normal to specific parallel surfaces, under specific conditions of temperature and humidity at each surface.”

4. Summary of Test Methods

4.1 In the Desiccant Method the test specimen is sealed to the open mouth of a test dish containing a desiccant, and the assembly placed in a controlled atmosphere. Periodic weighings determine the rate of water vapor movement through the specimen into the desiccant.

4.2 In the Water Method, the dish contains distilled water, and the weighings determine the rate of vapor movement

¹ These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee C16 on Thermal Insulation and are the direct responsibility of Subcommittee C16.33 on Insulation Finishes and Moisture.

Current edition approved March 1, 2016. Published April 2016. Originally approved in 1953. Last previous edition approved in 2015 as E96/E96M – 15. DOI: 10.1520/E0096_E0096M-16.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States

1

Continuación del anexo 1.

E96/E96M - 16

TABLE 1 Metric Units and Conversion Factors^{A,B}

Multiply	by	To Obtain (for the same test condition)
WVT		
g/h·m ²	1.43	grains/h·ft ²
grains/h·ft ²	0.697	g/h·m ²
Permeance		
g/Pa·s·m ²	1.75 × 10 ⁷	1 Perm (inch-pound)
1 Perm (inch-pound)	5.72 × 10 ⁻⁸	g/Pa·s·m ²
Permeability		
g/Pa·s·m	6.88 × 10 ⁸	1 Perm inch
1 Perm inch	1.45 × 10 ⁻⁹	g/Pa·s·m

^A These units are used in the construction trade. Other units may be used in other standards.

^B All conversions of mm Hg to Pa are made at a temperature of 0°C.

through the specimen from the water to the controlled atmosphere. The vapor pressure difference is nominally the same in both methods except in the variation, with extremes of humidity on opposite sides.

5. Significance and Use

5.1 The purpose of these tests is to obtain, by means of simple apparatus, reliable values of water vapor transfer through permeable and semipermeable materials, expressed in suitable units. These values are for use in design, manufacture, and marketing. A permeance value obtained under one set of test conditions may not indicate the value under a different set of conditions. For this reason, the test conditions should be selected that most closely approach the conditions of use. While any set of conditions may be used and those conditions reported, standard conditions that have been useful are shown in [Appendix X1](#).

6. Apparatus

6.1 **Test Dish**—The test dish shall be of any noncorroding material, impermeable to water or water vapor. It may be of any shape. Light weight is desirable. A large, shallow dish is preferred, but its size and weight are limited when an analytical balance is chosen to detect small weight changes. The mouth of the dish shall be as large as practical and at least 4.65 in.² [3000 mm²]. The desiccant or water area shall be not less than the mouth area except if a grid is used, as provided in [12.1](#), its effective area shall not exceed 10 % of the mouth area. An external flange or ledge around the mouth, to which the specimen may be attached, is useful when shrinking or warping occurs. When the specimen area is larger than the mouth area, this overlay upon the ledge is a source of error, particularly for thick specimens. This overlay material should be masked as described in [10.1](#) so that the mouth area defines the test area. The overlay material results in a positive error, indicating excessive water vapor transmission. The magnitude of the error is a complex function of the thickness, ledge width, mouth area, and possibly the permeability. This error is discussed by Joy and Wilson ([1](#))³ (see [13.4.3](#)). This type of error should be limited to about 10 to 12 %. For a thick specimen the ledge should not exceed ¼ in. [19 mm] for a 10-in. [254-mm] or

larger mouth (square or circular) or ¼ in. [3 mm] for a 5-in. [127-mm] mouth (square or circular). For a 3-in. [76-mm] mouth (square or circular) the ledge should not exceed 0.11 in. [2.8 mm] wide. An allowable ledge may be interpolated for intermediate sizes or calculated according to Joy and Wilson.⁽¹⁾ A rim around the ledge ([Fig. X2.1](#)) may be useful. If a rim is provided, it shall be not more than ¼ in. [6 mm] higher than the specimen as attached. Different depths may be used for the Desiccant Method and Water Method, but a ¾-in. [19-mm] depth (below the mouth) is satisfactory for either method.

6.2 **Test Chamber**—The room or cabinet where the assembled test dishes are to be placed shall have a controlled temperature (see [Note 1](#)) and relative humidity. Some standard test conditions that have been useful are given in [Appendix X1](#). The temperature chosen shall be determined according to the desired application of the material to be tested (see [Appendix X1](#)). The relative humidity shall be maintained at 50 ± 2 %, except where extremes of humidities are desired, when the conditions shall be 100 ± 1.8°F [38 ± 1°C] and 90 ± 2 % relative humidity. Both temperature and relative humidity shall be measured frequently⁴ or preferably recorded continuously. Air shall be continuously circulated throughout the chamber, with a velocity sufficient to maintain uniform conditions at all test locations. The air velocity over the specimen shall be between 0.066 and 1 ft/s [0.02 and 0.3 m·s⁻¹]. Suitable racks shall be provided on which to place the test dishes within the test chamber.

NOTE 1—Simple temperature control by heating alone is usually made possible at 90°F [32°C]. However, it is very desirable to enter the controlled space, and a comfortable temperature is more satisfactory for that arrangement. Temperatures of 73.4°F [23°C] and 80°F [26.7°C] are in use and are satisfactory for this purpose. With cyclic control, the average test temperature may be obtained from a sensitive thermometer in a mass of dry sand. The temperature of the chamber walls facing a specimen over water should not be cooler than the water to avoid condensation on the test specimen.

6.3 **Balance and Weights**—The balance shall be sensitive to a change smaller than 1 % of the weight change during the period when a steady state is considered to exist. The weights used shall be accurate to 1 % of the weight change during the steady-state period ([Note 2](#)). A light wire sling may be substituted for the usual pan to accommodate a larger and heavier load.

6.4 **Thickness-Measuring Gage**—The nominal thickness of the specimen shall be determined using a thickness-measuring gage with an accuracy of ±1 % of the reading or 0.0001 in. [0.0025 mm], whichever is greater.

NOTE 2—For example: 1-perm [57 ng·Pa⁻¹·s⁻¹·m⁻²] specimen 10 in. [254 mm] square at 80°F [26.7°C] passes 8.6 grains or 0.56 g/day. In 18 days of steady state, the transfer is 10 g. For this usage, the balance must have a sensitivity of 1 % of 10 g or 0.1 g and the weights must be accurate to 0.1 g. If, however, the balance has a sensitivity of 0.2 g or the weights are no better than 0.2 g, the requirements of this paragraph can be met by continuing the steady state for 36 days. An analytical balance that is much more sensitive will permit more rapid results on specimens below 1 perm [57 ng·Pa⁻¹·s⁻¹·m⁻²] when the assembled dish is not excessively heavy.

³ The boldface numbers in parentheses refer to the list of references at the end of this standard.

⁴ The minimum acceptable is to perform this measurement each time the sample is weighed.

Continuación del anexo 1.



7. Materials

7.1 Desiccant and Water:

7.1.1 For the Desiccant Method, anhydrous calcium chloride in the form of small lumps that will pass a No. 8 [2.36-mm] sieve, and free of fines that will pass a No. 30 [600- μ m] sieve, shall be used (Note 3). It shall be dried at 400°F [200°C] before use.

NOTE 3—If CaCl_2 will react chemically on the specimen, an adsorbing desiccant such as silica gel, activated at 400°F [200°C], may be used; but the moisture gain by this desiccant during the test must be limited to 4 %.

7.1.2 For the Water Method, distilled water shall be used in the test dish.

7.2 Sealant—The sealant used for attaching the specimen to the dish, in order to be suitable for this purpose, must be highly resistant to the passage of water vapor (and water). It must not lose weight to, or gain weight from, the atmosphere in an amount, over the required period of time, that would affect the test result by more than 2 %. It must not affect the vapor pressure in a water-filled dish. Molten asphalt or wax is required for permeance tests below 4 perms [230 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$]. Sealing methods are discussed in Appendix X2.

8. Sampling

8.1 The material shall be sampled in accordance with standard methods of sampling applicable to the material under test. The sample shall be of uniform thickness. If the material is of nonsymmetrical construction, the two faces shall be designated by distinguishing marks (for example, on a one-side-coated sample, “I” for the coated side and “II” for the uncoated side).

9. Test Specimens

9.1 Test specimens shall be representative of the material tested. When a product is designed for use in only one position, three specimens shall be tested by the same method with the vapor flow in the designated direction. When the sides of a product are indistinguishable, three specimens shall be tested by the same method. When the sides of a product are different and either side may face the vapor source, four specimens shall be tested by the same method, two being tested with the vapor flow in each direction and so reported.

