

**EVALUACIÓN DE POLÍMEROS A BASE DE ALMIDÓN DE YUCA (*Manihot
esculenta crantz*) COMO MATERIA PRIMA PARA ELABORAR EMPAQUES
BIODEGRADABLES CON UTILIDAD INDUSTRIAL**

**YERALDIN AMPARO ROJAS GIL
LILIANA MARCELA SANTIAGO GOMEZ**

**UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR SECCIONAL AGUACHICA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS
INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
AGUACHICA – CESAR
2024**

**EVALUACIÓN DE POLÍMEROS A BASE DE ALMIDÓN DE YUCA (*Maniholt
esculenta crantz*) COMO MATERIA PRIMA PARA ELABORAR EMPAQUES
BIODEGRADABLES CON UTILIDAD INDUSTRIAL**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA
AMBIENTAL Y SANITARIA**

**YERALDIN AMPARO ROJAS GIL
LILIANA MARCELA SANTIAGO GÓMEZ**

**DIRECTOR
LUIS HERNANDO MONTOYA ARMENTA**

**CO DIRECTOR
ARLY DARÍO RINCÓN QUINTERO**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN
GESTIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO HUMANO SOSTENIBLE**

**UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR SECCIONAL AGUACHICA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS
INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
AGUACHICA – CESAR
2024**

NOTA DE APROBACIÓN

El trabajo de grado de Yeraldin Amparo Rojas Gil y Liliana Marcela Santiago Gómez, titulado “Evaluación de un polímero a base de almidón de yuca (*maniholt esculenta crantz*) como materia prima para elaborar empaques biodegradables con utilidad industrial”, ha sido aprobado por los jurados, quien no se hace responsable de su contenido, pero lo ha encontrado correcto en su calidad y en su forma de presentación por lo que en fe de lo cual firman.

YISSETH MARIOTTE SANCHEZ OJEDA
EVALUADOR 1

SERGIO IVAN GUARIN SANTIAGO
EVALUADOR 2

LUIS HERNANDO MONTOYA ARMENTA
DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

ARLY DARÍO RINCÓN QUINTERO
CODIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación va dedicado a mi madre Argelina Rocha Campo por siempre brindarme su amor y apoyo incondicional, a mi hijo Andrés Camilo Meneses Rojas por obligarme a nunca rendirme y así ser su gran ejemplo a seguir, a mi esposo Fernando Meneses Quintero por su apoyo, por su amor y por siempre brindarme una palabra de ánimo cuando sentía desfallecer y a mis hermanos Johan Moreno y Yerlis Rocha por siempre estar presentes para mí en cada etapa de mi vida.

Autor: Yeraldin Amparo Rojas Gil

Este proyecto de investigación está dedicado a mi amada familia, por ser mi mayor fuente de apoyo no solo durante mi carrera, sino a lo largo de toda mi vida. Gracias por brindarme amor, comprensión y fortaleza en cada paso del camino. A mi querida hermana, Sandra Santiago Gómez, por sus valiosos consejos, su infinita paciencia y sus constantes palabras de aliento, que me han permitido superar cada desafío y seguir adelante con confianza. Y a mi hermano, Francisco Santiago Gómez, por darme el regalo de amor más grande que alguien podría ofrecer: la oportunidad de cumplir mis sueños, culminar mi carrera y realizar esta tesis.

Autor: Liliana Marcela Santiago Gómez

AGRADECIMIENTOS

A Dios nuestro mayor guía y fuerza, te agradecemos infinitamente por darnos la sabiduría, la paciencia y la perseverancia para llegar hasta este momento tan importante en nuestras vidas; gracias por brindarnos salud y fortaleza en cada paso del proceso, incluso en los momentos más desafiantes.

A la universidad, nuestra segunda casa durante estos años de formación; gracias por brindarnos un entorno de crecimiento académico y personal, por ser un lugar que fomenta el pensamiento crítico y el desarrollo científico. A través de esta institución, no solo adquirimos conocimientos, sino también valores y principios que nos guiarán por el resto de nuestras vidas profesionales.

A los docentes, quienes han sido fundamentales en nuestra formación; gracias por compartir sus conocimientos, por su paciencia, su dedicación y por motivarnos a dar siempre lo mejor de nosotras. Cada uno de ustedes ha contribuido de manera invaluable a al crecimiento, no solo académico, sino también como persona. Su entrega y pasión por la enseñanza nos han inspirado a seguir adelante y a buscar siempre la excelencia en todo lo que hacemos.

A nuestro director de tesis, el doctor Luis Hernando Montoya Armenta, le expresamos el más profundo agradecimiento por su constante orientación, paciencia y dedicación a lo largo de todo este proceso. Su invaluable apoyo y guía permitieron transformar ideas en resultados concretos, y por siempre estar dispuesto a brindar su tiempo y conocimiento en cada etapa de este trabajo. Su capacidad para motivar y su compromiso con la formación nos inspiraron a superar cada desafío con confianza y determinación. Sin su experiencia y sus sabios consejos, este proyecto no habría alcanzado el nivel de excelencia que hoy tiene; le estamos profundamente agradecidas por su entrega y por haber creído en nosotras desde el principio.

A la ingeniera Yisseth Mariotte Sánchez Ojeda, su apoyo en la parte experimental de esta investigación fueron fundamentales para la realización de este trabajo. Su paciencia, dedicación y conocimientos en el laboratorio brindaron las herramientas necesarias para avanzar en el proceso enseñando el valor del rigor científico y la importancia de la perseverancia. Gracias por su tiempo, su disposición para resolver dudas y, sobre todo, por creer en nosotras y en este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABLAS	10
LISTA DE ANEXOS.....	11
GLOSARIO	12
RESUMEN	13
1. INTRODUCCIÓN	15
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
3. JUSTIFICACIÓN	20
4. OBJETIVOS	22
4.1 OBJETIVO GENERAL	22
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
5. MARCO TEÓRICO.....	23
5.1 CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS	23
5.2 POLÍMEROS	24
5.2.1 Clasificación de los polímeros	24
5.2.2 Polimerización	26
5.3 EL ALMIDÓN.....	27
5.3.1 Propiedades del almidón	28
5.3.2 La yuca como materia prima de polímero natural	30
5.4 EVALUACIÓN DE POLÍMEROS BIODEGRADABLES	33
5.4.1 Ensayo de tracción	34
5.4.2 Ensayo de flexión.....	34
5.4.3 Contenido de humedad absorbida	35
5.4.4 Densidad	36
6. MARCO LEGAL.....	37
7. ESTADO DEL ARTE.....	39
8. METODOLOGÍA	42
8.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN	42
8.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN	42
8.3 POBLACIÓN.....	42

8.4 MUESTRA	42
8.5 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN	43
8.6 DESARROLLO METODOLÓGICO	43
8.6.1 Diseño experimental	43
8.6.2 Trabajo de campo.....	47
8.6.3 Trabajo de laboratorio.....	49
8.6.4 Tratamiento de datos.....	50
8.7 HIPOTESIS.....	51
8.7.1 Hipótesis positiva.....	51
8.7.2 Hipótesis negativa.....	51
9. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	52
9.1 OBTENCIÓN DE LOS POLÍMEROS BIODEGRADABLES.....	52
9.1.1 Biopolímeros obtenidos en el quinto ensayo	52
9.2 PRUEBAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y MECÁNICAS APLICADAS A LOS BIOPOLÍMEROS A BASE DE ALMIDÓN DE YUCA	54
9.2.1 Resultados ensayo de tracción	54
9.2.2 Resultados ensayo de flexión.....	56
9.2.3 Resultados ensayo de dureza.....	59
9.2.4 Ensayo de contenido de humedad absorbida	61
9.2.5 Ensayo de densidad.....	63
9.2.6 Ensayos de degradabilidad.....	64
9.2.7 Ensayo de sellamiento térmico	66
9.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	68
11 CONCLUSIONES	74
12 RECOMENDACIONES.....	75
13 BIBLIOGRAFIA	76
14 ANEXOS	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Árbol problema del aumento de la contaminación por residuos sólidos.	19
Figura 2. Clasificación de los residuos sólidos.	23
Figura 3. Estructura de los copolímeros.	25
Figura 4. Estructura lineal de un polímero.	25
Figura 5. Estructura ramificada de un polímero.	26
Figura 6. Estructura de la glucosa.	27
Figura 7. Estructura de amilosa.	28
Figura 8. Estructura de amilopectina.	28
Figura 9. Obtención del almidón de yuca (<i>Maniholt esculenta crantz</i>).	47
Figura 10. Obtención de la película de biopolímero.	48
Figura 11. Muestras de los biopolímeros obtenidos en el quinto ensayo.	53
Figura 12. Resultados esfuerzo máximo de la prueba de tracción.	54
Figura 13. Resultados de elongación de la prueba de tracción.	55
Figura 14. Resultados de módulo de elasticidad de Young de la prueba de tracción.	55
Figura 15. Resultados esfuerzo máximo de la prueba de flexión.	57
Figura 16. Resultados de elongación de la prueba de flexión.	57
Figura 17. Resultados de módulo de elasticidad young de la prueba de flexión.	58
Figura 18. Resultados esfuerzo máximo de la prueba de dureza.	60
Figura 19. Resultados de elongación de la prueba de dureza.	60
Figura 20. Resultados de módulo de elasticidad young de la prueba de dureza.	61
Figura 21. Porcentaje de contenido de humedad absorbida.	62
Figura 22. Resultado de la prueba de densidad.	64
Figura 23. Resultados de la degradabilidad.	65
Figura 24. Resultado del sellamiento térmico.	67

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Principales departamentos productores de yuca en Colombia (2013).	31
Tabla 2. Primera formulación de los biopolímeros.	44
Tabla 3. Segunda formulación de los biopolímeros.	45
Tabla 4. Tercera formulación de los biopolímeros.	45
Tabla 5. Cuarta formulación de los biopolímeros.	46
Tabla 6. Dimensiones para pruebas mecánicas de los polímeros.	49
Tabla 7. Dimensiones para pruebas químicas de los polímeros.	50
Tabla 8. Análisis de varianza Anova.	68
Tabla 9. Comparaciones múltiples (HDS Tukey) ensayo de tracción.	70
Tabla 10. Comparaciones múltiples (HDS Tukey) ensayo de flexión.	71
Tabla 11. Comparaciones múltiples (HDS Tukey) ensayo de Dureza.	72

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Resultado del primer, segundo y tercer ensayo.....	86
Anexo 2. Resultado del cuarto ensayo.....	86
Anexo 3. Resultados generales de la prueba de tracción.	86
Anexo 4. Resultados generales de la prueba de flexión.....	87
Anexo 5. Resultados generales de la prueba de dureza.	87
Anexo 6. Porcentaje de contenido de humedad absorbida.	87
Anexo 7. Resultados de la prueba de densidad.....	88
Anexo 8. Resultados de la prueba de degradabilidad.	88
Anexo 9. Registro fotográfico.	88

GLOSARIO

Ácido poliláctico (PLA): Es un poliéster termoplástico que forma parte de los α -hidroxi-ácidos; su precursor es el ácido láctico, molécula quiral.

Almidón: Es una mezcla de polímeros de glucosa (amilopectina y amilosa) que las plantas producen y acumulan en forma de gránulos insolubles que presentan formas y tamaños diversos. Los gránulos del almidón son estructuras organizadas con dimensiones y características que varían entre especies.

Biodegradable: Es el proceso de un material o producto de tener la capacidad para descomponerse en ambiente natural, en un periodo de tiempo determinado, cambiando su estructura física y química, logrando que los elementos que los componen se incorporen nuevamente al ciclo natural.

Biopolímero: Los biopolímeros son macromoléculas provenientes de organismos vivos, como vegetal, animal, bacterias, etc.

Hidrosolubilidad: Como su nombre lo dice, es la cualidad de un sólido de ser soluble en el agua.

Residuos sólidos: Constituyen aquellos materiales en estado sólido desechados tras su vida útil, y que por lo general por sí solos carecen de valor económico, fuentes de origen principales encontramos, domésticos, industriales, urbanos entre otros.

Sintético: Hace referencia a un producto que no se consigue de forma natural en el medio ambiente, por el contrario se obtiene de manera artificial por medio de procedimientos industriales, por lo general son productos de difícil degradación en el medio ambiente, por su composición química.

RESUMEN

La contaminación por residuos sólidos está presentando cifras alarmantes a nivel mundial, pues actualmente se están generando 2010 millones de toneladas por año en todo el mundo, problemática que preocupa por las consecuencias causadas, entre ellas, la alteración del equilibrio natural de los ecosistemas tanto acuáticos como terrestres, siendo los residuos sólidos fabricados con polímeros sintéticos los que mayor afectación provocan al medio ambiente, dado que por su composición química son difíciles de degradarse en condiciones ambientales y ocasionan grandes pérdidas de fauna y flora. En busca de una solución a dicha problemática, se propone el uso de polímeros biodegradables elaborados a partir de almidón de yuca (*Maniholt esculenta crantz*); una materia prima abundante en Colombia, como una alternativa sostenible. Dado lo anterior, el objetivo principal de la investigación se fundamenta en evaluar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de biopolímeros a base de almidón de yuca determinando su viabilidad técnica para la fabricación de empaques con utilidad industrial. La metodología empleada incluye un diseño experimental bifactorial, donde variaron las proporciones de almidón y glicerol en la mezcla, dejando invariable el resto de los reactivos (agua y aceite de oliva), para un total de nueve unidades experimentales, las cuales se compararon con un polímero sintético de referencia (lámina de PET). Para el análisis de las propiedades mecánicas, se realizaron ensayos de tracción, flexión y dureza, mientras que las propiedades químicas analizadas fueron la degradabilidad en suelo y agua, la densidad, el porcentaje de humedad absorbido y el sellamiento térmico. Los resultados obtenidos se sometieron al análisis de varianza Anova, seguido del test de HSD de Tukey para demostrar con mayor precisión las diferencias estadísticas significativas entre las unidades experimentales. Con base en el análisis de resultados se logró determinar que los biopolímeros obtenidos tienen una alta capacidad de elongación y baja capacidad al esfuerzo máximo, lo cual los clasifica como un material flexible y poco dúctil; también presentaron una excelente biodegradabilidad tanto en agua como en suelo, en comparación a la muestra de polímero sintético de referencia. También se logró advertir que presentan limitaciones en cuanto a su resistencia mecánica, lo cual restringe su uso en aplicaciones industriales que requieren mayor durabilidad. Aunque los biopolímeros mostraron propiedades favorables en

términos de flexibilidad y sellado térmico, su fragilidad frente a cargas pesadas y su baja resistencia a la tracción limitan su aplicación en productos que requieren mayor solidez. Se comprobó que los polímeros a base de almidón de yuca son una alternativa prometedora para reducir la contaminación por plásticos, pero se necesita continuar optimizando su formulación para mejorar su resistencia mecánica y ampliar su campo de uso en diferentes industrias. Como resultado general del proyecto, se destaca el desarrollo de un material biodegradable, flexible y con excelentes comportamientos frente al sellado térmico, elaborado a base de un recurso natural renovable, contribuyendo así, al diseño de soluciones más sostenibles para la problemática ambiental planteada.

Palabras claves: Almidón, biodegradable, biopolímero, empaque, resistencia, yuca.

1. INTRODUCCIÓN

A mediados del siglo XIX en medio del auge de la revolución industrial, cuando la demanda comercial aumentaba y la economía de muchas regiones alcanzaba cifras históricas, llagan consigo muchas necesidades que cubrir en todas las áreas de la vida del hombre, en especial en el área industrial, es por ello que el hombre inicia una búsqueda implacable de soluciones que le permita saciar la mayor parte de las necesidades presentes (Arocena y Sansone, 2020), es así, que a inicios del siglo XX llega un invento llamado Baquelita de la mano del estadounidense Leo Baekeland que promete ser muy útil a nivel industrial, la baquelita era la primera sustancia plástica sintética, termoestable, resistente, aislante y difícil de degradar, que se podía moldear con calor, dado a sus características físicas y químicas fue un descubrimiento de gran aporte para el crecimiento de muchas industrias (Mijangos, 2020).

En la actualidad, aproximadamente 100 años después de ese gran logro, todo se torna desolador por aquello que alguna vez fue la solución, pues es notable la acumulación de residuos sólidos en muchos escenarios naturales, en especial, de residuos sólidos fabricados con polímeros sintéticos, que por sus distintivas características físicas y químicas hace imposible su degradación a corto tiempo en condiciones naturales, lo que está provocando toda esta problemática ambiental, visualizada en la alteración del equilibrio natural de los ecosistemas terrestres y acuáticos (Cedeño, et al, 2022). Por esa razón, crece la necesidad de remediar el daño ocasionado, mediante el desarrollo científico que posibilite el descubrimiento de alternativas más sustentables, con el fin de remplazar el uso de los polímeros sintéticos en diferentes industrias, así nace el interés de evaluar diferentes materias primas biodegradables que cumplan dicho rol, entre las biomásas analizadas se encuentra el almidón a partir de tubérculos nativos, los cuales se imponen como una alternativa viable (Doria y Echeverria, 2021), por ello, esta investigación tiene como objetivo evaluar polímeros a base de almidón de yuca (*Maniholt esculenta crantz*) como materia prima para elaborar empaques biodegradables con utilidad industrial, y así, contribuir a la trazada solución ecológica que permita impactar de manera positiva la situación ambiental actual.

Lo anterior se realizó mediante la determinación de las propiedades físicas (densidad, contenido de humedad absorbida y sellamiento térmico), químicas (degradabilidad en suelo y agua) y mecánicas (tracción, flexión, dureza) de nuevos biopolímeros elaborados a base de almidón de yuca (*Maniholt esculenta crantz*) en diferentes combinaciones de sus componentes (almidón de yuca, glicerol, aceite de oliva y agua), realizando comparaciones de los resultados obtenidos con una muestra de referencia (Tereftalato de Polietileno - PET) mediante el análisis de varianza ANOVA y el test de HSD Tukey, lo cual permite resaltar las diferencias significativas entre las pruebas mecánicas de los polímeros analizados y así contribuir a la comprensión de sus posibles usos como materia prima en la fabricación de empaques biodegradables con utilidad industrial, y así, aportar conocimiento a la trazada solución ecológica de la contaminación ambiental producida por la acumulación de residuos sólidos.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La contaminación por residuos sólidos a nivel mundial va en aumento y el panorama de Colombia no es muy alentador, puesto que anualmente se producen cerca de 12 millones de toneladas de residuos por año, de los cuales se recicla un promedio del 17%, es decir, cerca de dos millones de toneladas (Mejía, 2020). Unas de las principales causas de la contaminación por residuos sólidos es el consumo excesivo de productos que realiza el ser humano, bien sea de materia o energía, lo que repercute directamente en los residuos que se generan como consecuencia del diario vivir; la situación se agrava por el crecimiento acelerado de la población lo que obliga directamente a la industrialización de productos duraderos que cumplan con la demanda del mercado.

Es importante resaltar que “gran parte de los residuos sólidos generado son artículos de un solo uso de material plástico sintético como los pitillos, envolturas, botellas, bolsas entre otros” (Sánchez, 2020), que al tener como materia prima polímeros sintéticos inhiben la degradabilidad a corto plazo, lo que genera una contaminación al medio ambiente, pues estos se acumulan en ecosistemas marítimos, terrestres y acuáticos, generando desequilibrio ambiental. Según la organización ecologista internacional Greenpeace “se estima que 700 especies marinas se ven afectadas por esta problemática, entre ellas, tortugas marinas, aves, ballenas y delfines”. Se dice que si no mejora el ritmo actual de consumo necesitaríamos tres planetas para disponer nuestros residuos, pues se prevé que para el año 2050 el crecimiento demográfico alcanzará la suma de 9.600 millones de personas en el planeta (Greenpeace, 2018).

Como se logra dimensionar, la contaminación por residuos sólidos es una problemática mundial, y Colombia se sitúa entre los primeros países de América Latina, con mayor generación de residuos sólidos (Arrieta, Durango y Arizal, 2018). Según la Superintendencia de Servicios Públicos se estima que en la ciudad de Bogotá se generaron 2,2 millones de toneladas, lo equivalente al 21% del total de lo dispuesto en el país; por su parte Cali, Medellín y Barranquilla en conjunto, generaron en promedio 657 mil toneladas de residuos

en el mismo periodo de tiempo y; ciudades como Cartagena, Bucaramanga, Santa Marta y Pasto en conjunto, generaron en promedio 200 mil toneladas, donde un alto porcentaje de estos residuos terminan en los rellenos sanitarios, mares y ríos del país, y en algunos casos en botaderos a cielo abierto sin ningún tipo de tratamiento ni aprovechamiento. Se proyecta que para el año 2030, un colombiano generará 321 kg año^{-1} , sin embargo, las cifras estadísticas hasta el año 2018 indicaron una generación per cápita de 515 kg año^{-1} (Caballero, 2021), donde gran parte de estos residuos son de material plástico no degradables, debido a sus múltiples aplicaciones en industrias como la medicina, las telecomunicaciones, la agricultura y los alimentos (Mejía, 2020).

Frente a este panorama nacional es necesario generar alternativas con mejores perspectivas ecológicas que faciliten mitigar el impacto ambiental causado por la generación de residuos sólidos, en especial los plásticos sintéticos. Esto ha generado un incremento en los estudios para desarrollar productos biodegradables elaborados a partir de polímeros naturales, entre los cuales destaca el almidón, por ser es un material muy prometedor para esta finalidad (Barrios et al., 2015).

Teniendo en cuenta la problemática anterior, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Es posible generar un polímero a base de almidón de yuca, eficaz para elaborar empaques con utilidad industrial?

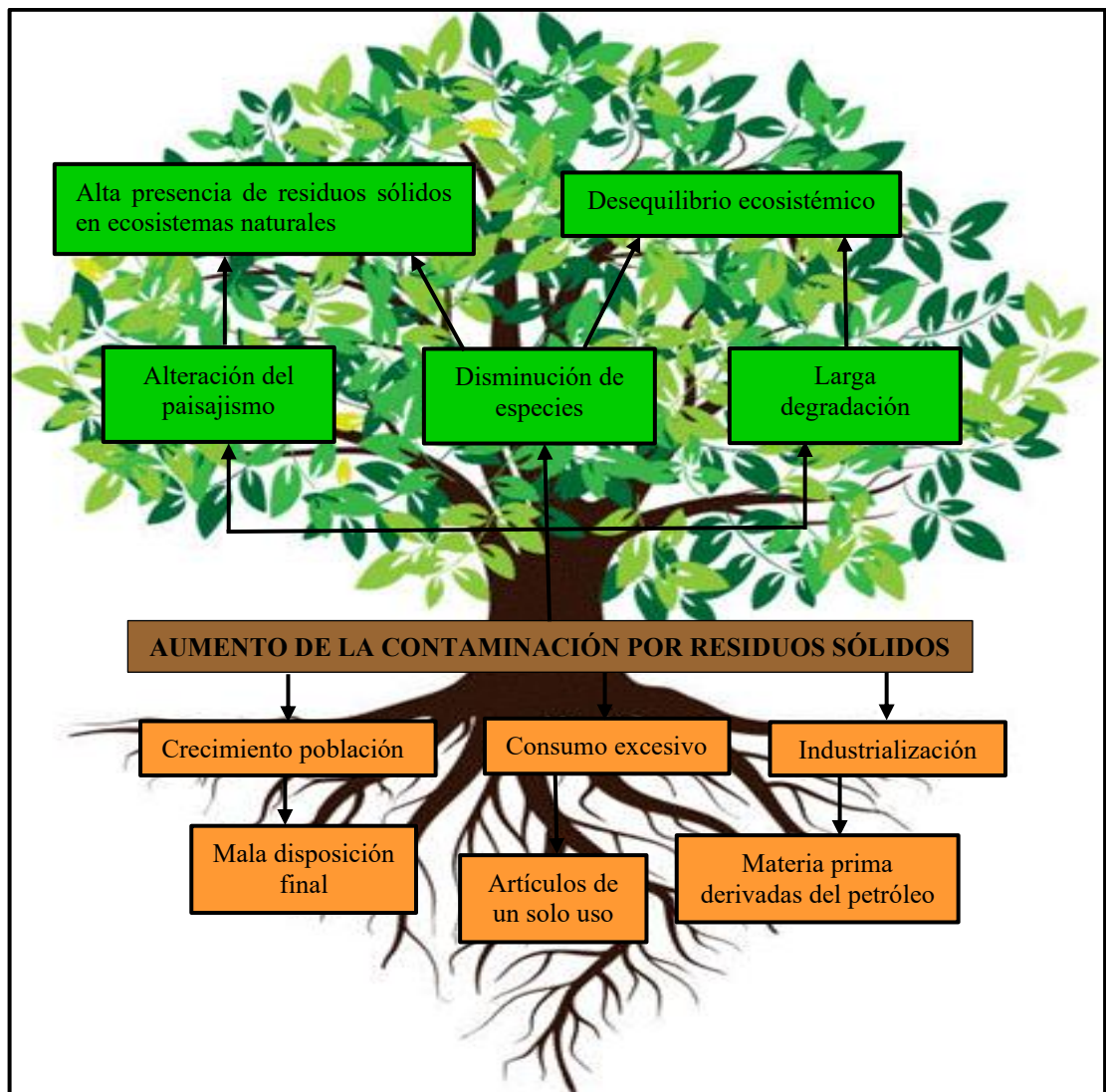


Figura 1. Árbol problema del aumento de la contaminación por residuos sólidos.
Fuente: Autores, 2024.

3. JUSTIFICACIÓN

Son muchas las alternativas que se pueden aplicar, para mejorar la situación nefasta que vive el planeta a causa de los residuos sólidos, especialmente aquellos que tienen como materia prima polímeros sintéticos (plástico), entre ellas se encuentra el reciclaje, que consiste en aprovechar dichos residuos, mediante la transformación industrial o artesanal que fortalece la fabricación de nuevos artículos, agregándole un nuevo valor económico (Escalante, 2014); otra alternativa, son las campañas de sensibilización dirigida a la comunidad por parte de empresas privadas y públicas prestadores del servicio de aseo o actividades afines, con el fin de generar cultura y conocimiento en temas como la separación en la fuente, clasificación de los residuos sólidos generados, reutilización y aprovechamiento de los mismos, entre otros (Hinestroza y Acero, 2020). En la actualidad, estas alternativas no han logrado impactar de manera positiva la problemática ambiental para la cual se ejecutan, como muestra de ello, es la fatídica situación que presenta el relleno sanitario Doña Juana en la ciudad de Bogotá D.C. (Colombia) que diariamente recibe 6.500 toneladas de residuos sólidos sin clasificar de los cuales un 80% de estos podrían aprovecharse o reutilizarse (Avendaño, 2022).

Teniendo claro que el problema persiste y cada día crece más, se hace necesario el estudio de nuevas alternativas capaces de atacar el problema desde su génesis, por ese motivo, las investigaciones sobre los bioplásticos obtenidos a partir de polímeros naturales como el almidón siguen en aumento, buscando un aporte a la solución de la problemática. En Colombia, la producción de bioplásticos a base de almidón es muy prometedora, puesto que se cuenta con suficientes materias primas, como los productos amiláceos procedentes de raíces y tubérculos; dentro de las raíces, la yuca es el principal producto como materia prima, cuyas condiciones edafoclimáticas le confieren preferencias para su producción y procesamiento a nivel nacional y en otros países de Latinoamérica. En el norte del departamento del Cauca y sur del Valle (Colombia), se cultivan variedades industriales de yuca para uso no alimentario que son útiles para su agro-industrialización y obtención de harina (Navia-Porras, Ayala-Aponte y Villada-Castillo, 2015).

Teniendo en cuenta lo anterior, es razonable realizar una investigación con la finalidad de evaluar un polímero natural y verificar que cumpla con unas propiedades similares a las de un polímero no degradable, que permita la sustitución de este en diferentes industrias, con el propósito de contribuir a los siguientes retos medio ambientales y sociales: i) Reducir los gases de efecto invernadero, ii) Disminuir la acumulación de los desechos sólidos que no se degradan en el ambiente y, iii) Minimizar la dependencia en el uso de los recursos de origen fósil para la producción de plásticos (Navia-Porras et al., 2015).

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar polímeros a base de almidón de yuca (*Maniholt esculenta crantz*) como materia prima para elaborar empaques biodegradables con utilidad industrial.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Identificar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los polímeros a base de almidón de yuca mediante pruebas de laboratorio.

Determinar la biodegradabilidad en suelo y agua de los polímeros obtenidos a base de almidón de yuca.

Establecer el uso industrial de los polímeros obtenidos a base de almidón de yuca de acuerdo a las propiedades mecánicas, físicas y químicas que presenten.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

Residuo sólido es todo material en estado sólido, orgánico u inorgánico descartado por el hombre después de un proceso de transformación, fabricación, actividad doméstica o consumo de un bien, servicio o producto (Barradas, 2009).

Según Rivas (2018), los residuos sólidos se clasifican bajo tres criterios (ver figura 2): a) según su composición pueden ser orgánicos procedentes de un ser vivo o inorgánicos que proceden de un proceso artificial. b) según su origen, dependiendo de la ubicación geográfica del sitio donde se generan, pueden ser en área urbana o rural y c) según su peligrosidad, se subdividen en peligrosos (aquellos que pueden suponer un riesgo para los seres vivos y el medio ambiente) y los no peligrosos (aquellos que no son ni inertes ni peligrosos).

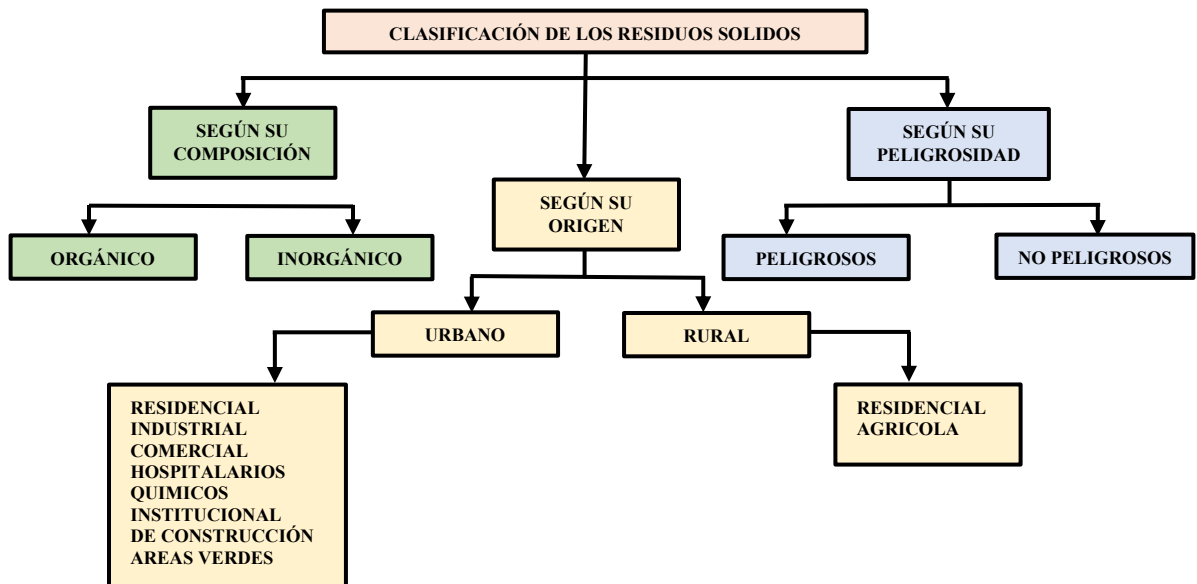


Figura 2. Clasificación de los residuos sólidos.