9.2 A slab, produced and used as a laminate (such as a foamed plastic with natural “skins”) may be tested in the thickness of use. Alternatively, it may be sliced into two or more sheets, each being separately tested and so reported as provided in 9.4, provided also, that the “overlay upon the cup ledge” (6.1) of any laminate shall not exceed $\frac{1}{8}$ in. [3 mm].

9.3 When the material as used has a pitted or textured surface, the tested thickness shall be that of use. When it is homogeneous, however, a thinner slice of the slab may be tested as provided in 9.4.

9.4 In either case (9.2 or 9.3), the tested overall thickness, if less than that of use, shall be at least five times the sum of the maximum pit depths in both its faces, and its tested permeance shall be not greater than 5 perms [$\approx 300 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$].

9.5 For homogeneous (not laminated) materials with thickness greater than $\frac{1}{2}$ in., the overall nominal thickness of each specimen shall be measured with an accuracy of ± 1 % of the reading at the center of each quadrant and the results averaged.

9.6 When testing pressure sensitive adhesive sealed joints used in insulation vapor retarder systems, prepare the specimens according to Practice C1809.

9.7 When testing any material with a permeance less than 0.05 perms [$3 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$] or when testing a low permeance material that may be expected to lose or gain weight throughout the test (because of evaporation or oxidation), it is strongly recommended that an additional specimen, or “dummy,” be tested exactly like the others, except that no desiccant or water is put in the dish. Failure to use this dummy specimen to establish modified dish weights may significantly increase the time required to complete the test. Because time to reach equilibrium of water permeance increases as the square of thickness, thick, particularly hygroscopic, materials may take as long as 60 days to reach equilibrium conditions.

10. Attachment of Specimen to Test Dish

10.1 Attach the specimen to the dish by sealing (and clamping if desired) in such a manner that the dish mouth defines the area of the specimen exposed to the vapor pressure in the dish. If necessary, mask the specimen top surface, exposed to conditioned air so that its exposure duplicates the mouth shape and size and is directly above it. A template is recommended for locating the mask. Thoroughly seal the edges of the specimen to prevent the passage of vapor into, or out of, or around the specimen edges or any portion thereof. The same assurance must apply to any part of the specimen faces outside their defined areas. Suggested methods of attachment are described in Appendix X2.

NOTE 4—In order to minimize the risk of condensation on the interior surface of the sample when it is placed in the chamber, the temperature of the water prior to preparation of the test specimen should be within $\pm 2^\circ\text{F}$ [$\pm 1^\circ\text{C}$] of the test condition.

11. Procedure for Desiccant Method

11.1 Fill the test dish with desiccant within $\frac{1}{4}$ in. [6 mm] of the specimen. Leave enough space so that shaking of the dish, which must be done at each weighing, will mix the desiccant.

11.2 Attach the specimen to the dish (see 10.1) and place it in the controlled chamber, specimen up, weighing it at once. (This weight may be helpful to an understanding of the initial moisture in the specimen.)

11.3 Weigh the dish assembly periodically, often enough to provide eight or ten data points during the test. A data point is the weight at a particular time. The time that the weight is made should be recorded to a precision of approximately 1 % of the time span between successive weighing. Thus, if weighings are made every hour, record the time to the nearest 30 s; if recordings are made every day, a time to the nearest 15 min would be allowed. At first the weight may change rapidly; later a steady state will be reached where the rate of change is substantially constant. Weighings should be accomplished without removal of the test dishes from the controlled

Continuación del anexo 1.



atmosphere, but if removal is prescribed necessary, the time the specimens are kept at different conditions, temperature or relative humidity, or both, should be kept to a minimum. When results of water vapor transmission are expected to be less than 0.05 perm [$3 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$], a dummy specimen is strongly recommended. Such a dummy specimen should be attached to an empty cup in the normal manner. The environmental effects of temperature variation and buoyancy variability due to barometric pressure fluctuation can be arithmetically tared out of the weighing values. This precaution permits earlier and more reliable achievement of equilibrium conditions. Analyze the results as prescribed in 13.1.

11.4 Terminate the test or change the desiccant before the water added to the desiccant exceeds 10 % of its starting weight. This limit cannot be exactly determined and judgement is required. The desiccant gain may be more or less than the dish weight-gain when the moisture content of the specimen has changed.

NOTE 5—The WVT of some materials (especially wood) may depend on the ambient relative humidity immediately before the test. An apparent hysteresis results in higher WVT if the prior relative humidity was above the test condition and vice versa. It is therefore recommended that specimens of wood and paper products be conditioned to constant weight in a 50 % relative humidity atmosphere before they are tested. Some specimens may be advantageously preconditioned to minimize the moisture that the specimen will give up to the desiccant. This applies when the specimen is likely to have high moisture content or when it is coated on the top (vapor source) side.

12. Procedure for Water Method

12.1 Fill the test dish with distilled water to a level $\frac{3}{4} \pm \frac{1}{4}$ in. [$19 \pm 6 \text{ mm}$] from the specimen. The air space thus allowed has a small vapor resistance, but it is necessary in order to reduce the risk of water touching the specimen when the dish is handled. Such contact invalidates a test on some materials such as paper, wood, or other hygroscopic materials. The water depth shall be not less than $\frac{1}{4}$ in. [3 mm] to ensure coverage of the dish bottom throughout the test. However, if the dish is of glass, its bottom must be visibly covered at all times but no specific depth is required. Water surges may be reduced by placing a grid of light noncorroding material in the dish to break the water surface. This grid shall be at least $\frac{1}{4}$ in. [6 mm] below the specimen, and it shall not reduce the water surface by more than 10 %.

NOTE 6—For the Water Method, baking the empty dish and promptly coating its mouth with sealant before assembly is recommended. The water may be added most conveniently after the specimen is attached, through a small sealable hole in the dish above the water line.

12.2 Attach the specimen to the dish (see 10.1). Some specimens are likely to warp and break the seal during the test. The risk is reduced by preconditioning the specimen, and by clamping it to the dish ledge (if one is provided).

12.3 Weigh the dish assembly and place it in the controlled chamber on a true horizontal surface. Follow the procedure given in 11.3. If the test specimen cannot tolerate condensation on the surface, the dish assembly shall not be exposed to a temperature that differs by more than 5°F [3°C] from the control atmosphere to minimize the risk of condensation on the specimen. When results of water vapor transmission are

expected to be less than 0.05 perm [$3 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$], a dummy specimen is strongly recommended. Such a dummy specimen should be attached to an empty cup in the normal manner. The environment effects of temperature variation and buoyancy variability due to barometric pressure fluctuation can be arithmetically tared out of the weighing values. This precaution permits earlier and more reliable achievement of equilibrium conditions. Analyze the results as prescribed in 13.1.

12.4 Where water is expected to be in contact with the barrier in service, proceed as in 11.3 except place the dish in an inverted position. The dish must be sufficiently level so that water covers the inner surface of the specimen despite any distortion of the specimen due to the weight of the water. With highly permeable specimens it is especially important to locate the test dish so that air circulates over the exposed surface at the specified velocity. The test dishes may be placed on the balance in the upright position for weighing, but the period during which the wetted surface of the specimen is not covered with water must be kept to a minimum.

13. Calculation and Analysis of Results

13.1 The results of the rate of water vapor transmission may be determined either graphically or numerically.

13.1.1 *Dummy Specimen*—If a dummy specimen has been used to compensate for variability in test conditions, due to temperature or barometric pressure, or both, the daily recorded weights can be adjusted by calculating the weight change from initial to time of weighing. This adjustment is made by reversing the direction of the dummy's weight change, relative to its initial weight, and modifying all the appropriate specimen weight(s) recorded at this time. This permits earlier achievement of equilibrium conditions. An alternate procedure, particular for tests of long duration and more than six weighings, is to subtract the arithmetic mean slope of the rate of weight change of the dummy specimen from the arithmetic mean slope of each similar specimen to get an effective rate of weight change. These procedures are also desirable if the specimen is changing weight due to a curing process while under test.

13.1.2 *Graphic Analysis*—Plot the weight, modified by the dummy specimen when used, against elapsed time, and inscribe a curve that tends to become straight. Judgment here is required and numerous points are helpful. When a straight line adequately fits the plot of at least six properly spaced points (periodic weight changes matching, or exceeding 20 % of the multiple of 100 times the scale sensitivity), a nominally steady state is assumed, and the slope of the straight line is the rate of water vapor transmission.

13.1.3 *Numerical Analysis*—A mathematical least squares regression analysis of the weight, modified by the dummy specimen when used, as a function of time will give the rate of water vapor transmission. An uncertainty, or standard deviation of this rate, can also be calculated to define the confidence band. For very low permeability materials, this method can be used to determine the results after 30 to 60 days when using an analytical balance, with a sensitivity of $\approx 1 \text{ mg}$, even if the

Continuación del anexo 1.

	E96/E96M - 16
weight change does not meet the 100 times the sensitivity requirement of 6.3. These specimens must be clearly identified in the report.	Average permeability = Permeance $\times$ Thickness (3)
13.2 Calculate the water vapor transmission, WVT, and permeance as follows:	13.4 <i>Corrections</i> —It is important that all applicable corrections be made to all measurements that result in permeance value more than 2-perm [114 ng-Pa ⁻¹ ·s ⁻¹ ·m ⁻²]. Corrections for materials with permeance value below 2-perm [114 ng-Pa ⁻¹ ·s ⁻¹ ·m ⁻²] are insignificant and need not be done (2). The procedures for making various corrections, as summarized below, are found in the literature. (2, 3, 4, 5, 6)
13.2.1 <i>Water Vapor Transmission:</i>	13.4.1 <i>Buoyancy Correction</i> —The duration for one set of measurements can be many days or weeks. The atmospheric pressure may significantly change during such periods. If the test specimen is highly vapor resistant, the changes in mass due to vapor transport may be overshadowed by the apparent gravimetric changes observed. In such cases, all gravimetric data should be corrected to vacuum or any base line pressure. The following equation (3) can be used for buoyancy correction.
$WVT = G/tA = (G/t)/A \quad (1)$	$\frac{m_2}{m_1} = 1 + \frac{\rho_a(\rho_1 - \rho_2)}{\rho_1(\rho_2 - \rho_a)} \quad (4)$
where:	where:
In inch-pound units:	m_1 = mass recorded by balance, kg. m_2 = mass after buoyancy correction, kg. ρ_a = density of air, kg m ⁻³ . ρ_1 = density of material of balance weights, kg m ⁻³ , and ρ_2 = bulk density of test assembly, kg m ⁻³ .
G = weight change, grains (from the straight line), t = time during which G occurred, h, G/t = slope of the straight line, grains/h, A = test area (cup mouth area), ft ² , and WVT = rate of water vapor transmission, grains/h-ft ² .	13.4.1.1 The density of air can be calculated using the ideal gas law for the measured atmospheric pressure and ambient temperature.
In metric units:	13.4.1.2 The buoyancy correction is important (7) when measured mass changes are in the range of 0 to 100 mg.
G = weight change (from the straight line), g, t = time, h, G/t = slope of the straight line, g/h, A = test area (cup mouth area), m ² , and WVT = rate of water vapor transmission, g/h-m ² .	13.4.2 <i>Corrections for Resistance due to Still Air and Specimen Surface</i> —In general, if the material is highly permeable, these corrections are more significant. With known thickness of the still air layer in the cup, the corresponding vapor resistance can be calculated using the following equation (4) for permeability.
13.2.2 <i>Permeance:</i>	$\delta_a = \frac{2.306 \times 10^{-5} P}{R_s TP} \left(\frac{T}{273.15} \right)^{1.81} \quad (5)$
$\text{Permeance} = WVT/\Delta p = WVT/S(R_1 - R_2) \quad (2)$	where:
where:	δ_a = permeability of still air, kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹ ·Pa ⁻¹ , T = temperature, K, P = ambient pressure, Pa, P_o = standard atmospheric pressure, that is, 101325 Pa, and R_s = ideal gas constant for water, that is, 461.5 J·K ⁻¹ ·kg ⁻¹ .
In inch-pound units:	13.4.2.1 In the absence of any measured data, the surface resistances (that is, inside and outside surfaces of the specimen) may be approximated using Lewis' relation. (5) For cup methods that follow this standard, the total surface resistance (Hansen and Lund (6)) should be $\approx 4 \times 10^7$ Pa·s·m ² ·kg ⁻¹ .
Δp = vapor pressure difference, in. Hg, S = saturation vapor pressure at test temperature, in. Hg, R_1 = relative humidity at the source expressed as a fraction (the test chamber for desiccant method; in the dish for water method), and R_2 = relative humidity at the vapor sink expressed as a fraction.	13.4.3 <i>Edge Mask Correction</i> —The following equation (Joy and Wilson(1)) is to be used to correct the excess WVT effect due to edge masking:
In metric units:	$\text{Percent excess WVT} = \frac{400W}{\pi S_1} \log_e \left(\frac{2}{1 + e^{-(2\delta\delta_0)}} \right) \quad (6)$
Δp = vapor pressure difference, mm Hg (1.333×10^2 Pa), S = saturation vapor pressure at test temperature, mm Hg (1.333×10^2 Pa), R_1 = relative humidity at the source expressed as a fraction (the test chamber for desiccant method; in the dish for water method), and R_2 = relative humidity at the vapor sink expressed as a fraction.	
13.2.3 In the controlled chamber the relative humidity and temperature are the average values actually measured during the test and (unless continuously recorded) these measurements shall be made as frequently as the weight measurements. In the dish the relative humidity is nominally 0 % for the desiccant and 100 % for the water. These values are usually within 3 % relative humidity of the actual relative humidity for specimens below 4 perms [230 ng-Pa ⁻¹ ·s ⁻¹ ·m ⁻²] when the required conditions are maintained (no more than 10 % moisture in CaCl ₂ and no more than 1 in. [25 mm] air space above water).	
13.3 The calculation of permeability is optional and can be done only when the test specimen is homogeneous (not laminated) and not less than 1/2 in. [12.5 mm] thick, calculate its average permeability as follows:	

Continuación del anexo 1.

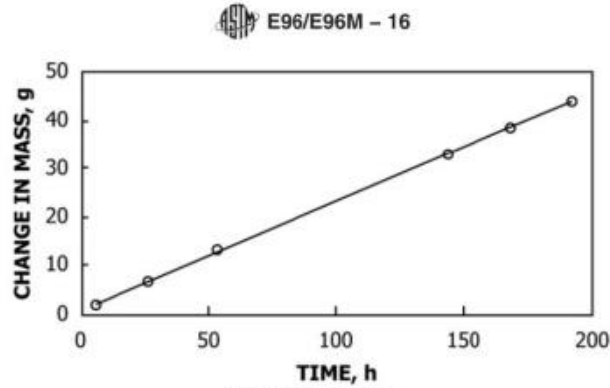


FIG. 1 Graphic Analysis

where:

- t = specimen thickness, m,
 b = width of masked edge, m, and
 S_f = four times the test area divided by the perimeter, m.

13.4.3.1 If the cup assembly includes any edge masking this correction shall be made.

13.5 Metric units and conversion factor are given in Table 1.

13.6 *Example (in SI unit)*—In a desiccant test on a sample of medium density glass fiber insulation the following results were recorded.

Thickness of the specimen = 25.81 mm
 Test area = 0.01642 m²
 Mass of the test specimen = 20.44 g
 Mass of the desiccant = 554.8 g
 Initial mass of the test assembly = 1.257810 kg
 Thickness of air layer in the cup = 15 mm

Elapsed Time (h)	Mass of the Test Assembly (g)	Change in Mass (g)	Chamber Temperature (°C)	Chamber RH (%)	Barometric Pressure mm Hg (kPa)
0.000	1257.810	0.000	22.83	52.60	744.7 (99.27)
6.067	1259.469	1.659	22.84	52.6	741.11 (98.79)
26.633	1264.609	6.799	22.78	52.2	744.41 (99.23)
53.150	1271.062	13.252	22.82	52.1	743.21 (99.07)
143.767	1290.773	32.963	22.74	52.2	757.69 (101.00)
168.283	1296.389	38.579	22.78	52.1	749.81 (99.95)
192.883	1301.953	44.143	22.78	52.1	758.44 (101.10)

13.6.1 *Buoyancy Correction*—As mentioned in 13.4.1, the buoyancy effect will be insignificant for this set of readings as recorded changes of mass are all above 100 mg. However, for example, the corrected mass of the test assembly weight 1257.810 g (1st reading) can be calculated using Eq 4.

m_1 = mass recorded by balance, kg = 1257.810 × 10⁻³ kg
 P = Barometric pressure, Pa = 99.27 × 10³ Pa
 R = Gas constant for dry air = 287.055 J / (kg·K)
 T = Chamber temperature = 22.83 + 273.15 = 295.98 K
 ρ_a = density of air, kg m⁻³ = $P / (RT)$ = 1.1684 kg m⁻³
 ρ_v = density of material of balance weights, kg m⁻³ = 8000 kg m⁻³

h_1 = height of the test assembly, m = 44.7 × 10⁻³ m
 d_1 = diameter of the test assembly, m = 168.0 × 10⁻³ m
 ρ_b = bulk density of test assembly, kg m⁻³
 $= \frac{4 \times m_1}{\pi \times d_1^2 \times h_1} = 1269.4 \text{ kg m}^{-3}$

m_2 = mass after buoyancy correction = 1258.78 × 10⁻³ kg

13.6.2 A graphic analysis of the data, according to 13.1.2 is shown in Fig. 1.

13.6.3 A linear least-squares analysis of the data according to 13.1.3 gives the slope of the straight line as 0.225 ± 0.002 g·h⁻¹, with a linear regression coefficient > 0.998.