Fuente: Rivas, 2018.

5.2 POLÍMEROS

Los polímeros son macromoléculas de alto peso molecular formadas por la combinación repetida de un gran número de moléculas pequeñas de bajo peso molecular llamadas monómeros (Labeaga Viteri, 2018).

5.2.1 Clasificación de los polímeros

5.2.1.1 Clasificación de los polímeros según su origen

- **Polímeros naturales:** Son sustancias del reino vegetal o animal como la seda, lana, algodón, celulosa, almidón, proteínas, polisacáridos, lípidos, caucho natural (látex o caucho), ácidos nucleicos como el ADN y otras sustancias.
- **Polímeros semisintéticos:** Son productos modificados de polímeros naturales. Por ejemplo, nitrocelulosa o caucho vulcanizado.
- **Polímeros sintéticos:** Son creados por humanos. Este grupo incluye plásticos, siendo los más familiares en la vida cotidiana el nailon, el poliestireno, el cloruro de polivinilo (PVC) y el polietileno. La amplia variedad de propiedades físicas y químicas de estos compuestos les permite ser utilizados en las industrias de la construcción, el embalaje, la automoción, la aviación, la electrónica, la agricultura y la medicina.

5.2.1.2 Clasificación de los polímeros según su comportamiento térmico

- **Polímeros termoplásticos:** Estos son los que se pueden moldear por calentamiento. Los ejemplos son polietileno y polipropileno (Labeaga Viteri, 2018).
- **Polímeros termoestables:** El polímero se descompone químicamente cuando se calienta (Labeaga Viteri, 2018).

5.2.1.3 Clasificación de los polímeros según la unión de sus monómeros

- **Polímeros homopolímeros:** Un polímero formado por la combinación de un monómero (Labeaga Viteri, 2018).
- **Polímeros copolímeros:** Un polímero se forma combinando dos monómeros diferentes. Dependiendo del orden en que los dos monómeros estén dispuestos en la estructura, podemos tener copolímeros alternativos, copolímeros en bloque o copolímeros aleatorios (Labeaga Viteri, 2018).

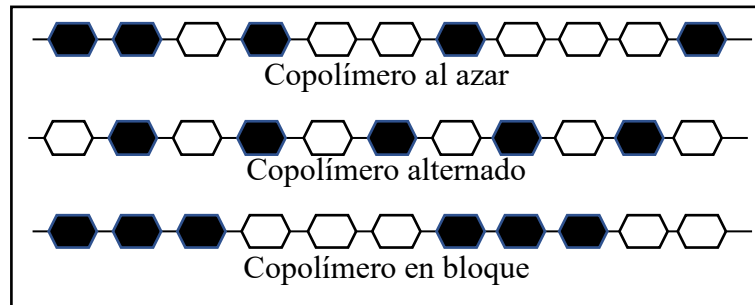


Figura 3. Estructura de los copolímeros.

Fuente: Labeaga, 2018.

5.2.1.4 Clasificación de los polímeros según su estructura química

- **Polímeros lineales:** Se forma cuando el monómero original tiene dos puntos de ataque para que la polimerización ocurra en una dirección y en ambas direcciones.

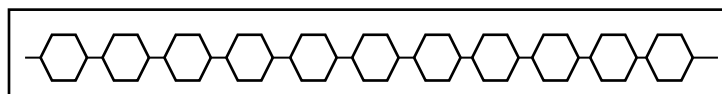


Figura 4. Estructura lineal de un polímero.

Fuente: Labeaga, 2018.

- **Polímeros ramificados:** Se forma cuando el monómero original tiene tres o más puntos de ataque para que la polimerización ocurra en tres dimensiones.

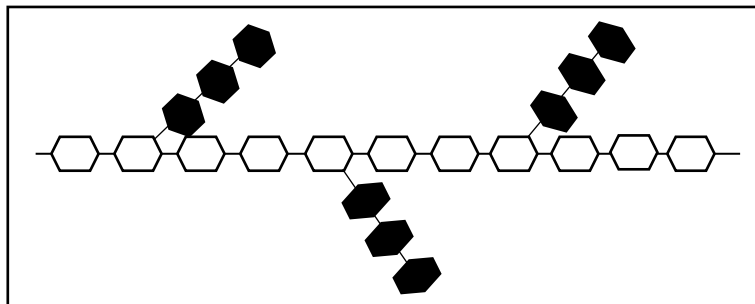


Figura 5. Estructura ramificada de un polímero.

Fuente: Labeaga, 2018.

5.2.2 Polimerización

La polimerización es una reacción química en la que, compuestos de bajo peso molecular, llamados monómeros, interactúan entre sí para formar enlaces químicos en una reacción en cadena. Este fenómeno permite la formación de moléculas grandes y pesadas llamadas polímeros (Valdez, 2009).

5.2.2.1 Clasificación de la polimerización

- **Polimerización por adición:** Esta coincidencia se crea cuando los monómeros se agregan al núcleo del polímero principal a través de enlaces duales entre los átomos de carbono. La gran característica de este tipo de coincidencia son los monómeros, parte del polímero, sin su pérdida atómica, es decir, se crea la composición química de la cadena carbonatada, igual a la suma de los ingredientes de los monómeros. Química, que es parte de la sección de polímero. Este tipo de polimerización no produce subproductos (Morfin, 2020).
- **Polimerización por condensación:** La polimerización por condensación ocurre cuando dos o más monómeros se combinan para extraer una molécula de agua. Esto significa que

los monómeros pierden átomos a medida que pasan a formar parte del polímero. Este tipo de polimerización produce subproductos. Este tipo de polimerización ocurre en pasos donde dos monómeros pueden reaccionar entre sí para formar macromoléculas cuyos grupos terminales pueden reaccionar a su vez para formar polímeros lineales de alto peso molecular (Morfin, 2020).

5.3 EL ALMIDÓN

Es un polisacárido natural (un carbohidrato simple, más comúnmente glucosa) que se encuentra en varias plantas y microorganismos. Entre las principales fuentes naturales de almidón se encuentran los cereales como el maíz y el trigo, así como el arroz, los tubérculos como la yuca y la patata, y las legumbres como los guisantes (Gaitán, 2009).

El almidón es la principal reserva alimenticia de las plantas, se encuentra en forma de gránulos microscópicos en las raíces y semillas de algunas plantas; estructuralmente, el almidón consta de dos moléculas, amilosa y amilosa y amilopectina con una proporción de 10-20% de amilosa y 80% a 90% de amilopectina, respectivamente (Gaitán, 2009).

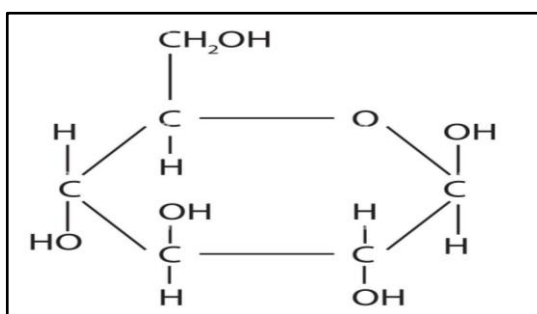


Figura 6. Estructura de la glucosa.

Fuente: Gaitán, 2009.

Las moléculas de amilosa constan de alrededor de 200 a 20000 moléculas de glucosa unidas por enlaces glucosídicos α -1,4 enrolladas en forma de hélice, como se muestra en la figura 6 (Gaitán, 2009).

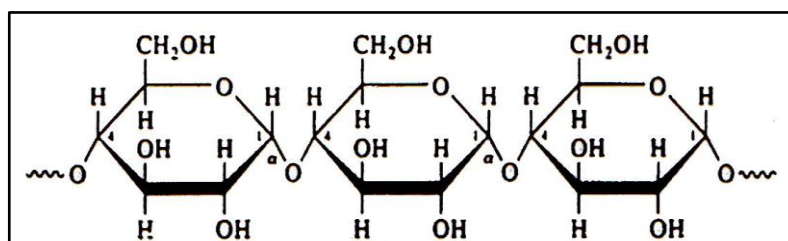


Figura 7. Estructura de amilosa.

Fuente: Gaitán, 2009.

Mientras que las moléculas de amilopectina están compuestas de aproximadamente 10.000 y 20.000.000 de unidades de glucosa unidas por enlaces glucosídicos α -1,4 y α -1,6 se encuentran comúnmente las ramificaciones de la cadena principal a través de enlace glucosídicos α -1,6 con otras moléculas de glucosa, como puede observarse en la figura 7 (Gaitán, 2009).

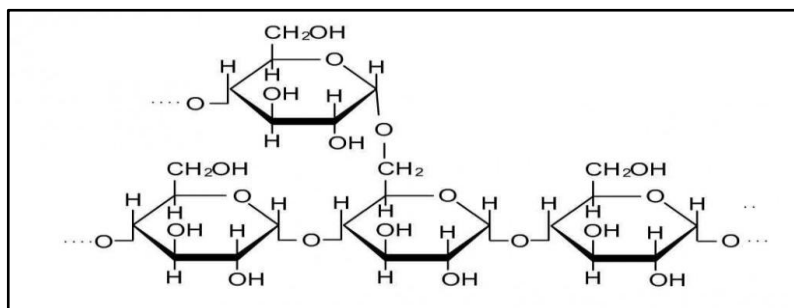


Figura 8. Estructura de amilopectina.

Fuente: Gaitán, 2009.

5.3.1 Propiedades del almidón

5.3.1.1 Gelatinización

Esta es la pérdida de gránulos de almidón semicristalino en presencia de calor y grandes cantidades de agua con poca o ninguna polimerización. Los gránulos de almidón son solubles en agua y disolventes orgánicos. El proceso muestra que, en solución acuosa, las partículas tienden a hincharse cuando se exponen al calor en temperaturas que oscilan entre los 60 °C hasta los 90 °C, mientras que el rompimiento de enlaces ocurre a una temperatura de 150 °C aproximadamente lo que provoca el desenrollamiento de la hélice estructural e incita a la

perdida de sus propiedades cristalinas dando lugar a la gelatinización. Una vez gelatinizada la mezcla su viscosidad aumenta debido a la concentración de almidón y la absorción de agua, esto indica que la rigidez del polímero producido es directamente proporcional a la viscosidad (Gallo, 2016).

5.3.1.2 Retrogradación

Es la reorganización espontánea de los enlaces de hidrógeno y las cadenas moleculares, lo que supone un aumento del estado ordenado. Este fenómeno ocurre después de que se completa la gelatinización, tan pronto como la temperatura desciende y comienza el enfriamiento, mientras que la solubilidad en agua fría disminuye y la turbidez aumenta (Gaitán, 2009).

5.3.1.3 Transición vítrea

Se refiere al cambio provocado por un aumento de temperatura que modifica las propiedades de un polímero, de un sólido quebradizo y quebradizo a un sólido plástico, la temperatura exacta a la que ocurre este fenómeno se denomina temperatura de transferencia de vidrio (Gaitán, 2009).

5.3.1.4 Desestructuración

Este es el proceso de convertir partículas de almidón cristalino en una matriz homogénea de polímeros amorfos, acompañado de la ruptura de los enlaces de hidrógeno entre las moléculas de almidón y su despolimerización. Los factores físicos y químicos incluyen la temperatura, el esfuerzo cortante producido por la extrusora o la máquina de inyección, la tasa de esfuerzo, el tiempo de tracción, el contenido de agua y la energía aplicada (Gaitán, 2009).

5.3.2 La yuca como materia prima de polímero natural

La yuca es un tubérculo rico en almidón originario de los trópicos y subtrópicos. Aunque es uno de los cultivos más importantes en los países tropicales, es poco conocido fuera de ellos. Proviene de América tropical, pero en los años 1600, los exploradores portugueses la habían llevado a África y Asia. La yuca se cultiva en unos 92 países, donde alimenta a más de 500 millones de personas.

5.3.2.1 Métodos de siembra y producción

La yuca es una planta perenne leñosa con un tallo cilíndrico formado por nudos (donde las hojas se unen al tallo) y entrenudos (la parte del tallo entre dos nudos). El diámetro varía de 2 a 6 cm y la altura es de aproximadamente 1 a 3 metros. Tiene la mejor reproducción vegetativa, por lo que los tallos son importantes porque cuando maduran se cortan en lóbulos de 7 a 30 cm de largo para la propagación. Las hojas son largas, gruesas, duras y con forma de xifoides, y las hojas se forman durante los primeros 3-4 meses de vida de la planta más grande. Sus flores son pequeñas y simples (sin sépalos ni corola), unisexuales (macho y hembra en la misma planta) y polinizadas cruzadas por insectos. La raíz es un tubérculo alargado con corteza exterior marrón, leñosa, corteza interior blanca o rosada; se degradan fisiológicamente rápidamente después de la cosecha. La pulpa es la parte útil del tubérculo, almacenando almidón, por lo que tiene el mayor valor económico, representando el 80% del peso fresco del tubérculo (Baquero, Gutiérrez y Parada, 2004).

Los métodos más comunes de siembra son manuales y mecanizados, excavando manualmente la estaca del tallo a una profundidad promedio de 5 a 10 cm en comparación con una profundidad promedio de 20 cm, generalmente se planta en posición vertical, asegurándose de que todavía haya un número suficiente de cogollos por debajo de la tierra y esta tarea requiere de 6 a 8 ingresos por hectárea por día. Los sistemas agrícolas mecanizados son practicados por grandes productores con extensas plantaciones de siembra. La profundidad de siembra en posición horizontal es de 5 a 8 cm y la sembradora es operada por

dos operadores (alimentadores) y un conductor de tractor, quienes siembran de 5 a 7 hectáreas por día. Un indicador de la madurez de la yuca es la erosión del suelo alrededor de la planta, que ocurre de 7 a 10 meses después de la siembra (Baquero, Gutiérrez, y Parada, 2004).

5.3.2.2 Producción de yuca en Colombia

Colombia cosecha un promedio de 1,9 millones de toneladas de yuca al año, con una tasa de crecimiento del 1,1%, posicionando al país como el tercer productor de yuca más importante después de Brasil y Paraguay, con un rendimiento promedio de 10,4 t ha⁻¹, producidas principalmente en la Costa Atlántica, Llanos Orientales y Santander entre otras regiones. En la tabla 1 se relaciona la producción por departamentos para el año 2013 según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.

Tabla 1. Principales departamentos productores de yuca en Colombia (2013).