WVT = 0.225 g·h⁻¹ / 0.01642 m²
 = 19.595 grains·h⁻¹·ft² (~ 3.81 × 10⁶ ng·m⁻²·s⁻¹)
 S = 2775.6 Pa
 R_1 = 0.523
 R_2 = 0
 Permeance = 3.81 × 10⁶ ng·m⁻²·s⁻¹ / (2775.6 Pa × 0.523)
 = 2630 ng·m⁻²·s⁻¹·Pa⁻¹

13.6.4 *Corrections for Resistance due to Still Air and Specimen Surface:*

Permeability of still air layer (Eq 5)
 $= \delta_s = \frac{2.306 \times 10^{-5} \times 101325}{461.5 \times (22.79 + 273.15) \times 99860} \left(\frac{22.79 + 273.15}{273.15} \right)^{1.81}$
 = 198 ng·m⁻¹·s⁻¹·Pa⁻¹
 Permeance of 15 mm still air layer
 = (198) / (0.015) ng·m⁻²·s⁻¹·Pa⁻¹
 = 13200 ng·m⁻²·s⁻¹·Pa⁻¹
 Hence, the 15 mm air layer offers a vapor resistance
 = 1 / (13200) m²·s·Pa·ng⁻¹ ~ 7.6 × 10⁷ m²·s·Pa·kg⁻¹
 Surface resistances (see 13.4.2)
 = 4.0 × 10⁷ m²·s·Pa·kg⁻¹
 Total corrections for resistance due to still air and specimen surface
 = (7.6 × 10⁷ + 4.0 × 10⁷) m²·s·Pa·kg⁻¹

13.6.5 *Edge Mask Correction*—The test assembly used does not include any edge masking. However, for example, if it includes an edge mask of width 5 mm then the following correction is to be made (see 13.4.3).

t = specimen thickness, m = 25.81 × 10⁻³ m
 b = width of masked edge, m = 5 × 10⁻³ m
 Test area = 0.01642 m²
 Perimeter = 0.4541 m
 S_f = four times the test area divided by the perimeter
 $= \frac{4 \times 0.01642}{0.4541} = 0.1446 \text{ m}$
 Percent excess WVT

Continuación del anexo 1.

E96/E96M – 16								
TABLE 2 Results on Precision from Interlaboratory Testing								
For Desiccant Method at 23°C								
Material	Thickness (mm) ^A	Mean Permeance (ng·m ⁻² ·s ⁻¹ ·Pa ⁻¹) ^B	s (ng·m ⁻² ·s ⁻¹ ·Pa ⁻¹) ^B	CV (%)	LSD (ng·m ⁻² ·s ⁻¹ ·Pa ⁻¹) ^B	s (ng·m ⁻² ·s ⁻¹ ·Pa ⁻¹) ^B	CV (%)	LSD (ng·m ⁻² ·s ⁻¹ ·Pa ⁻¹) ^B
A	0.0254	34.7	0.95	2.7	2.7	5.6	16.2	15.9
B	0.1397	0.74	0.16	21.7	0.46	0.31	42.6	0.92
C	12.7	3.51	0.25	7.2	0.69	1.06	30.2	2.8
D	25.4	44.8	1.5	3.3	4.2	3.5	7.8	10.0
E	0.3556	2.64	0.13	5.0	0.40	0.31	11.7	0.86
For Water Method at 23°C								
Material	Thickness (mm) ^A	Mean Permeance (ng·m ⁻² ·s ⁻¹ ·Pa ⁻¹) ^B	s (ng·m ⁻² ·s ⁻¹ ·Pa ⁻¹) ^B	CV (%)	LSD (ng·m ⁻² ·s ⁻¹ ·Pa ⁻¹) ^B	s (ng·m ⁻² ·s ⁻¹ ·Pa ⁻¹) ^B	CV (%)	LSD (ng·m ⁻² ·s ⁻¹ ·Pa ⁻¹) ^B
A	0.0254	40.91	0.77	1.9	2.2	8.9	21.8	25.2
B	0.1397	0.90	0.13	14.0	0.35	0.12	13.4	0.34
C	12.7	5.55	0.31	5.7	0.92	1.1	20.1	3.1
D	25.4	59.5	1.1	1.8	3.1	12.4	20.9	35.5
E	0.3556	3.40	0.19	5.7	0.57	0.47	13.8	1.3

^A 1 in. = 25.4 mm
^B 1 perm (inch-pound) = 57.2 ng·m⁻²·s⁻¹·Pa⁻¹

Legend:
s = standard deviation
CV = percent coefficient of variation (s × 100/ Mean)
LSD = least significant difference between two individual test results based on a 95 % confidence level = 2√2s

NOTE 1—Material B was Teflon[®] PTFE fluorocarbon resin brand of tetrafluoroethylene. It was extremely difficult to provide a seal to this sample, which accounts for the poor repeatability.

$$= \frac{400 \times 25.81 \times 10^{-3}}{\pi \times 0.1446} \log_2 \left(\frac{2}{1 + e^{-(2\pi \times 5 \times 10^{-3})/(25.81 \times 10^{-3})}} \right)$$

$$= 9.86 \%$$

13.6.6 The applicable corrections required for the analysis of the test results in this case are due to resistance of still air and specimen surface.

Water vapor resistance of the test specimen + corrections
= 1 / Permeance = (1 / 2630) m²·s·Pa·ng⁻¹
= 3.80 × 10³ m²·s·Pa·kg⁻¹

The water vapor resistance of the test specimen
= (3.80 × 10³ - (7.6 × 10² + 4.0 × 10²)) m²·s·Pa·kg⁻¹
= 2.64 × 10³ m²·s·Pa·kg⁻¹

Permeance of the test specimen
= 1 / (2.64 × 10³ m²·s·Pa·kg⁻¹)
= 3.79 × 10⁻⁹ kg·m⁻²·s⁻¹·Pa⁻¹
= 3790 ng·m⁻²·s⁻¹·Pa⁻¹

Permeability
= 3790 ng·m⁻²·s⁻¹·Pa⁻¹ × 0.02581 m
= 97.8 ng·m⁻¹·s⁻¹·Pa⁻¹

14. Report

14.1 The report shall include the following:

14.1.1 Identification of the material tested, including product thickness for homogeneous materials (not laminated) greater than 1/2 in.,

14.1.2 Test method used (desiccant or water),

14.1.3 Test temperature,

14.1.4 Relative humidity in the test chamber,

14.1.5 Permeance of each specimen in perms (to two significant figures),

14.1.6 The side of each specimen on which the higher vapor pressure was applied. (The sides shall be distinguished as "side A" and "side B" when there is no obvious difference between them. When there is an obvious difference, this difference shall also be stated, such as "side A waxed" and "side B unwaxed."),

14.1.7 The average permeance of all specimens tested in each position,

14.1.8 The permeability of each specimen (as limited by 13.3), and the average permeability of all specimens tested,

14.1.9 Include a portion of the plot indicating the section of the curve used to calculate permeability, and

14.1.10 State design of cup and type or composition of sealant.

15. Precision and Bias

15.1 *Precision*—Table 2 is based on interlaboratory tests conducted in 1988 and 1991.⁵ In 1988 four materials (A, B, C, D) were tested using the desiccant method and the water method in triplicate. Fifteen laboratories contributed data, with full results secured from four laboratories. In 1991 ten laboratories contributed data for material E, using triplicate specimens, again using both the desiccant method and the water method. Tables 3 and 4 are based on another interlaboratory test conducted in 1995–96.(8) One material at a nominal thickness of 1 in. (25 mm) was tested by ten participating laboratories. Results from only nine laboratories were used in the analyses because of the presence of severe outliers (see Practice E691) in the observation of tenth laboratory.

15.1.1 Test results were analyzed using Practice E691.

15.2 Additional precision data and analysis for this test method is based on an interlaboratory study (#512) conducted in 2010. Six laboratories participated in this study, analyzing four different extremely low permeance materials. Procedure A, desiccant method at 73°F/50 % RH, was used. Each "test result" reported represents an individual determination, and all participants reported three replicate test results for every material. Practice E691 was followed for the design and

⁵ Supporting data have been filed at ASTM International Headquarters and may be obtained by requesting Research Report RR-C16-1014. Contact ASTM Customer Service at service@astm.org.

Continuación del anexo 1.

E96/E96M – 16

TABLE 3 Results on Precision from Interlaboratory Testing—Dry Cup Measurements on Expanded Polystyrene

Lab	Permeability (ng·m ⁻¹ ·s ⁻¹ ·Pa ⁻¹) ^a			$\bar{x}$	s	d	h	k
	Spec #1	Spec #2	Spec #3					
1	2.54	2.46	2.21	2.40	1.72E-01	-7.01E-01	-1.50	1.06
2	2.65	2.87	2.68	2.73	1.19E-01	-3.71E-01	-0.79	0.73
3	3.79	3.49	3.65	3.64	1.50E-01	5.39E-01	1.15	0.92
4	2.77	2.73	2.69	2.73	4.00E-02	-3.74E-01	-0.80	0.25
5	2.67	2.66	2.79	2.71	7.23E-02	-3.98E-01	-0.85	0.44
6	3.26	3.38	3.29	3.31	6.24E-02	2.06E-01	0.44	0.38
7	3.05	3.72	3.33	3.37	3.37E-01	2.62E-01	0.56	2.07
8	3.76	3.53	3.87	3.72	1.73E-01	6.16E-01	1.31	1.07
9	3.24	3.48	3.26	3.33	1.33E-01	2.22E-01	0.47	0.82
				$\bar{\bar{x}}$	$s_{\bar{x}}$	$s_{\bar{d}}$	$s_{\bar{h}}$	
				3.10	1.63E-01	4.69E-01	4.87E-01	

^a 1 perm in. = 1.45 (ng·m⁻¹·s⁻¹·Pa⁻¹)

Note 1—The average of the cell averages gives the permeability for the round robin material, according to the dry cup measurements, as 3.10 ng·m⁻¹·s⁻¹·Pa⁻¹.

Note 2—The repeatability standard deviation is 1.6×10^{-1} ng·m⁻¹·s⁻¹·Pa⁻¹.

Note 3—The reproducibility standard deviation is 4.9×10^{-1} ng·m⁻¹·s⁻¹·Pa⁻¹.

TABLE 4 Results on Precision from Interlaboratory Testing—Wet Cup Measurements on expanded polystyrene

Lab	Permeability (ng·m ⁻¹ ·s ⁻¹ ·Pa ⁻¹) ^a			$\bar{x}$	s	d	h	k
	Spec #1	Spec #2	Spec #3					
1	2.90	3.14	2.94	2.99	1.29E-01	-3.58E-01	-0.94	0.77
2	3.50	3.46	3.52	3.49	3.06E-02	1.43E-01	0.37	0.18
3	4.23	3.76	3.65	3.88	3.08E-01	5.29E-01	1.39	1.84
5	3.32	3.29	2.97	3.19	1.94E-01	-1.58E-01	-0.41	1.16
6	2.61	2.82	2.80	2.74	1.16E-01	-6.08E-01	-1.59	0.69
7	3.53	3.18	3.41	3.37	1.77E-01	1.92E-02	0.05	1.06
8	3.30	3.42	3.29	3.34	7.23E-02	-1.42E-02	-0.04	0.43
9	3.75	3.97	3.67	3.80	1.55E-01	4.46E-01	1.17	0.93
				$\bar{\bar{x}}$	$s_{\bar{x}}$	$s_{\bar{d}}$	$s_{\bar{h}}$	
				3.35	1.67E-01	3.82E-01	4.06E-01	

^a 1 perm in. = 1.45 ng·m⁻¹·s⁻¹·Pa⁻¹

Legend:

$\bar{x}$ = Cell average or the average from one laboratory

s = Cell standard deviation, or the standard deviation for one laboratory

$\bar{\bar{x}}$ = Average of the Cell averages

d = Cell deviation or the difference ($\bar{x} - \bar{\bar{x}}$)

$s_{\bar{x}}$ = Repeatability standard deviation (within a laboratory)

$s_{\bar{d}}$ = Reproducibility standard deviation (between the laboratories)

h = the between-laboratory consistency statistic

k = the within-laboratory consistency statistic

Note 1—The average of the cell averages gives the permeability for the round robin material, according to the wet cup measurements, as 3.35 ng·m⁻¹·s⁻¹·Pa⁻¹.

Note 2—The repeatability standard deviation is 1.7×10^{-1} ng·m⁻¹·s⁻¹·Pa⁻¹.

Note 3—The reproducibility standard deviation is 4.1×10^{-1} ng·m⁻¹·s⁻¹·Pa⁻¹.

analysis of the data; the details are given in ASTM Research Report No. C16-1040.⁶

15.2.1 *Repeatability limit (r)*—Two test results obtained within one laboratory shall be judged not equivalent if they differ by more than the “r” value for that material; “r” is the interval representing the critical difference between two test results for the same material, obtained by the same operator using the same equipment on the same day in the same laboratory.

15.2.1.1 Repeatability limits are listed in Table 5 below.

15.2.2 *Reproducibility limit (R)*—Two test results shall be judged not equivalent if they differ by more than the “R” value for that material; “R” is the interval representing the critical difference between two test results for the same material, obtained by different operators using different equipment in different laboratories.

15.2.2.1 Reproducibility limits are listed in Table 5 below.

15.2.3 The above terms (repeatability limit and reproducibility limit) are used as specified in Practice E177.

15.2.4 Any judgment in accordance with statements 9.1.1 and 9.1.2 would have an approximate 95% probability of being correct.

15.3 The precision statement was determined through statistical examination of 72 test results, submitted by six

⁶ Supporting data have been filed at ASTM International Headquarters and may be obtained by requesting Research Report RR-C16-1040. Contact ASTM Customer Service at service@astm.org.

8

Continuación del anexo 1.

 E96/E96M – 16					
TABLE 5 Water Vapor Transmission (perms) ILS #512					
Material	Average ^A	Repeatability Standard Deviation	Reproducibility Standard Deviation	Repeatability Limit	Reproducibility Limit
	$\bar{x}$	s_x	s_y	r	R
A	0.00877	0.00166	0.00336	0.00465	0.00940
B	0.00843	0.01067	0.01067	0.02988	0.02988
C	0.02028	0.01698	0.01698	0.04756	0.04756
D	0.00567	0.00938	0.00967	0.02626	0.02706

^A The average of the laboratories' calculated averages

laboratories, for four materials. The four materials were described as:

Material A: 6 mil high barrier PVdC-based film

Material B: 10 mil high barrier PVdC-based film

Material C: 15 mil high barrier HDPE-based film

Material D: PET film/1 mil aluminum foil/PET film lamination

15.4 To judge the equivalency of two test results, it is recommended to choose the material that is closest in characteristics to the test material.

15.5 Using information from this ILS, Appendix section X3 discusses the testing of extremely low permeance materials.

15.6 An additional interlaboratory study employing very low permeance materials, ILS no. 607, was conducted by committee F02 in 2012.⁷

16. Keywords

16.1 permeability; plastics (general); plastic sheet and film; sheet material; thermal-insulating materials; thermal insulation permeability films; water vapor transmission (WVT)

⁷ Supporting data have been filed at ASTM International Headquarters and may be obtained by requesting Research Report RR:C16-1045. Contact ASTM Customer Service at service@astm.org.

APPENDICES

(Nonmandatory Information)

X1. STANDARD TEST CONDITIONS

X1.1 Standard test conditions that have been useful are:

X1.1.1 *Procedure A*—Desiccant Method at 73.4°F [23°C].

X1.1.2 *Procedure B*—Water Method at 73.4°F [23°C].

X1.1.3 *Procedure BW*—Inverted Water Method at 73.4°F [23°C].

X1.1.4 *Procedure C*—Desiccant Method at 90°F [32.2°C].

X1.1.5 *Procedure D*—Water Method at 90°F [32.2°C].

X1.1.6 *Procedure E*—Desiccant Method at 100°F [37.8°C].

X1.2 Unless otherwise prescribed by regulation, specification, ASTM standard, or other governing document, select test conditions similar to those to which the material will be exposed to actual use.

X2. CUP DESIGN AND SEALING METHODS

X2.1 An ideal sealing material has the following properties:

X2.1.1 Impermeability to water in either vapor or liquid form.

X2.1.2 No gain or loss of weight from or to the test chamber (evaporation, oxidation, hygroscopicity, and water solubility being undesirable).

X2.1.3 Good adhesion to any specimen and to the dish (even when wet).

X2.1.4 Complete conformity to a rough surface.

X2.1.5 Compatibility with the specimen and no excessive penetration into it.

X2.1.6 Strength or pliability (or both).

X2.1.7 Easy handleability (including desirable viscosity and thermal of molten sealant).