Departamento	Área cosechada (ha)	Producción (t)	Rendimiento (t ha ⁻¹)
Bolívar	32.800	329.954	10,1
Córdoba	21.437	266.925	12,5
Sucre	16.209	166.779	10,3
Magdalena	12.070	91.295	7,6
Norte de Santander	9.161	118.477	12,9
Santander	8.634	88.343	10,2
Arauca	7.985	120.430	15,1
Otras	64.262	649.645	10,4
Total	172.558	1.831.847	11,1

Fuente: Ministerio de agricultura y desarrollo rural, 2013.

5.3.2.3 Usos de la yuca en Colombia

5.3.2.3.1 Alimentación humana

Tanto las raíces como las hojas de la yuca son comestibles para los humanos. El primero es fuente de hidratos de carbono y el segundo es fuente de proteínas, minerales y vitaminas (caroteno y vitamina C). La presencia de glucósidos cianogénicos es un factor determinante en el aprovechamiento de la yuca en la producción. Existen las llamadas variedades "dulces"

que son bajas en estos glucósidos y se pueden comer de manera segura cuando se preparan adecuadamente. Otras, conocidas como "drogas amargas", tienen un contenido tan alto de estas sustancias que se necesitan procesos más complejos para hacerlas aptas para el consumo humano. Estas variedades se utilizan en procesos industriales. El potencial culinario de la yuca es muy amplio. En Colombia se utiliza para tortas, totopos, purés, salsas, donas, humus o entrantes (chips), croquetas y arepas precocidas que se congelan y luego se comen fritas, entre otras cosas (Aguilera, 2012).

5.3.2.3.2 Alimentación animal

La yuca juega un papel importante en la alimentación balanceada ya que es una fuente de carbohidratos. Hay dos posibilidades: usar hojas y usar raíces. El primero es fuente de proteínas, fibras minerales y colorantes (vitamina A, betacaroteno), el segundo es fuente de energía (almidón). Las hojas se pueden secar con luz y calor natural, pero a la sombra, porque con el sol pierden su color y vitaminas (en el Caribe se secan en un día). Debido a su poder calorífico, la yuca ofrece buenas opciones de alimentación, quizás el método más conocido es el secado para producir trozos o rodajas secas; Actualmente, los copos secos se pueden reciclar para producir tabletas (comprimidos). Los animales pueden comer toda la planta de yuca. El proceso debe ser el siguiente: pelado, cortado, secado y molido. Puede proporcionar alimento para cualquier industria ganadera como avícola, porcina, láctea, aluvial y acuícola (Aguilera, 2012).

5.3.2.3.3 Almidones

El extracto de raíz de yuca se usa en una gama de productos, como pegamento con encías plegables, sellos, enlaces, sobres, recubrimiento en papel, pañales desechables; enlaces en la construcción de un pegamento de madera de concreto y con capas múltiples; como pegamento en los explosivos del fósforo; Adhesivo de espuma de metal, relación de fundición; en farmacéuticos en forma de cápsulas y tabletas de productos farmacéuticos; en textiles como un botón listo al final de la tela, imprima; en la producción de cremas de

maquillaje cosméticos; como el aislamiento, los pesticidas se absorben en la preparación de jabón, detergentes y elementos de limpieza, donde actúa como una sustancia superficial natural y aumenta la formación y la estabilidad en la espuma y es biodegradable; esto se presenta depositando el cuerpo permanentemente en el proceso de flotación y explicando en el proceso de procesamiento de metal y diluyente en la industria del tinte, incluidas las películas de plástico que pueden ser biodegradables y la batería seca. La explotación del almidón se puede llevar a cabo en plantas manuales con una capacidad de varias toneladas por mes y en fábricas gigantes de hasta 400,000 toneladas por año. En ambos casos, el proceso es el mismo: las raíces se lavan, se pelan y luego se remojan a fondo. A continuación, el almidón y el agua que lo contiene se separan de las fibras y proteínas contenidas en él mediante diferentes sistemas de filtración. Además, el agua y el almidón se separan por gravedad o en un sistema centrífugo. Finalmente, el almidón se seca y se muele para su envasado y venta. Las características específicas del almidón incluyen la proporción de amilosa a amilopectina y el tamaño del grano. En la producción de almidón, las divisiones Sucre y Atlántico se distinguen por un producto destinado a uso industrial (Aguilera, 2012).

5.4 EVALUACIÓN DE POLÍMEROS BIODEGRADABLES

Los polímeros biodegradables son aquellos cuya degradación se efectúa de manera aerobia o anaerobia bajo condiciones que naturalmente ocurren en la biosfera, en dicho, proceso intervienen macroorganismos tales como; bacterias, hongos y algas, que aceleran el proceso de degradación (Soto, 2023). Los polímeros biodegradables se consideran una alternativa sostenible y con gran viabilidad para sustituir polímeros sintéticos en diferentes aplicaciones, es por ello, la necesidad de evaluar sus propiedades mecánicas para lograr ampliar la gama de aplicaciones a nivel industrial (Posada y Montes, 2022), dentro de las propiedades mecánicas que normalmente son evaluadas se destacan las siguientes:

5.4.1 Ensayo de tracción

Permite evaluar la resistencia elástica, por medio de la aplicación de fuerzas uniaxiales en el mismo sentido del eje longitudinal de la probeta, hasta el punto de ruptura (Ortiz, et al, 2021), este ensayo se puede realizar a un material mediante maquinas desarrolladas para tal fin; para evaluar los resultados se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\epsilon = \frac{D}{L} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{(F*100)}{A_s} \quad (2)$$

Donde:

ϵ = Deformación lineal

D = Deformación

L = Longitud

σ = Esfuerzo

F = Fuerza

A_s = Área seccional transversal

5.4.2 Ensayo de flexión

Determina la capacidad de flexión de los materiales, cuando son sometidos a fuerzas aplicadas perpendicularmente a su eje longitudinal (Cely, 2018). Se evalúa por medio de las siguientes ecuaciones:

$$I = \frac{(b*h^3)}{12} \quad (3)$$

$$\mathbf{M_f} = \frac{(\mathbf{F*L})}{4} \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \frac{\mathbf{M_f*c}}{\mathbf{I}} \quad (5)$$

$$\mathbf{E} = \frac{(\mathbf{F*L^3})}{48*\mathbf{I*\delta}} \quad (6)$$

Donde:

I = Momento de inercia

b = Base

h = Altura

M_F = Momento flexionante

F = Fuerza

L = Longitud

σ = Esfuerzo

c = Mitad de la altura

E = Modulo de elasticidad

δ = Deflexión

5.4.3 Contenido de humedad absorbida

Es la medida porcentual de masa de agua que contiene una muestra, a través del diferencial de su masa inicial (Red colombiana de metrología, 2021), se define de la siguiente manera:

$$\mathbf{H_a} = \frac{(\mathbf{P_f-P_i})}{\mathbf{P_i}} * 100 \quad (7)$$

Donde:

H_a = Contenido de humedad absorbida; **P_F** = Peso final; **P_i** = Peso inicial.

5.4.4 Densidad

Es la relación entre la masa y el volumen de una sustancia, ya sea sólida, líquida o gaseosa (Araujo, 2023), se define mediante la ecuación:

$$\rho = m / V \quad (8)$$

Donde:

ρ = Densidad

m = Masa

V = Volumen

6. MARCO LEGAL

Ley 23 de 1973. Por la cual se dictan principios fundamentales sobre prevención y control de la contaminación del aire, agua y suelo y otorgó facultades al presidente de la República para expedir el Código de los Recursos Naturales (Minambiente, 2021).

Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y se dictan otras disposiciones (Minambiente, 2022).

Ley 2232 de 2022. Por la cual se establecen medidas tendientes a la reducción gradual de la producción y consumo de ciertos productos plásticos de un solo uso y se dictan otras disposiciones (Cancillería, 2022).

Decreto Ley 2811 de 1974. Por la cual se crea el Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y No Renovables y de Protección al Medio Ambiente. El ambiente es patrimonio común, el estado y los particulares deben participar en su preservación y manejo. Regula el manejo de los RNR, la defensa del ambiente y sus elementos (Minambiente, 2022).

Decreto 1713 de 2002. El presente Decreto establece normas orientadas a reglamentar el servicio público de aseo en el marco de la gestión integral de los residuos sólidos ordinarios, en materias referentes a sus componentes, niveles, clases, modalidades, calidad, y al régimen de las personas prestadoras del servicio y de los usuarios (Minambiente, 2002).

Decreto 1505 de 2003. Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1713 de 2002, en relación con los planes de gestión integral de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones (Minambiente, 2003).

Decreto 596 de 2016. Por el cual se define el esquema operativo para la formalización de las organizaciones recicladoras y recicladores de oficio en toda Colombia (Minambiente, 2016).

Decreto 2198 de 2017. El cual expresa en su Título 6, El Impuesto Nacional al Consumo de Bolsas Plásticas, de lo que se espera una reducción del 27% para el año 2017 (Minambiente, 2017).

Resolución 0668 de 2016. Por la cual se reglamenta el uso racional de bolsas plásticas y se adoptan otras disposiciones (Minambiente, 2016).

Resolución 1407 de 2018. Por la cual se reglamenta la gestión ambiental de los residuos de envases y empaques de papel, cartón, plástico, vidrio, metal y se toman otras determinaciones (Minambiente, 2018).

Resolución 2184 de 2019. Esta resolución exige la adopción del código de colores para el correcto aprovechamiento y disposición de los residuos a partir del primero de enero del año 2021. Este código de colores dicta que el verde representará los residuos orgánicos, el blanco representará los residuos como plásticos, vidrio, metales, papel o el cartón, y que el color negro representará todos aquellos residuos que ya no son susceptibles de ser aprovechados (Minambiente, 2019).

7. ESTADO DEL ARTE

Los polímeros sintéticos comúnmente conocidos como plástico, provienen de recursos fósiles catalogados no renovable, se originaron a mediados del siglo XX revolucionando las diferentes industrias de la época; en la actualidad se logra evidenciar el progreso de este producto en diferentes campos de aplicaciones, gracias a sus propiedades químicas y físicas, especialmente la permeabilidad que aumenta su durabilidad, cualidades que a su vez se convierten en factores principales de la problemática medio ambiental que atraviesa el planeta, como lo es, la acumulación excesiva de plástico en los diferentes ecosistemas de la tierra, causada por la poca degradabilidad que los polímeros sintéticos presentan en condiciones naturales (Avilés, 2006). Partiendo de esta perspectiva, se hace necesario abordar el tema de los polímeros biodegradables como sustitutos a los polímeros sintéticos, direccionando el interés investigativo en los biopolímeros obtenidos a partir de recursos agrícolas, particularmente de la yuca, para la obtención de empaques biodegradables. Así lo expresa Navia y Villada en su artículo “El impacto de la investigación en empaques biodegradables en ciencia, tecnología e innovación” (Navia y Villada, 2013).

Meneses, Corrales y Valencias (2007), realizaron el estudio titulado “Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir de almidón de yuca”, estos seleccionaron seis muestras del polímero obtenido (4 láminas y 2 placas debidamente rotulada), para someterlas a cuatro propiedades de estudio: a) La resistencia a la tracción, donde se evidencio que las lámina presentan mejor comportamiento debido a la gelatinización durante el proceso; b) La dureza: se evidencia que la dureza es mayor en las láminas y mejores propiedades mecánicas en comparación con las placas; c) La densidad: donde laminas y placas presentaron diferentes resultados y d) El comportamiento frente al agua: Se comprueba que todas las muestras son susceptibles al agua. Se concluye que es viable realizar un producto que no requiera una resistencia a la tracción muy alta y no debe estar expuesto al agua ni a condiciones de humedad elevadas (Meneses, Corrales, y Valencia, 2017).

Así mismo, Arroyo y Alarcón (2013), desarrollaron la investigación titulada “Obtención, caracterización y análisis comparativo de polímeros biodegradables a partir de yuca, papa y maíz”, ejecutada en el Instituto de Investigación Científica de Universidad de Lima; de este estudio se deduce que los biopolímeros obtenidos de la papa, maíz y yuca tienen los mismos grupos funcionales con pequeñas variaciones, aunque se optó por realizar biopolímeros a base de almidón de papa, obteniendo 18 muestras para llevar a cabo el diseño experimental de la investigación, las cuales fueron caracterizadas mediante el nivel de tracción y elongación destacando que en todas las muestras las propiedades mecánicas evaluadas presentaron mejor desempeño mediante un tratamiento térmico en el proceso de secado (70 - 75 °C); la caracterización de absorción atómica mostró que el contenido de plomo, cadmio y arsénico en la película de biopolímero estaba por debajo del estándar nacional de calidad ambiental y era inofensivo para el medio ambiente; el análisis del ciclo de vida de los biopolímeros, confirmando que la producción de bolsas de biopolímeros a partir de fécula de papa es amigable con el medio ambiente, una oportunidad comercial prometedora y, sobre todo, sostenible y ecológica (Arroyo y Alarcón, 2013).

Otra investigación relevante fue la realizada por Álvarez, Rondón, Gutiérrez, Aguilar, Suarez y Hernández (2017), titulada “Obtención de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca dulce”, desarrollada bajo diferentes ensayos donde se extrajeron polímero biodegradable a partir de almidón de yuca dulce, con diferentes cantidades y orden de adición, arrojando un polímero de color amarillo claro con textura suave y plástica, flexible, con poca capacidad de estiramiento, con polímeros termo endurecibles; se obtuvieron muestras de todas las diferentes combinaciones de aditivos utilizados, que siempre dan como resultado polímeros solubles en agua, varias mezclas produjeron películas con pequeños grumos después del secado, esto se debe a las dificultades de dilución del PVA y en otros casos a la gelatinización del almidón, a altas temperaturas se afecta la forma estética de los polímero debido a que son sensibles a la combustión; se logró obtener un polímero con buenas aplicaciones comerciales gracias a su dureza, las pruebas que arrojaron mejores resultados fueron las realizadas con el proceso artesanal tradicional de elaboración de bolsas sin la maquinaria pertinente, aunque se obtuvieron resultados muy positivos en fuerza y

resistencia; la caracterización de las muestras obtenidas es convencional en base a la observación; el biopolímero resultante es un ejemplo de una posible solución a la contaminación del planeta, una idea factible, económica y de fácil implementación que puede animar a la sociedad y a la industria en general a buscar nuevas soluciones a la contaminación por desechos plásticos (Álvarez et al., 2017).

Para promover las investigaciones basadas en biopolímeros a partir de recursos agrícolas renovables, los autores Moreno, Ruiz, Suárez y Nausa (2019), vieron la necesidad de documentar sobre las “Perspectivas del uso y producción de biopolímeros en Colombia”, encontrando que la producción de biopolímeros a nivel mundial presenta una tendencia al alza y se estima que para el año 2023, alcance unas 2616 toneladas, donde Asia lidera el mercado global, con más del 50% de la producción. El interés de investigadores en la obtención y comercialización de biopolímeros se fundamenta en la rapidez de su degradación, que puede variar entre unas cuantas semanas o meses. Además de las similitudes que presentan los biopolímeros en comparación a los polímeros sintéticos, en cuanto a sus propiedades mecánicas, físicas y químicas, lo que permite la sustitución de este en diferentes campos de aplicación (Moreno et al., 2019).

8. METODOLOGÍA

8.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

La línea de investigación a la cual se circunscribe este trabajo de grado es Gestión Ambiental y Desarrollo Humano Sostenible, siendo Mecanismo de Producción Más Limpia, la sublínea que mejor se ajusta a los objetivos y alcances planteados.