X2.1.8 Satisfactory sealants possess these properties in varying degrees and the choice is a compromise, with more tolerance in items at the beginning of this list for the sake of those at the latter part of the list when the requirements of 7.2 are met. Molten asphalt or wax is required for permeance tests below 4 perms [240 ng·m⁻²·s⁻¹·Pa⁻¹]. Tests to determine sealant behavior should include:

X2.1.8.1 An impervious specimen (metal) normally sealed to the dish and so tested, and

X2.1.8.2 The seal normally assembled to an empty dish with no specimen and so tested.

Continuación del anexo 1.

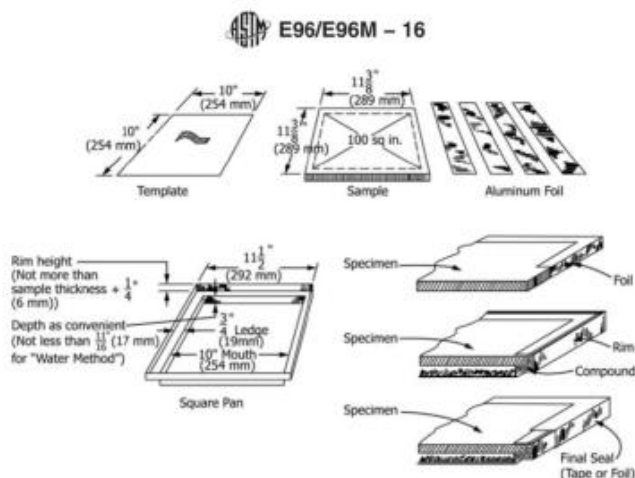


FIG. X2.1 Apparatus for Water Vapor Transmission Tests of Large Thick Specimens

X2.2 The following materials are recommended for general use when the test specimen will not be affected by the temperature of the sealant:

X2.2.1 Asphalt, 180 to 200°F [82 to 93°C] softening point, meeting the requirements of Specification D449/D449M, Type C. Apply by pouring.

X2.2.2 Beeswax and rosin (equal weights). A temperature of 275°F [135°C] is desirable for brush application. Pour at lower temperature.

X2.2.3 Microcrystalline wax⁸ (60 %), mixed with refined crystalline paraffin wax (40 %).

X2.3 The materials listed in X2.3.1 are recommended for particular uses such as those shown in Fig. X2.1. The suggested procedure described in X2.3.2 applies to an 11 1/8-in. [289-mm] square specimen if its permeance exceeds 4 perms [240 ng·m⁻²·s⁻¹·Pa⁻¹] (limited by evaporation of sealants).

X2.3.1 Materials:

X2.3.1.1 Aluminum foil, 0.005 in. [0.125 mm] minimum thickness.

X2.3.1.2 Tape, meeting the requirements of Specification D2301, vinyl chloride plastic pressure-sensitive, electrical insulating tape.

X2.3.1.3 Cement, contact bond, preferably rubber base.

X2.3.2 Procedure:

X2.3.2.1 Step 1—Seal aluminum foil around edges of specimen, leaving a 100-in.² [0.0654-m²] exposed test area on each side. Use contact bond cement as directed by the manufacturer.

X2.3.2.2 Step 2—Spread sealant on inside of rim and ledge. Place desiccant (dry), or water and surge control material (wet) in pan. Press specimen in place. Avoid squeezing compound into the test area.

X2.3.2.3 Step 3—Coat outside of rim and bottom of ledge with contact bond cement, and place foil strips from edge of template, around rim, and bottom of ledge.

X2.4 A method of using hot asphalt, as applied to a 10-in. [254-mm] square-mouth dish with ledge and rim, is as follows:

X2.4.1 Apparatus:

X2.4.1.1 Template—A square frame of brass or steel, 3/16 in. [5 mm] thick and 3/4 in. [19 mm] deep. The 3/16-in. [5-mm] thickness is tapered to zero at the bottom of the frame where it will touch the test specimen and maintain a 10-in. [254-mm] square test area.

X2.4.1.2 Sealant—Asphalt (see X2.3.1 used at the proper pouring consistency of 375 to 450°F [179 to 232°C]).

X2.4.1.3 Melting Pot, for the asphalt, electrically heated, with one dimension greater than 11 1/8 in. [289 mm].

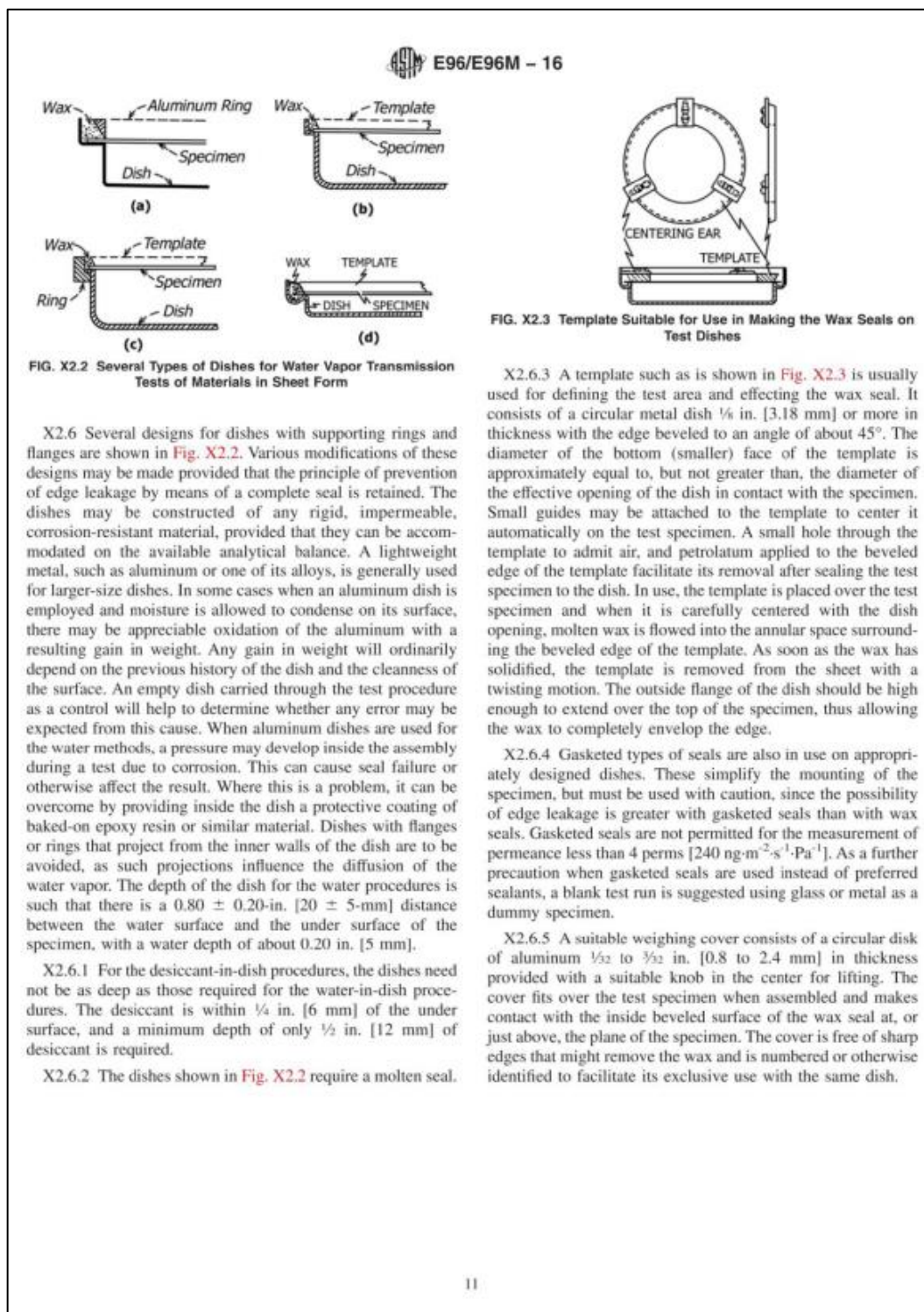
X2.4.1.4 Small Ladle, for pouring.

X2.4.2 Procedure—Mark the 11 1/8-in. [289-mm] square specimen with a line at an equal distance from each edge, so that the area enclosed by the lines is as nearly as possible a 10-in. [254-mm] square. The template may be used for marking. Dip each edge of the specimen in molten asphalt up to the line, so that the test area is defined and all edges are coated with a heavy layer of asphalt. Place the specimen over the pan containing water or desiccant. Lightly oil the template or coat with petroleum jelly on its outer side, and place on the specimen. Pour molten asphalt into the space between the template and the rim of the pan. After the asphalt has cooled for a few minutes, the template should be easily removable.

X2.5 Hot wax may be applied like asphalt. It may also be applied (freely) with a small brush. Its lower working temperature may be advantageous when a specimen contains moisture.

⁸ The sole source of supply of the microcrystalline wax known to the committee at this time is E. I. DuPont de Nemours & Co., Inc., Polymer Products Dept., Wilmington, DE 19898. If you are aware of alternative suppliers, please provide this information to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee,¹ which you may attend.

Continuación del anexo 1.



X3. PROCEDURE TO CALCULATE DEPENDENCY OF WATER VAPOR TRANSMISSION RATE ON RELATIVE HUMIDITY

X3.1 The dependency of the water vapor transmission (WVT) rate of materials on relative humidity (RH) can be determined using a combination of desiccant and water method (9).

X3.2 Procedure

X3.2.1 Dry cup tests with *desiccant method* test set up but also with additional chamber RH levels other than 50% are carried out. Three chamber RH levels: 50%, 70%, and 90% shall be selected.

X3.2.2 Wet cup measurements with water method test set up but at two chamber RH levels are to be carried out. Two chamber RH levels, 70% and 90% shall be selected.

X3.3 Data Analysis

X3.3.1 From the slope of the time versus mass change data plot, for each chamber RH levels, the rate of WVT for the corresponding test specimen at a specific chamber RH level is determined according to 13.2.1.

X3.3.2 The WVT rate is plotted against the chamber RH. This results in two separate but intersecting plots.

X3.3.2.1 If the plots are linear and intersect at 50% chamber RH, it is concluded that the material under consideration is nonhygroscopic and the rate of WVT does not depend on the local chamber RH.

X3.3.2.2 For the hygroscopic material the intersection of the plots will be at a chamber RH greater than 50% and water method may yield a nonlinear dependency.

X3.3.3 For hygroscopic materials the sum of the rate of WVT from dry and wet cup measurements at the 90% chamber

RH represents theoretically the dry cup measurements for WVT rate done at 100% chamber RH.

X3.3.4 Similarly for hygroscopic materials the sum of the rate of WVT from dry and wet cup measurements at the 70% chamber RH represents theoretically the dry cup measurements for WVT rate done at 100% chamber RH. If this calculated value of WVT rate at 100% chamber RH differs from the same calculated in centilitres X3.3.3 by more than 10% then the whole test procedure should be repeated.

X3.3.5 The calculated dry cup WVT rate at 100% chamber RH, as shown above, is combined with the directly measured dry cup measurements data at 50%, 70% and 90% chamber RH to generate a set of WVT rate values spanned over the entire range of chamber RH (that is, 0 to 100%). These values of WVT rate when plotted against the corresponding chamber RH would define the dependency of WVT rate on RH.

X3.3.6 The algebraic expression of the best-fitted curve that passes through the origin from the WVT rate versus chamber RH is to be used to determine the derivative of the plot at any given local RH.

X3.3.7 The water vapor permeance of the material at a specific chamber RH is derived from the following expression.

$$\text{Water Vapor Permeance (WVP)} = \quad (X3.1)$$

$$\left\{ \frac{(\text{Magnitude of derivative}) \times 100}{\text{Saturation water vapor pressure at } 73.4^{\circ}\text{F } (23^{\circ}\text{C})} \right\}$$

X3.3.8 All normal required corrections (13.4) are applicable to X3.3.7.

X4. TESTING OF EXTREMELY LOW PERMEANCE MATERIALS

X4.1 In 2010-2011 an inter-laboratory study using Procedure A was conducted using thin, extremely low permeance materials as the test specimens. The statistics from this study related to precision of the method are covered in Section 15 of these test methods.

X4.2 In addition to developing a precision statement, a number of other objectives was targeted in undertaking this round robin. Those objectives and a discussion of the findings are discussed herein:

X4.3 Provide experience testing extremely low and “zero perm” materials.

X4.3.1 Many labs that conduct the E96/E96M tests do not have occasion to test such materials. The materials tested in the study ranged from anticipated values of about 0.015 perm down to zero perm. All materials were 0.015 in. (0.38 mm) thick or less. Circumstances were such, however, that the final group of participating labs in fact did have experience testing in this range. As such, input from inexperienced labs was not available.

X4.4 Determine what difficulties are encountered in testing at these levels.

X4.4.1 With one exception, no notable difficulties were reported by the labs. One lab was consistently obtaining loss of weight during the tests. An assignable cause was not determined, and it was decided not to use their results. Otherwise, there was no feedback on problems with the test.

X4.4.2 The occurrence of outliers indicates problems that were undetected or uncorrected by the operators, or both. The outliers are always high results. Absent the presence of obvious defects in the test specimens, which would be visible under normal lighting or over a light box, the cause for outliers is invariably inadequate sealing to the dish. It would appear that operators were not recognizing outliers appearing early in the test, or were not taking action to correct faulty seals or otherwise determine a cause.

X4.4.3 The types of materials tested can be expected to be very consistent. One exception could be foil or foil laminations, which can contain pinholes of a size or number

Continuación del anexo 1.



E96/E96M – 16

that can produce apparently outlying results. These will be detectable over a light box. The foil lamination samples in this study were pre-screened for presence of pinholes, and only pinhole-free specimens were used.

X4.4.4 The primary problem encountered in testing extremely low permeance materials then would appear to be inadequate or failing seals. It is critical that operators monitor data early on for apparent outliers. When one is suspected, whether or not a breach in the seal is visible in the test dish, the seal should be "re-flowed", the specimen taken out of the test, or a replacement replicate started.

X4.4.5 It is strongly recommended that a program be set up to provide either water vapor transmission rate or permeance, and correlation coefficient computation, real time at each weighing. This way outliers can be spotted immediately and checked for cause.

X4.5 Application of correlation coefficient:

X4.5.1 The correlation coefficient indicates if a strong linear relationship in the coordinate data points exists.

X4.5.2 Very high correlation indicates a very straight line slope for the weight gain per unit time, which in turn can be used as an indication of steady state.

X4.5.3 High correlation is not necessarily expected when testing materials of extremely low permeance, since the slope of the weight gain per unit time is approaching zero, and any variation in the test conditions has a greater impact on individual weighings. Zero or near-zero permeance tests may never show good correlation.

X4.6 Time required to reach steady state:

X4.6.1 It is generally thought that extremely low permeance materials require many weeks or months to reach a true steady state and to provide a reliable result.

X4.6.2 A graph of perm vs. time at steady state should show a flat line.

X4.6.3 Using the data from one lab that obtained the most consistent expected results, the approximately first one third of the test duration (18 days) showed perm results that indicated a condition that was not steady-state.

X4.6.4 The second third (19-36 days) graph showed a much straighter line, but one not totally flat.

X4.6.5 The last third (37-54 days) showed the straightest you line of perm results; given the range of the data, steady state is well indicated.

X4.6.6 While the above findings would indicate that two months or more may be needed to reach steady state, the change in results after the first two or three weeks was very small, less than would impact a result rounded to two significant figures. The purpose of the test might dictate the duration required; that is, screening or QC tests might be run for shorter durations than R&D tests where a high degree of accuracy is desired, which might be run for more than two months.

X4.6.7 It is known that thicker materials and moisture-retaining materials need upwards of two months or longer to reach steady-state. Evidence shows that very thin materials such as those tested in this ILS, even if of extremely low permeance, may not need such a long test duration to reach steady state.

REFERENCES

- (1) Joy, F. A., and Wilson, H. G., "Standardization of the Dish Method for Measuring Water Vapor Transmissions," National Research Council of Canada, Research Paper 279, January 1966, p. 263.
- (2) Mukhopadhyaya, P. K., Kumaran, M. K., Lackey, J., and van Reenen, D., "Water Vapor Permeability Measurement and Significance of Various Corrections", ASTM STP 1495, *Journal of ASTM International*, Vol. 4, No. 8, 2007, pp. 1-12
- (3) McGlashan, M. L., "Physico-Chemical Quantities and Units," Royal Institute of Chemistry Monographs for Teachers, No. 15, 1971, p. 8.
- (4) Schirmer, R. ZVDI, Beiheft Verfahrenstechnik, Nr. 6, S.170, 1938.
- (5) Pedersen, C. R., Ph.D thesis, Thermal Insulation Laboratory, The Technical University of Denmark, 1990, p. 10.
- (6) Hansen, K. K. and Lund, H. B., "Cup Method for Determination of Water Vapor Transmission Properties of Building Materials. Sources of Uncertainty in the Methods," Proceedings of the 2nd Symposium, Building Physics in the Nordic Countries, Trondheim, 1990, pp. 291-298.
- (7) Lackey, J. C., Marchand, R. G., and Kumaran, M. K., "A Logical Extension of the ASTM Standard E96 to Determine the Dependence of Water Vapor Transmission on Relative Humidity," *Insulation Materials: Testing and Applications*; 3rd Volume, ASTM STP 1320, R. S. Graves and R. R. Zarr, Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1997, pp. 456-470
- (8) Kumaran, M. K., "Interlaboratory Comparison of the ASTM Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials (E96-95)," *Journal of Testing and Evaluation*, JTEVA, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, Vol 26, No. 2, March 1998, pp. 83-88.
- (9) Kumaran, M. K., "An Alternative Procedure for the Analysis of Data from the Cup Method Measurements for Determination of water Vapor Transmission Properties," *Journal of Testing and Evaluation*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, Vol. 26, No. 6, November 1998, pp. 575-581.