8.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN

El desarrollo del presente trabajo de grado se definió bajo una investigación de tipo experimental y exploratoria con un enfoque cuantitativo, puesto que se evaluó de manera controlada el comportamiento de un grupo de variables dependientes con relación a la variación de un grupo de factores que intervinieron, lo que permitió ampliar el conocimiento referente a las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los polímeros biodegradables, de igual manera, deriva interrogantes que sirven de foco para futuras investigaciones.

8.3 POBLACIÓN

La población objeto de estudio son los polímeros biodegradables obtenidos a partir de la mezcla de almidón de yuca, glicerol, aceite de oliva y agua.

8.4 MUESTRA

Se diseñaron nueve (9) diferentes combinaciones o muestras estadísticas de los polímeros a base de almidón de yuca, mediante un medio heurístico de prueba y error las cuales fueron replicadas por triplicado para la evaluación de las propiedades mecánicas, físicas y químicas.

8.5 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Para el desarrollo de este trabajo de grado se utilizó la observación no estructurada como técnica de recolección de información, la cual se ejecutó en función de diversas metodologías que permiten explicar de manera detallada los sucesos originados alrededor de las variables respuestas analizadas. Asimismo, el instrumento que se utilizó para la recolección la información es el diario de campo, el cual concedió llevar registro de las observaciones e interpretaciones de los datos de interés para el desarrollo de la investigación.

8.6 DESARROLLO METODOLÓGICO

8.6.1 Diseño experimental

Para evaluar el comportamiento de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los polímeros elaborados a base de almidón de yuca, se utilizó un diseño bifactorial con tres niveles de estudio para cada factor, como se describe a continuación:

8.6.1.1 Factores de estudio

8.6.1.1.1 Variables independientes

Factor A: masa de almidón de yuca (g).

Factor B: volumen de glicerol (mL).

Al realizar las combinaciones de los factores con los niveles de estudios se obtuvieron nueve combinaciones (unidades experimentales) para la obtención del polímero biodegradable a base de almidón de yuca.

8.6.1.1.2 Variables dependientes

Porcentaje de elongación (%), esfuerzo máximo (MPa), módulo de Young (MPa), tiempo de degradabilidad (día), densidad (g mL^{-1}), contenido de humedad absorbida (%), sellamiento térmico.

Para el análisis de las variables mecánicas como tracción, flexión, dureza e impacto se generaron tres (3) réplicas de trazabilidad por cada combinación, para un total de veintisiete (27) combinaciones, mientras que, para el análisis de las variables químicas como degradación en suelo y agua, densidad, comportamiento frente al agua y sellamiento térmico se utilizó una (1) replica.

8.6.1.2 Niveles de estudio

8.6.1.2.1 Descripción del diseño experimental para el primer ensayo

Se realizó una formulación inicial como base del mecanismo de prueba y error utilizado, en la cual se definió que para el factor A (Almidón de yuca) se trabajaron los siguientes niveles: A1 (20 g), A2 (50 g), A3 (70 g). Para el factor B (Glicerol) se estipularon los siguientes niveles: B1 (1,5 mL), B2 (1,0 mL), B3 (0,5 mL). El agua suministrada fue 100 mL (tabla 2).

Tabla 2. Primera formulación de los biopolímeros.

Muestra	Combinación	Descripción			
		Almidón de yuca (g)	Glicerol (mL)	Agua (mL)	Aceite de oliva (mL)
BP1	A1B1	20	1,5	100	3
BP2	A1B2	20	1	100	3
BP3	A1B3	20	0,5	100	3
BP4	A2B1	50	1,5	100	3
BP5	A2B2	50	1	100	3
BP6	A2B3	50	0,5	100	3
BP7	A3B1	70	1,5	100	3
BP8	A3B2	70	1	100	3
BP9	A3B3	70	0,5	100	3

Fuente: Autores, 2023.

8.6.1.2.2 Descripción del diseño experimental para el segundo ensayo

En función de los resultados negativos obtenidos con la primera formulación, fue necesario plantear una segunda formulación, siguiendo el método de prueba y error, donde, para el factor A (Almidón de yuca) se estipularon los siguientes niveles: A1 (20 g), A2 (30 g), A3 (40 g). Para el factor B (Glicerol) se establecieron los siguientes niveles: B1 (5 mL), B2 (3 mL), B3 (1 mL). El agua suministrada fue de 300 mL (ver tabla 3).

Tabla 3. Segunda formulación de los biopolímeros.

Muestra	Combinación	Descripción			
		Almidón de yuca (g)	Glicerol (mL)	Agua (mL)	Aceite de oliva (mL)
BP1	A1B1	20	5	300	3
BP2	A1B2	20	3	300	3
BP3	A1B3	20	1	300	3
BP4	A2B1	30	5	300	3
BP5	A2B2	30	3	300	3
BP6	A2B3	30	1	300	3
BP7	A3B1	40	5	300	3
BP8	A3B2	40	3	300	3
BP9	A3B3	40	1	300	3

Fuente: Autores, 2023.

8.6.1.2.3 Descripción del diseño experimental para el tercer ensayo

Luego de un segundo intento fallido, se modifica por tercera vez la formulación para la obtención del biopolímero, en la que, para el factor A (Almidón de yuca) se estipularon los siguientes niveles: A1 (20 g), A2 (30 g), A3 (40 g). Para el factor B (Glicerol) se determinaron los siguientes niveles: B1 (5 mL), B2 (3 mL), B3 (1 mL). El agua suministrada fue de 200 mL (ver tabla 4).

Tabla 4. Tercera formulación de los biopolímeros.

Muestra	Combinación	Descripción			
		Almidón de yuca (g)	Glicerol (mL)	Agua (mL)	Aceite de oliva (mL)
BP1	A1B1	20	5	200	3
BP2	A1B2	20	3	200	3
BP3	A1B3	20	1	200	3
BP4	A2B1	30	5	200	3

BP5	A2B2	30	3	200	3
BP6	A2B3	30	1	200	3
BP7	A3B1	40	5	200	3
BP8	A3B2	40	3	200	3
BP9	A3B3	40	1	200	3

Fuente: Autores, 2024.

8.6.1.2.4 Descripción del diseño experimental para el cuarto y quinto ensayo

Siguiendo el método de prueba y error, fue necesario plantear una formulación más, a causa de los resultados fallidos anteriores, para finalmente determinar que, para el factor A (Almidón de yuca) se estipularon los siguientes niveles: A1 (40 g), A2 (50 g), A3 (60 g). Para el factor B (Glicerol) se establecieron los siguientes niveles: B1 (10 mL), B2 (15 mL), B3 (20 mL). El agua suministrada fue de 200 mL (ver tabla 5).

Tabla 5. Cuarta formulación de los biopolímeros.

Muestra	Combinación	Descripción			
		Almidón de yuca (g)	Glicerol (mL)	Agua (mL)	Aceite de oliva (mL)
BP1	A1B1	40	10	200	3
BP2	A1B2	40	15	200	3
BP3	A1B3	40	20	200	3
BP4	A2B1	50	10	200	3
BP5	A2B2	50	15	200	3
BP6	A2B3	50	20	200	3
BP7	A3B1	60	10	200	3
BP8	A3B2	60	15	200	3
BP9	A3B3	60	20	200	3

Fuente: Autores, 2024.

Puntualizando que, con esta cuarta formulación se realizó el ensayo número cuatro y cinco, haciendo énfasis, que el cuarto ensayo se ejecutó con el fin de buscar el procedimiento de deshidratación óptimo y el material adecuado del recipiente a utilizar en el proceso de moldeo, para luego, ejecutar el quinto ensayo donde finalmente se logró obtener el biopolímero con las características físicas deseadas.

8.6.2 Trabajo de campo

En esta etapa del proyecto de investigación se llevaron a cabo dos actividades importantes para el despliegue funcional del desarrollo experimental, dichas actividades fueron: la obtención del almidón y la elaboración de las películas de polímero biodegradable. El almidón de yuca se obtuvo mediante el procedimiento descrito en la figura 9:

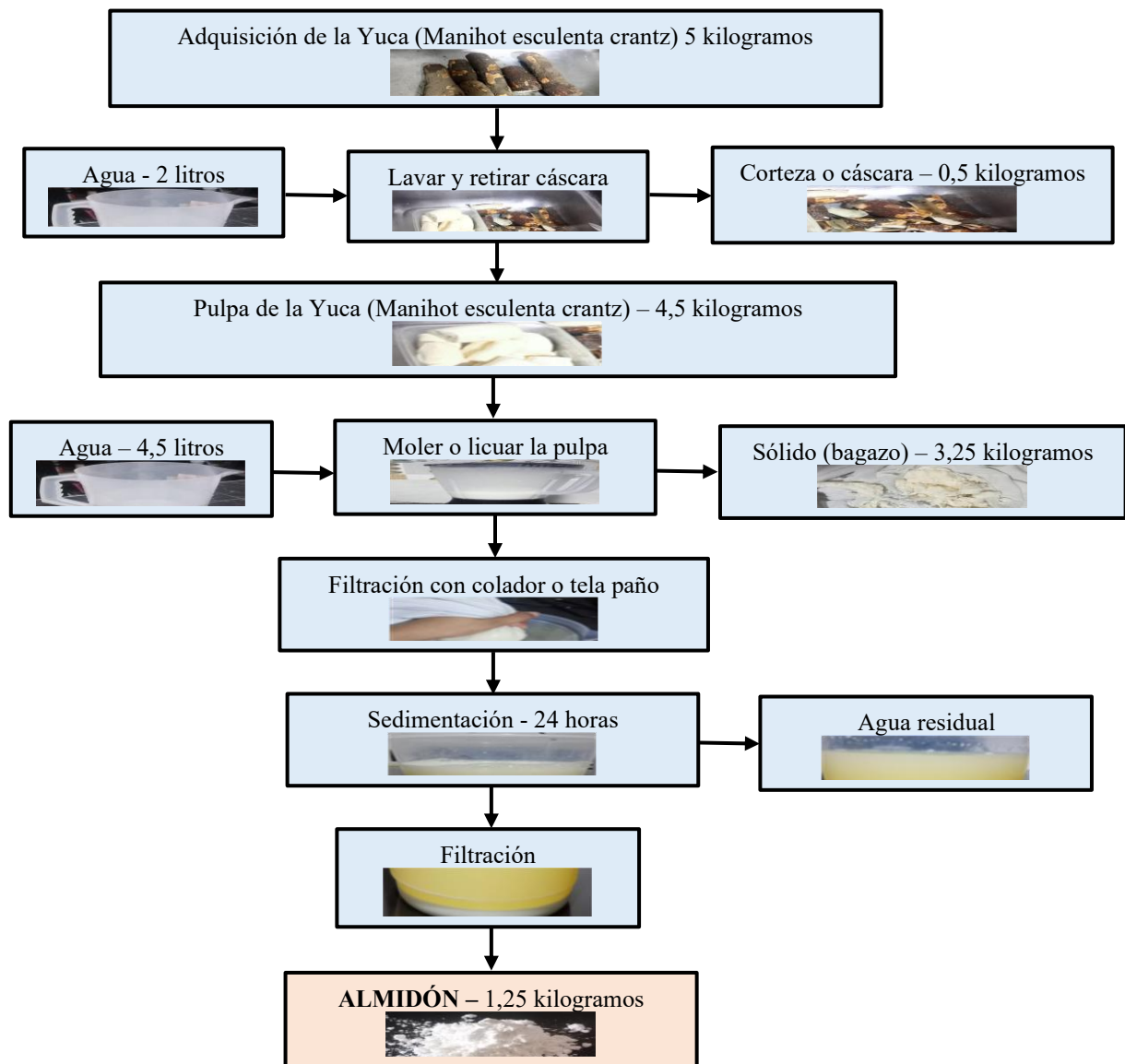


Figura 9. Obtención del almidón de yuca (Maniholt esculenta crantz).

Fuente: Autores, 2024.

Una vez obtenido el almidón, se prosiguió con la elaboración de las películas de polímero biodegradable, con cada una de las combinaciones planteadas en el diseño experimental. Al estar definidas las mezclas, se procedió a la preparación y cocción de las mismas, siguiendo las siguientes etapas:

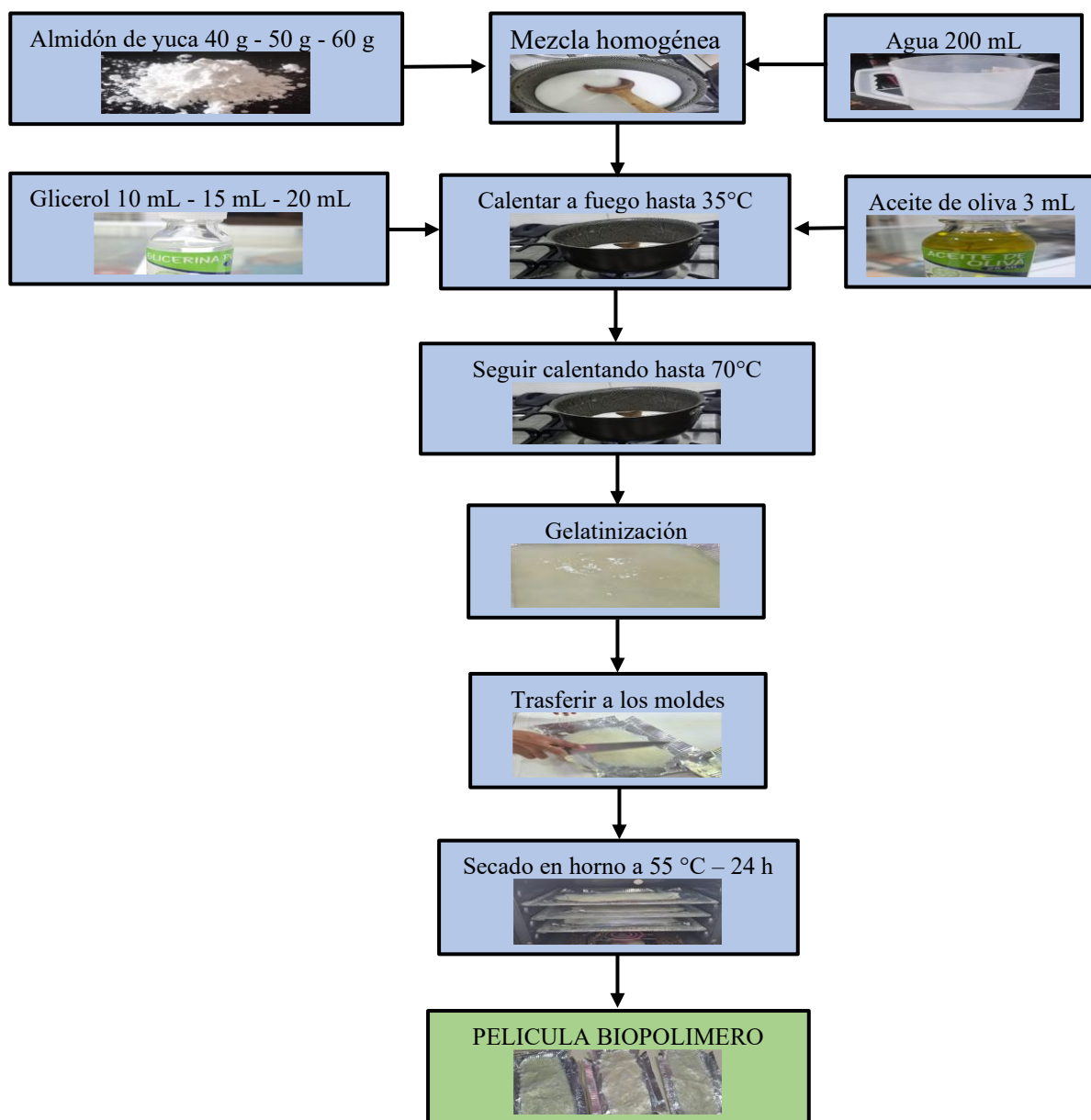


Figura 10. Obtención de la película de biopolímero.
Fuente: Autores, 2024.