Continuación anexo 1.



ASTM Internacional. *Standad Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials*.
ASTM Book of Standards, E96/E96M – 16. [http://43,252.73,26/files/sistem_mutu/ASTM
%20E96-E96M-16 %20- %20Test %20Method %20of %20WVTR.pdf](http://43,252.73,26/files/sistem_mutu/ASTM%20E96-E96M-16%20-%20Test%20Method%20of%20WVTR.pdf). Consulta: abril de 2021.

Anexo 2. Diseño de formulaciones de la publicación de evaluación de degradabilidad de almidón sin aditivos

A. Shafqat, N. Al-Zaqri, A. Tahir et al.

Saudi Journal of Biological Sciences 28 (2021) 1739–1749

Table 1
Composition of different bioplastic samples.

Sample Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Starch (ml)	40	40	40	40	38	38	38	38	36	36	36	36
Glycerol (ml)	0	5	0	2.5	0	5	0	2.5	0	5	0	2.5
Sorbitol (g)	0	0	5	2.5	0	0	5	2.5	0	0	5	2.5
Filler (g)	0	0	0	0	2	2	2	2	4	4	4	4

Table 2
Physical and chemical properties of Banana Peel Bioplastic (BPP) Samples.

Bioplastic Sample	Moisture Content %	Absorption of Water %	Solubility in Water %	Solubility in Alcohol %	Biodegradation %
BPP-1	5.58	218.39	42.53	39.02	12.07
BPP-2	37.63	104.48	85.57	77.22	81.41
BPP-3	11.88	85.66	83.67	72.2	70.25
BPP-4	21.34	98.86	85.17	74.44	69.96
BPP-5	5.5	198.7	28.14	29.63	49.48
BPP-6	21.28	106.31	72.26	59.96	62.61
BPP-7	9.51	94.08	67.91	56.43	58.39
BPP-8	14.35	101.55	70.19	59.54	57.66
BPP-9	1.46	210.06	25.35	23.46	53.19
BPP-10	20.24	122.36	62.98	51.25	69.8
BPP-11	7.11	113.37	59.41	49.38	67.63
BPP-12	9.37	114.56	59.9	50.59	65.32

Table 3
Physical and chemical properties of COM samples.

Bioplastic Sample	Moisture Content %	Absorption of Water %	Solubility in Water %	Solubility in Alcohol %	Biodegradation %
COM-1	6.54	215.79	10.53	8.62	29.59
COM-2	35.52	94.19	67.65	60	79.09
COM-3	10.31	87.9	65.32	52.21	78.4
COM-4	17.67	91.39	65.57	57.5	66.02
COM-5	5.07	163.89	10.19	8.61	31.94
COM-6	18.52	97.09	54.61	49.31	65.03
COM-7	6.97	91.13	54.19	49.01	56.37
COM-8	13.51	93.57	54.5	49.02	44.59
COM-9	4.65	215.69	8.97	8.05	34.76
COM-10	17.03	125.07	44.14	37.89	66.92
COM-11	5.52	110.56	40.99	37.24	66.56
COM-12	11.23	112.88	43.59	37.53	60.34

Continuación anexo 2.

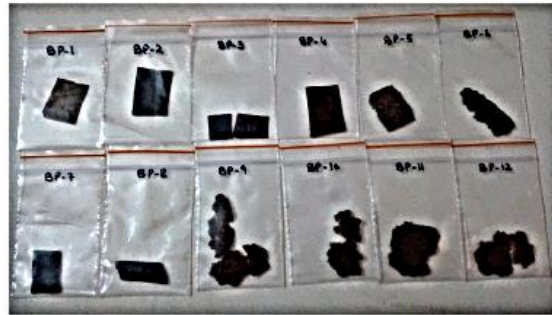


Fig. 1. Showing the twelve different banana peel starch based bioplastic samples produced.

1742

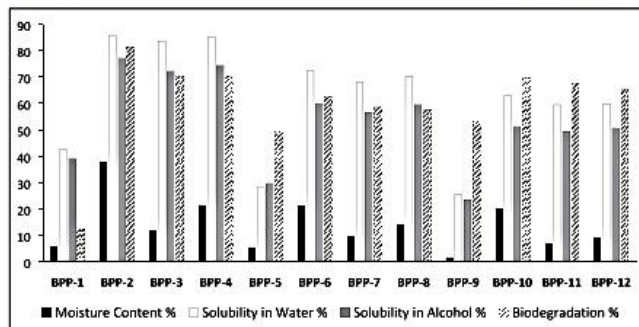


Fig. 2. Impact of filler amount on properties of BPP samples.

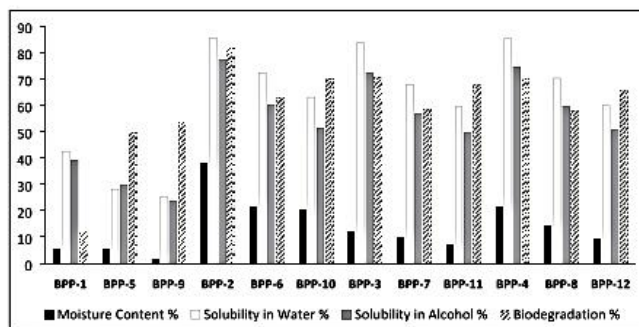


Fig. 3. Impact of plasticizer on properties of BPP samples.

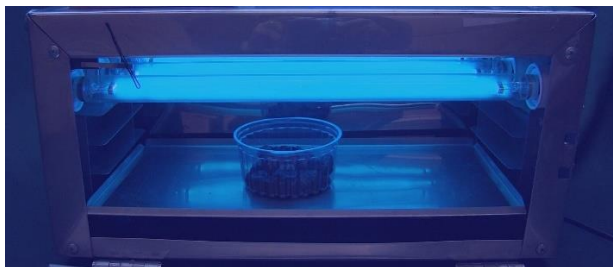
Fuente: SHAFQAT Arifa; AL-ZAQRI nabil; TAHIR Arifa; ALSALME Ali. *Synthesis and characterization of starch*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319562X20306707>. Consulta: abril de 2021.

Anexo 3. **Propuesta de procedimiento para análisis de degradabilidad por acción de rayos UV**

Se propone la metodología propuesta por Biolio (2013), que consiste en la evaluación de la biodegradación del material compuesto de ácido poliláctico expuesto a los efectos de la radiación UV, en la que aplicaron el intemperismo acelerado en cámaras QUV-Panel. Se proponen dos formas: la primera consiste en colocar los recipientes cerrados en una cámara hermética con luz UV y la otra consiste en almacenarlos en un recipiente de vidrio con una lámpara UV considerando el presupuesto con el que se cuente. Esto con el objetivo de aislar las muestras de la influencia del ambiente que contiene variables como la humedad y los cambios de temperatura durante las noches.

- Cortar un *film* de 10 g del producto obtenido de cada repetición de la formulación No.1 y variación No.1 según tabla IV, utilizando bioplástico proveniente del plátano verde.
- Medir peso de cada muestra.
- Colocar 5 películas de 10 g en cinco recipientes de vidrio.
- Tapar los recipientes.
- Colocar los recipientes la campana UV o en el recipiente de vidrio en el que se coloca la lámpara UV.
- Sacar la muestra del recipiente luego de haber pasado 24 horas en el recipiente.
- Registrar la masa de la muestra.
- Regresar la muestra al recipiente y taparla.
- Repetir pasos 6 y 7 cada 24 horas durante los primeros 5 días, luego a los 10, 15, 20, 25 y 30 días.
- Obtener el porcentaje de degradabilidad.

Ejemplo de una muestra para el estudio de degradabilidad con rayos UV.



Fuente: Portal Innova. *Limpiando con luz ultravioleta para erradicar COVID 19.*

<https://portalinnova.cl/limpiando-con-luz-ultravioleta-para-erradicar-coronavirus-covid-19/>.

Consulta: abril de 2021.