8.6.3 Trabajo de laboratorio

8.6.3.1 Caracterización mecánica de los biopolímeros

Esta fase de laboratorio se realizó mediante un equipo de ensayos de materiales universal EEU/20KN, perteneciente al laboratorio de resistencia de materiales, ubicado en las instalaciones de las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS) en la ciudad de Bucaramanga. Para las pruebas mecánicas (tracción, flexión y dureza) se seleccionaron tres (3) probetas por cada combinación y para cada ensayo, con las dimensiones definidas según la norma internacional ASTM-D5947-18 (ver tabla 6). De igual forma, se evaluaron dos (2) réplicas con las mismas dimensiones de polímero sintético (Tereftalato de polietileno, PET) como muestra de referencia (M.R), seleccionado con base en sus características mecánicas y su funcionalidad industrial, el cual se describe de apariencia transparente y cristalino, alta resistencia mecánica y química, alta flexibilidad y con una densidad bibliográfica de 1,37 mg mL⁻¹ (Calderón, et al, 2023), dicho polímero es bastante utilizado en la actualidad en diferentes industrias, lo que incita a fabricar un polímero biodegradable con características mecánicas y químicas similares, que facilite el reemplazo del PET en el área industrial.

Tabla 6. Dimensiones para pruebas mecánicas de los polímeros.

Prueba	Ancho	Largo	Espesor
	mm	mm	mm
Flexión	30	280	3,2
Tracción	15	100	3,2
Dureza	80	80	10,0
Impacto	10	64	10,0

Fuente: ASTM-D5947-18, 2024.

8.6.3.2 Caracterización química del biopolímero

Para la ejecución de las pruebas químicas (densidad, sellamiento térmico comportamiento frente al agua y biodegradabilidad en suelo y agua.) se emplearon las instalaciones del laboratorio multifuncional de la Universidad Popular del Cesar seccional Aguachica.

Para los ensayos de degradabilidad en agua y suelo, el comportamiento frente al agua, la densidad y el sellamiento térmico se estipulo una (1) probeta por cada biopolímero para cada prueba realizada, así mismo, para muestra de referencia (Tereftalato de polietileno - PET) bajo las medidas definidas como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Dimensiones para pruebas químicas de los polímeros.

Prueba	Ancho	Largo
	mm	mm
Degradabilidad	50	50
Contenido de humedad absorbida	50	50
Densidad	30	50
Sellamiento térmico	30	140

Fuente: Autores, 2024.

8.6.4 Tratamiento de datos

Una vez culminada la etapa de trabajo de campo y laboratorio, se hace necesario realizar un tratamiento matemático, estadístico y de análisis a los datos obtenidos, que permita organizar mejor la información recolectada y realizar un análisis más adecuado. Para ello, se tabularon dichos datos en la herramienta Excel, lo que facilito la organización de los resultados, luego, los valores obtenidos de las pruebas mecánicas (pruebas de tracción, flexión y dureza) se analizaron con el software IBM SPSS Statistics 25.0, donde se utilizó ANOVA con un test de HDS Tukey, logrando realizar múltiples comparaciones de los biopolímeros para determinar si se presentan diferencias significativas entre los datos analizados.

8.7 HIPOTESIS

La limitada utilidad de los polímeros biodegradables en la fabricación de empaques para productos a nivel industrial, se debe a la baja permeabilidad y a la baja resistencia mecánica que estos presentan. Por tanto, es pertinente plantear las siguientes hipótesis:

8.7.1 Hipótesis positiva

Las propiedades físicas, químicas y mecánicas demostraron que un polímero a base de almidón de yuca, puede utilizarse como materia prima para fabricar empaques biodegradables a nivel industrial.

8.7.2 Hipótesis negativa

Las propiedades físicas, químicas y mecánicas demostraron que un polímero a base de almidón de yuca, no puede utilizarse como materia prima para fabricar empaques biodegradables a nivel industrial.

9. RESULTADOS Y DISCUSIONES

9.1 OBTENCIÓN DE LOS POLÍMEROS BIODEGRADABLES

Mediante la ejecución del diseño experimental planteado, para el primer, segundo y tercer ensayo (primera, segunda y tercera formulación respectivamente), se obtuvo como resultado unos biopolímeros con características físicas no deseadas: excesiva humedad, alta fragilidad, excesiva viscosidad de la mezcla, color poco transparente, textura grumosa y poca uniformidad en el producto final (ver anexo 1).

En relación, a los resultados obtenidos de los tres ensayos anteriores, fue necesario replantear una cuarta formulación, con la cual, se llevó a cabo los últimos dos ensayos, es decir, el cuarto y quinto ensayo. Para el cuarto ensayo se utilizaron diferentes equipos para el proceso de deshidratación, como estufa a gas y horno convencional, dando como resultado, en la estufa a gas, un proceso de cocción inadecuado, pues la mezcla no alcanzó una gelatinización óptima ni uniforme, lo que facilitó el agrietamiento de las muestras; y en cuanto al horno convencional, se evidenció una mezcla burbujeante y de difícil manipulación, debido al exceso de calor suministrado. Además, también se experimentaron moldes de madera para el proceso de deshidratación con el objetivo de cumplir las medidas requeridas de las probetas, pero se vislumbró que el tiempo de deshidratación aumentó, a un intervalo de ocho días, lo que favoreció la proliferación de microorganismos como hongos y moho, infectando la muestra y dejándola inservible (ver anexo 2).

9.1.1 Biopolímeros obtenidos en el quinto ensayo

Evalutando los resultados anteriores, se logró inferir que el glicerol es el activo clave para la obtención del biopolímero deseado, es por ello que en este quinto ensayo se aumentó el volumen de glicerol, también se aumentó la concentración de almidón, mientras que los demás componentes se mantuvieron iguales (ver figura 10). Otro aspecto a tener en cuenta durante la ejecución de este ensayo fue el recipiente utilizado para el proceso de

deshidratación, pues se logró observar en el cuarto ensayo que el material del recipiente no favoreció los resultados obtenidos, por tal razón, en este ensayo para moldear la muestra se utilizó un recipiente de aluminio (ver figura 11), lo que permitió obtener los biopolímeros deseados en apariencia física, es decir, más transparentes, una textura más uniforme, con mayor flexibilidad, lo cual facilitó el desmolde y una mejor manipulación a la hora de extraer las muestras de las probetas.



Figura 111. Muestras de los biopolímeros obtenidos en el quinto ensayo.

Fuente: Autores, 2024.

En este quinto ensayo, las combinaciones presentaron una textura más maleable que facilitó realizar con mayor precisión el proceso de moldeo, para luego iniciar el proceso de deshidratación, finalizando el proceso de deshidratación se evidencio que el reactivo de aceite de oliva, cumplió satisfactoriamente su objetivo de uso, el cual era hidratar las combinaciones para evitar su adhesión al molde utilizado

9.2 PRUEBAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y MECÁNICAS APLICADAS A LOS BIOPOLÍMEROS A BASE DE ALMIDÓN DE YUCA

9.2.1 Resultados ensayo de tracción

Durante la ejecución de este ensayo se obtuvieron datos del esfuerzo máximo, elongación y módulo de elasticidad de Young (ver figuras 12 a 14), los cuales se tabularon, logrando analizar la deformación y el esfuerzo, en cada réplica de la unidad experimental, se realizó un promedio de las réplicas. Asimismo, se ejecutaron pruebas a dos réplicas de un plástico sintético (Polietileno 1 - PET) como muestra de referencia (M.R). Se tuvo en cuenta la norma internacional AST-D638 (ASTM, 2022), la cual se aplica a muestras de plástico rígido entre 1,00 mm -14,00 mm de espesor, es decir, todas las unidades experimentales a excepción de la BP6, la cual tiene un espesor menor a 1,00 mm se aplica la norma internacional AST-D882 (ASTM, 2024). En el anexo 3 se logran observar los resultados generales de este ensayo.

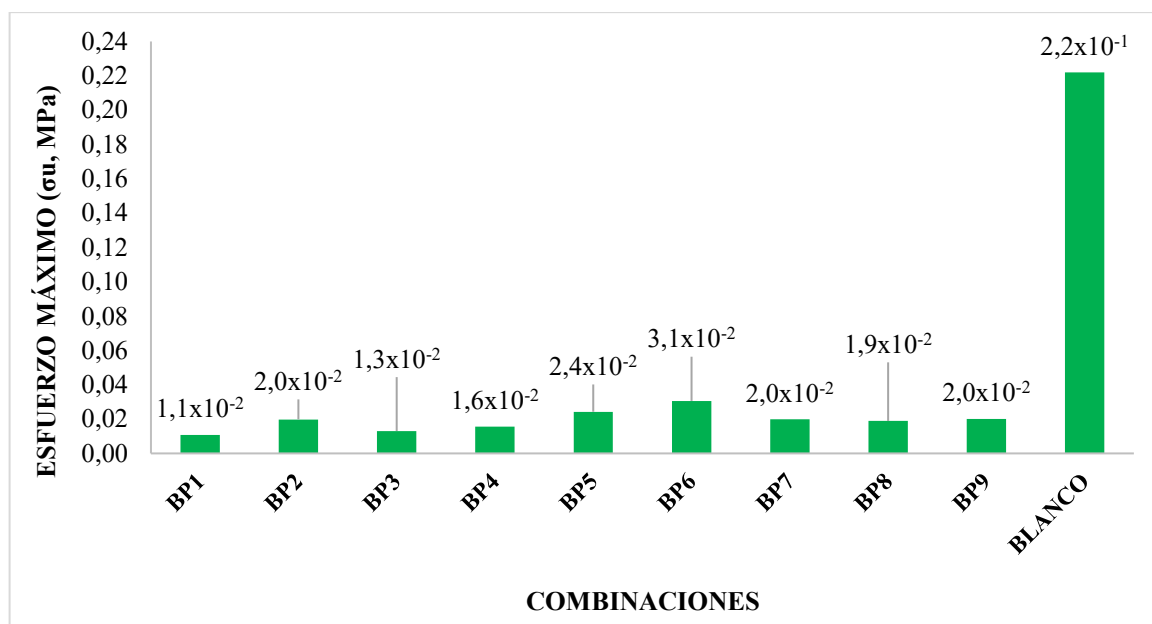


Figura 122. Resultados esfuerzo máximo de la prueba de tracción.

Fuente: Autores, 2024.

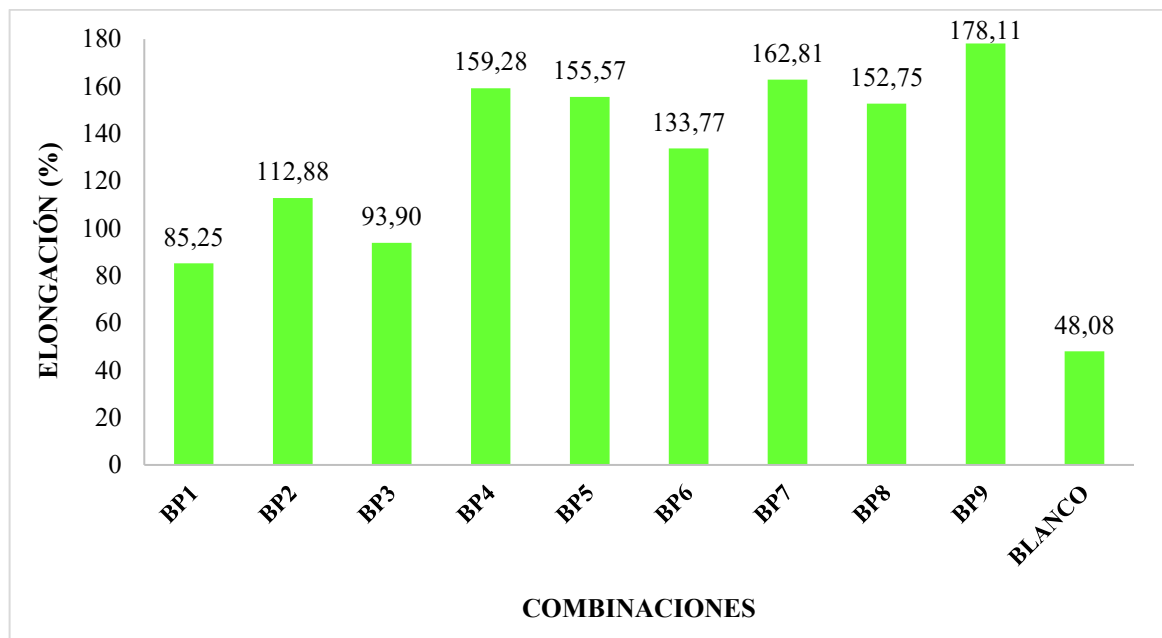


Figura 133. Resultados de elongación de la prueba de tracción.
Fuente: Autores, 2024.

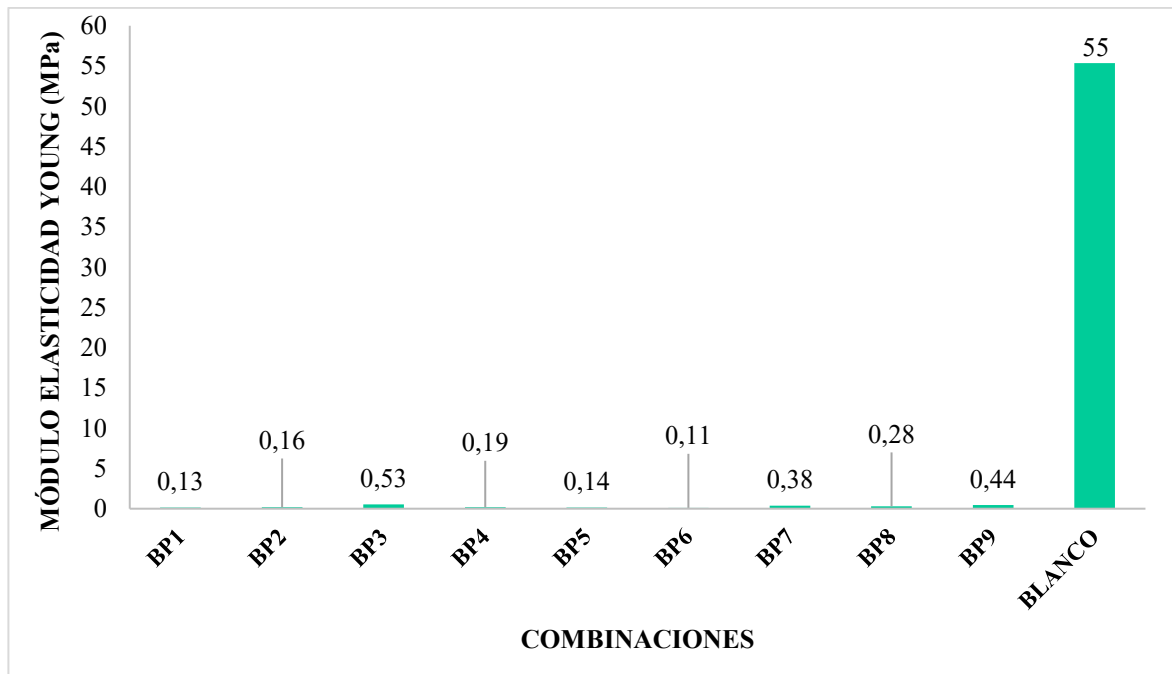


Figura 144. Resultados de módulo de elasticidad de Young de la prueba de tracción.
Fuente: Autores, 2024.

Analizando la información contenida en las figuras 12, 13 y 14; en las cuales se logró visualizar que los valores referentes al ensayo de tracción se ubicaron en los siguientes rangos: Esfuerzo máximo va desde $1,1 \times 10^{-2}$ a $3,1 \times 10^{-2}$ MPa para el biopolímero, mientras que la muestra de referencia presenta un valor significativamente mayor de $2,2 \times 10^{-1}$ MPa, lo que indica, que los biopolímeros son más frágiles a la aplicación del esfuerzo de resistencia a la tracción en comparación a la muestra de referencia, en el caso de la elongación los biopolímeros oscila entre 85,25 y 178,11%, mientras que la muestra de referencia presenta un valor 48,08%, demostrando que los biopolímeros son doblemente elásticos comparados con la muestra de referencia, mientras que para el Módulo de elasticidad de Young los valores de los biopolímeros varían de $1,1 \times 10^{-1}$ a $5,3 \times 10^{-1}$ MPa, mientras que la muestra de referencia obtuvo un valor significativamente más alto $5,5 \times 10^1$ MPa, justificando la rigidez que presentó la muestra de referencia basado en la baja capacidad de estiramiento, demostrando todo lo contrario en los biopolímeros teniendo un alto índice de estiramiento.

En general, haciendo énfasis en que la tracción evalúa la resistencia de los materiales a rasgaduras o agrietamiento frente a una fuerza de estiramiento aplicada, se determinó que los rangos de valores del biopolímero lo caracterizan como un material altamente flexible y menos rígido en comparación al polímero de referencia evaluado, lo que limita su aplicación industrial en la fabricación de botellas y envases diseñadas para soportar impacto causados por caídas o por apilamiento como por ejemplo botellas para bebidas, fabricación de utensilios de cocina, envases para embalaje de postres, entre otros.

9.2.2 Resultados ensayo de flexión

En cada muestra se ejecutaron pruebas a tres (3) replicas. Se tuvo en cuenta la norma internacional ASTM-D790 (ASTM, 2024), aplicando un sistema de carga de tres puntos a una muestra de biopolímero simplemente apoyada en sus extremos. En las figuras 15, 16 y 17 pueden observarse los resultados del esfuerzo máximo, elongación y módulo de elasticidad de Young, respectivamente y en el anexo 4 se presentan los resultados generales del ensayo.

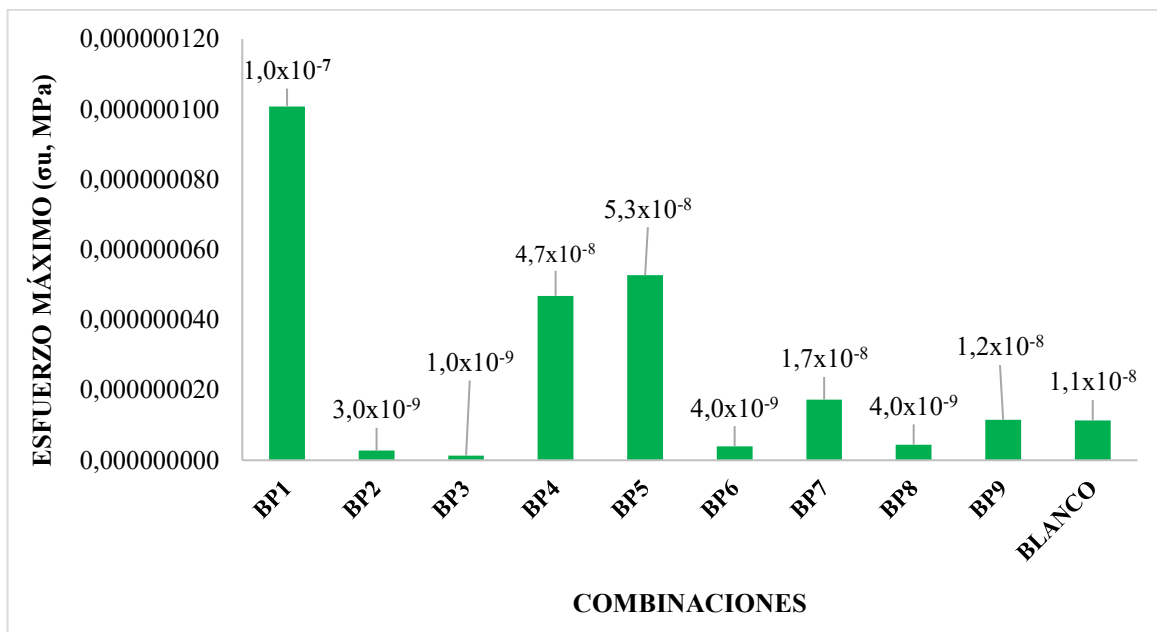


Figura 155. Resultados esfuerzo máximo de la prueba de flexión.
Fuente: Autores, 2024.

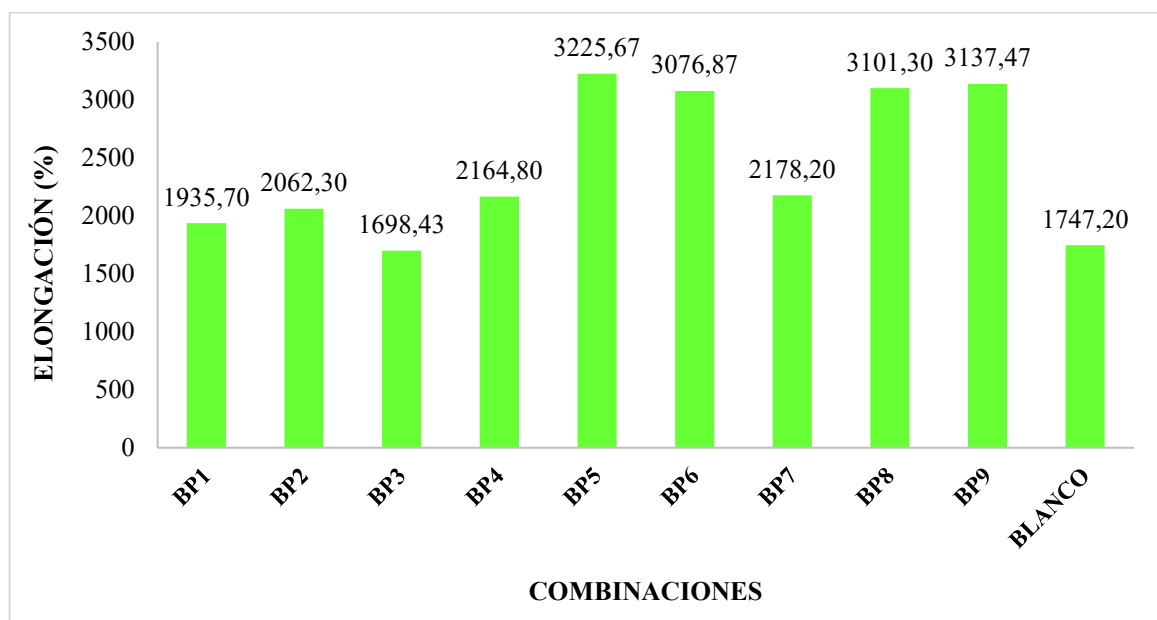


Figura 16. Resultados de elongación de la prueba de flexión.
Fuente: Autores, 2024.

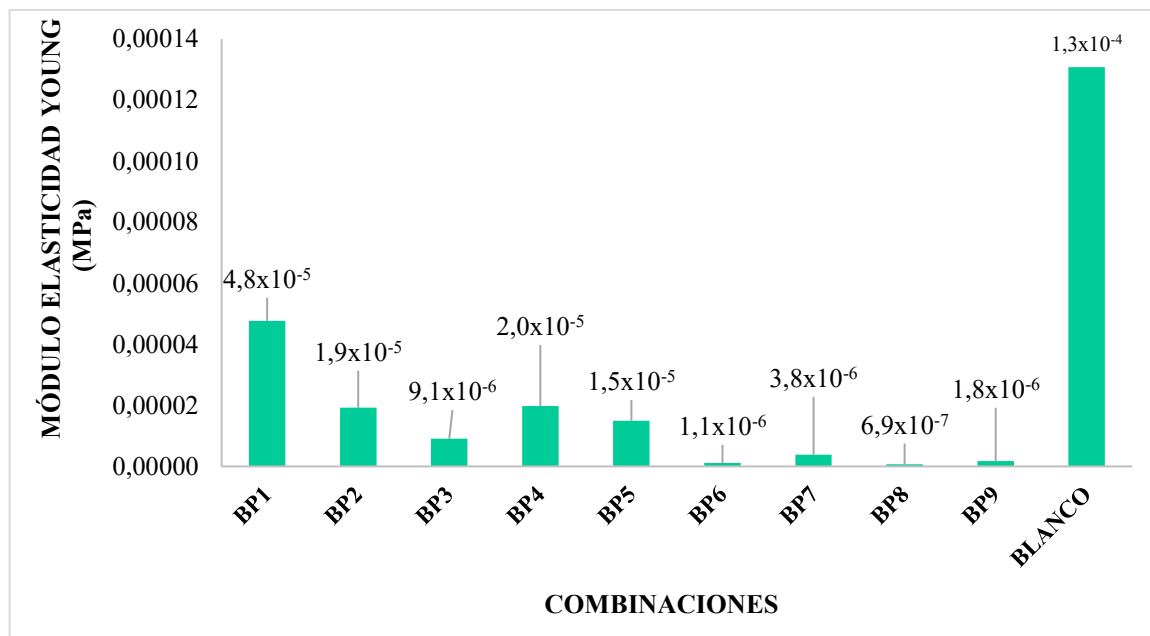


Figura 167. Resultados de módulo de elasticidad young de la prueba de flexión.
Fuente: Autores, 2024.

En cuanto a los resultados obtenidos en el ensayo de flexión, se presentaron los siguientes datos: para el esfuerzo máximo, los biopolímeros con valores más altos fueron las combinaciones BP1; BP4 y BP5 con resultados $1,0 \times 10^{-7}$ MPa, $4,7 \times 10^{-8}$ MPa y $5,3 \times 10^{-8}$ MPa, respectivamente. En relación a la muestra de referencia que solo alcanza $1,1 \times 10^{-8}$ MPa, lo que, permite deducir que el glicerol influye en el comportamiento frente a la carga de flexión aplicada, pues las combinaciones con menos cantidad de glicerol como la BP1; BP4 y BP5 cuyo contenido de glicerol es de 10 mL, 10 mL y 15 mL respectivamente, fueron las que presentaron mayor ductilidad, aumentando la capacidad a la deformación, es decir, a menor volumen de plastificante (glicerol) mayor resistencia a la carga de flexión. Por otra parte, también se visualiza que la combinación BP9, una de las combinaciones con mayor contenido de glicerol y mayor contenido de almidón, fue la que obtuvo el valor más cercano a la muestra de referencia con $1,2 \times 10^{-8}$ MPa, lo que corrobora la incidencia del glicerol como un aditivo importante en el rendimiento mecánico de los biopolímeros.

En cuanto a la variable de elongación, el biopolímero presenta valores muy variados que van desde 1698,43% a 3225,67% en comparación a la muestra de referencia que obtuvo un valor

de 1747,20%. Observando los resultados se destaca la gran elasticidad que presentan los biopolímeros a la carga de deformación, se continua destacando que los biopolímeros son altamente flexibles, y para el Módulo de Young el biopolímero obtuvo valores muy bajos que se sitúan entre $6,9 \times 10^{-7}$ a $4,8 \times 10^{-5}$ MPa, mientras que la muestra de referencia obtuvo $1,3 \times 10^{-4}$ MPa, aunque en general los valores son bajos, tanto para los biopolímeros como para la muestra de referencia, sin embargo, el biopolímero muestra una variabilidad significativa, lo que indica una inconsistencia en la capacidad de soportar cargas de flexión, es decir, el biopolímero necesita una fuerza a la ruptura mucho menor a la muestra de referencia, lo que ratifica que los biopolímeros son un material flexible y poco dúctil, característica que impide su uso en la fabricación de productos que sean utilizados para cargar o almacenar grandes cantidades de masa o volúmenes, como por ejemplo empaques tipo bultos, tulas, fibra textil para fabricación de lonas, entre otros.

9.2.3 Resultados ensayo de dureza

El ensayo de dureza se realizó direccionado por la norma internacional AST-D695 (ASTM, 2024), permitiendo definir la resistencia a la compresión, punto de deformación por compresión y módulo de elasticidad de un material, este se determina, mediante la resistencia opONENTE del material analizado para este caso los biopolímeros, a la indentación por parte de un cuerpo más duro, por medio de la aplicación de fuerza estática (ver figuras 18 a 20). En el anexo 5 se presentan los resultados generales del ensayo.

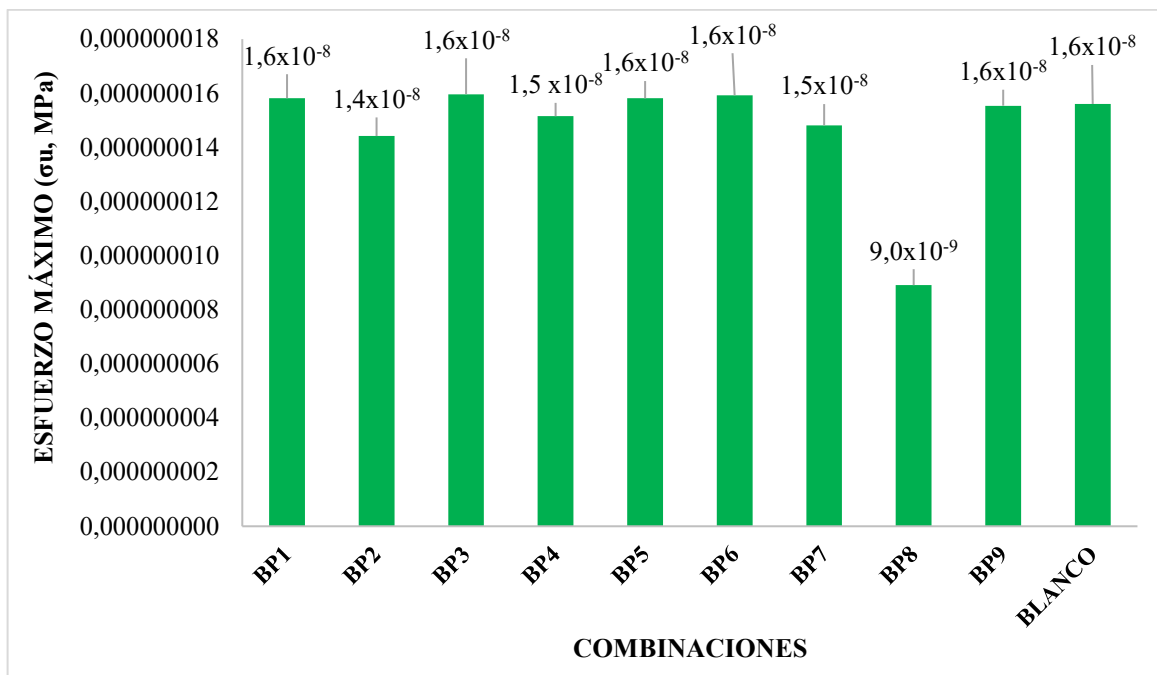


Figura 18. Resultados esfuerzo máximo de la prueba de dureza.

Fuente: Autores, 2024.

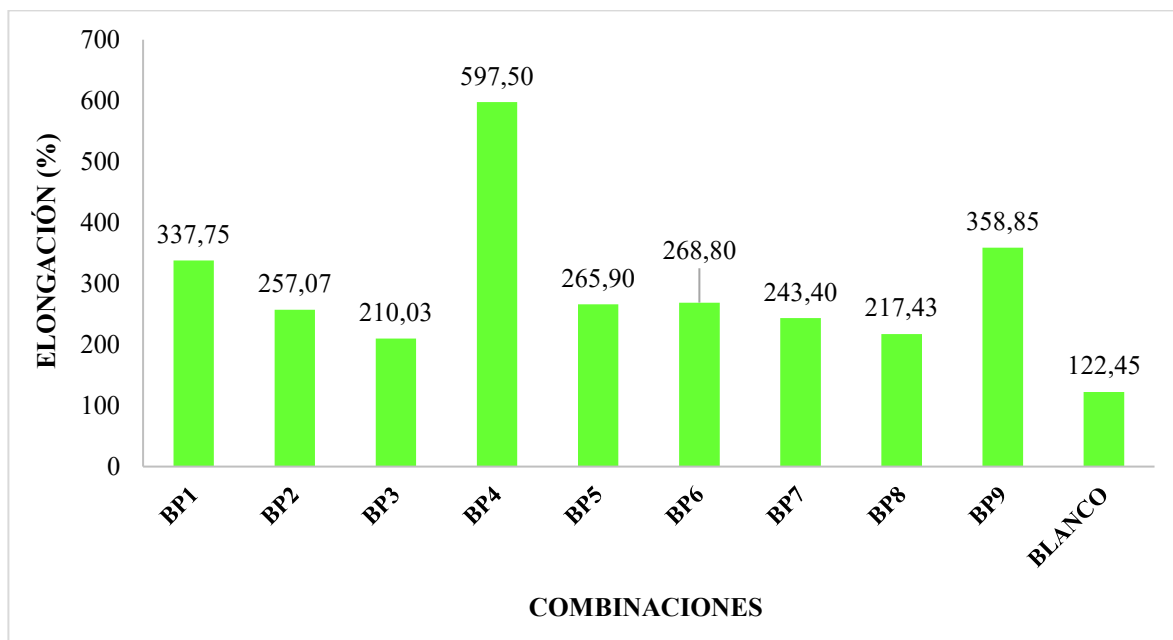


Figura 19. Resultados de elongación de la prueba de dureza.

Fuente: Autores, 2024.

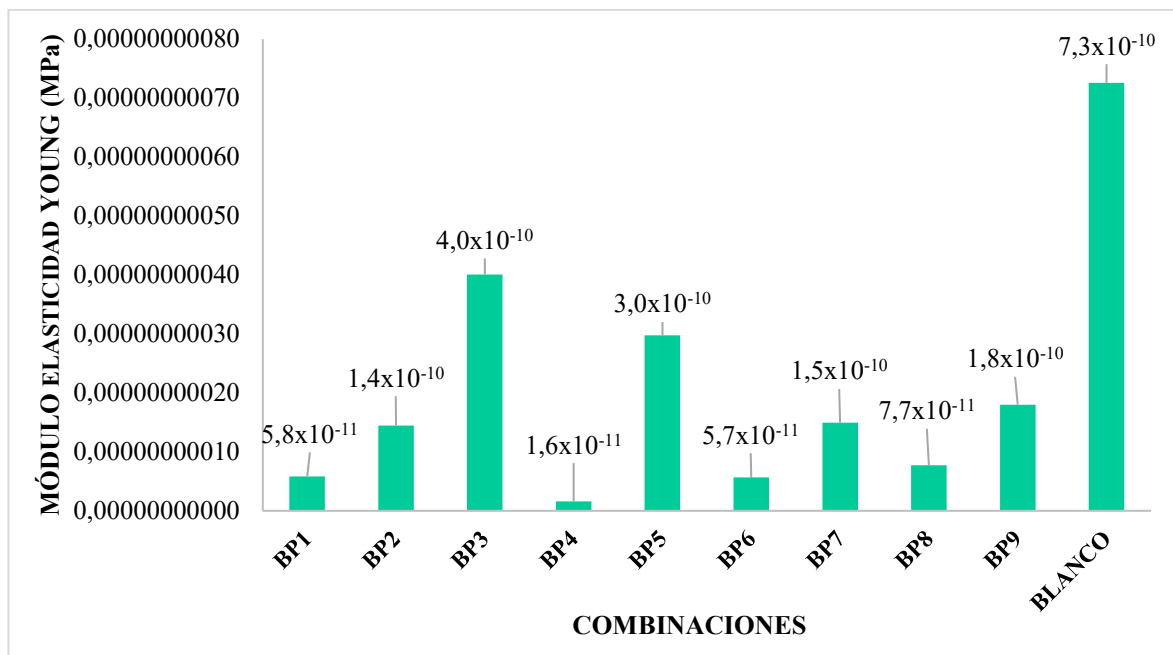


Figura 20. Resultados de módulo de elasticidad young de la prueba de dureza.
Fuente: Autores, 2024.

Para el Esfuerzo máximo los valores oscilan entre $9,0 \times 10^{-9}$ MPa hasta $1,5 \times 10^{-8}$ MPa mientras que la muestra de referencia presenta un valor de $1,6 \times 10^{-8}$ MPa. Cabe aclarar que, aunque los valores están muy parecidos al valor del polímero de referencia, para el caso del biopolímero la fuerza estática aplicada logro perforara el material, mientras que el polímero de referencia solo sufrió deformación más no ruptura de penetración, lo que sigue justificando que la muestra de referencia es considerablemente más duro que el biopolímero, característica que como se mencionó anteriormente, limita el uso industrial del biopolímero en envases y empaques cuya rigidez juega un papel importante, sin embargo el biopolímero técnicamente flexible y frágil, puede ser potencialmente utilizado en empaques cuya rigidez y dureza no son tan primordial, como por ejemplo, fabricación de bolsas para empaque cubiertos, bolsas tipo vinipel utilizada para embalaje de frutas, verduras y demás productos, bolsas de lavandería, y demás empaques utilizados para embalaje de productos livianos de cosmética, higiene personal, aseo del hogar, entre otros.

9.2.4 Ensayo de contenido de humedad absorbida

La prueba se realizó de acuerdo al principio de Arquímedes, con un intervalo de quince (15) minutos, destacando que los biopolímeros obtenidos son más densos que el agua ya que todos se hundieron y llegaron al fondo del recipiente (ver figura 21). En el anexo 6 se presentan los resultados generales del ensayo.

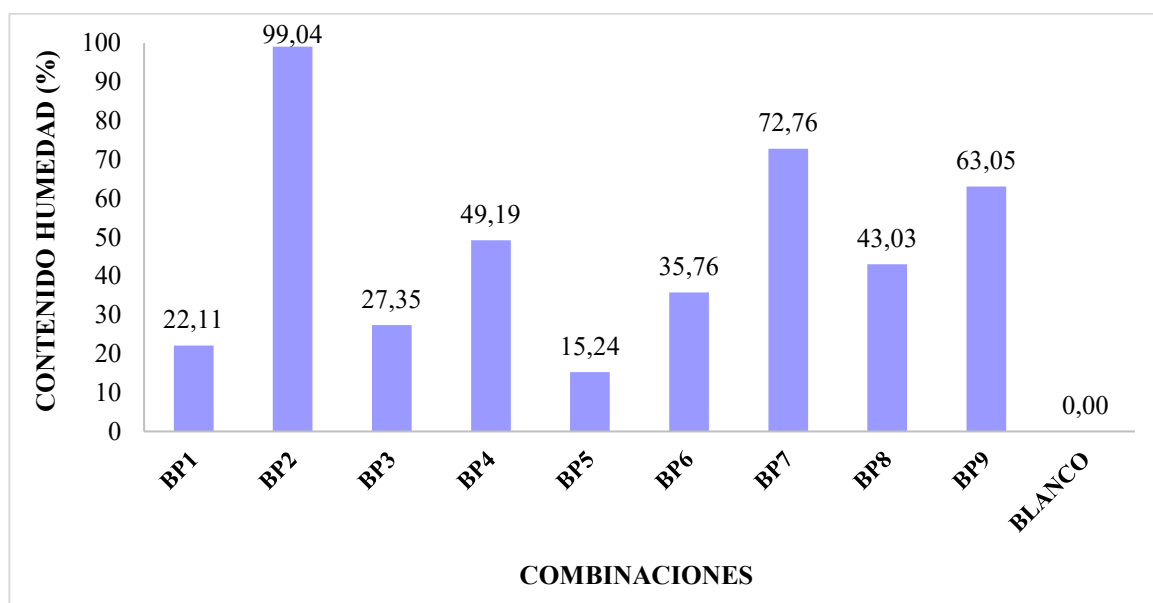


Figura 21. Porcentaje de contenido de humedad absorbida.

Fuente: Autores, 2024.

Con base en los resultados obtenidos, se determinó que los biopolímeros evaluados alcanzaron valores de humedad absorbida bastante altos frente al polímero de referencia, arrojando valores para el biopolímero que van desde los 15,24% hasta el 99,04%, mientras que la muestra de referencia tuvo un valor de 0,0%, este proceso se justifica en el aditivo glicerol, el cual actúa en la mezcla como un agente plastificante en conjunto con el agua, siendo este un factor fundamental en la capacidad de absorción de agua de los biopolímeros, ya que el glicerol actúa frente al almidón de yuca como modificador de la estructura molecular, creando una red de enlaces de hidrógenos que facilitan el espaciamento en la estructura del biopolímero favoreciendo la higroscopicidad del material (Arrieta, et al, 2018), en base a lo anterior, se logra evidenciar todo lo contrario en los resultados obtenidos en esta investigación, pues se, determina que las combinaciones BP2; BP4 y BP5 cuya cantidad de glicerol son menores (15 ml; 10 ml y 10 ml, respectivamente), fueron las que presentaron

mayor contenido de humedad, este fenómeno se puede atribuir al proceso de fabricación de los films, pues este proceso no fue sometido a una extrusora de polímero, herramienta que suministra temperatura y presión en el proceso de cocción y fundición, siendo la presión una magnitud física importante en la compresión de los gases producidos por el aumento de la temperatura durante el proceso de gelatinización de las combinaciones, lo que inhibe la formación de burbujas de aire y por ende disminuye la porosidad del biopolímero, lo que favorecer directamente las propiedades mecánicas y químicas de los films, otro aspecto a tener en cuenta, es el aditivo adicional (aceite de oliva) que se utilizó en las combinaciones, en este caso se incorporó como lubricante para disminuir el efecto de fricción de las combinaciones en el proceso de deshidratación.

En función, del alto porcentaje del contenido de humedad observado en los biopolímeros en comparación con la muestra de referencia, se determina que esta características afecta la funcionalidad del biopolímero en la industria alimentaria y en la industria de la salud, pues estas dos industrias manejan estándares de calidad e higiene muy altos, que garanticen la asepsia de los productos fabricados y comercializados, y para ello es importante que el embalaje cumpla con el objetivo de proteger los productos de la contaminación de microorganismos, lo que hace necesario que el empaque tenga una porosidad de nivel baja a nula, para que el comportamiento frente al agua o cualquier otro fluido sea favorable.

9.2.5 Ensayo de densidad

La prueba se realizó pesando cada una de las réplicas, las cuales se sumergieron en una probeta con un volumen inicial de 140 ml, posteriormente se midió el volumen final (ver figura 22). Los resultados generales del ensayo fueron presentados en el anexo 7.

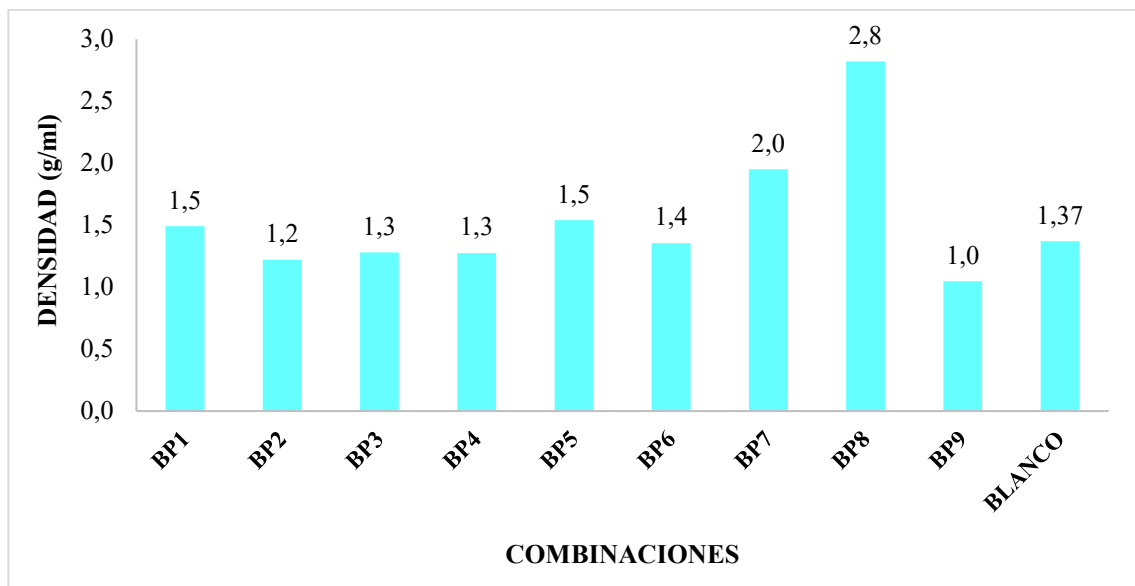


Figura 2217. Resultado de la prueba de densidad.

Fuente: Autores, 2024.

Es pertinente informar que, en el desarrollo del ensayo de densidad, la muestra de referencia no presento aumento en el volumen final, lo que represento una diferencia de cero en el volumen, y matemáticamente la densidad de la muestra de referencia también daba cero, por esta razón, decidimos trabajar con una densidad bibliográfica de 1,37 mg L-1 para la muestra de referencia que pertenece al polímero sintético tereftalato de polietileno (PET).

9.2.6 Ensayos de degradabilidad

Los ensayos de degradabilidad se realizaron en suelo y agua (ver figura 23). Para la prueba en suelo, se construyeron diez (10) cubículos con una de sus paredes en vidrio para facilitar el monitoreo del ensayo, el tamaño de los cubículos fue de 10 cm x 10 cm x 20 cm, aproximadamente; dichos cubículos se llenaron de un suelo tipo abono el cual presentaba bastante contenido de materia orgánica y una textura esponjosa, luego se procedió a enterrar las muestras; para este ensayo se monitoreo y evidenció en registro fotográfico cada 24 horas por el periodo señalado hasta observar la degradación total de las muestras.

Para la prueba en agua, se seleccionaron diez (10) frascos de vidrios con capacidad de 300 mL, a los cuales se les suministro 200 mL de agua para luego introducir las muestras de un tamaño 5 cm x 5 cm; se realizó seguimiento cada 24 horas.

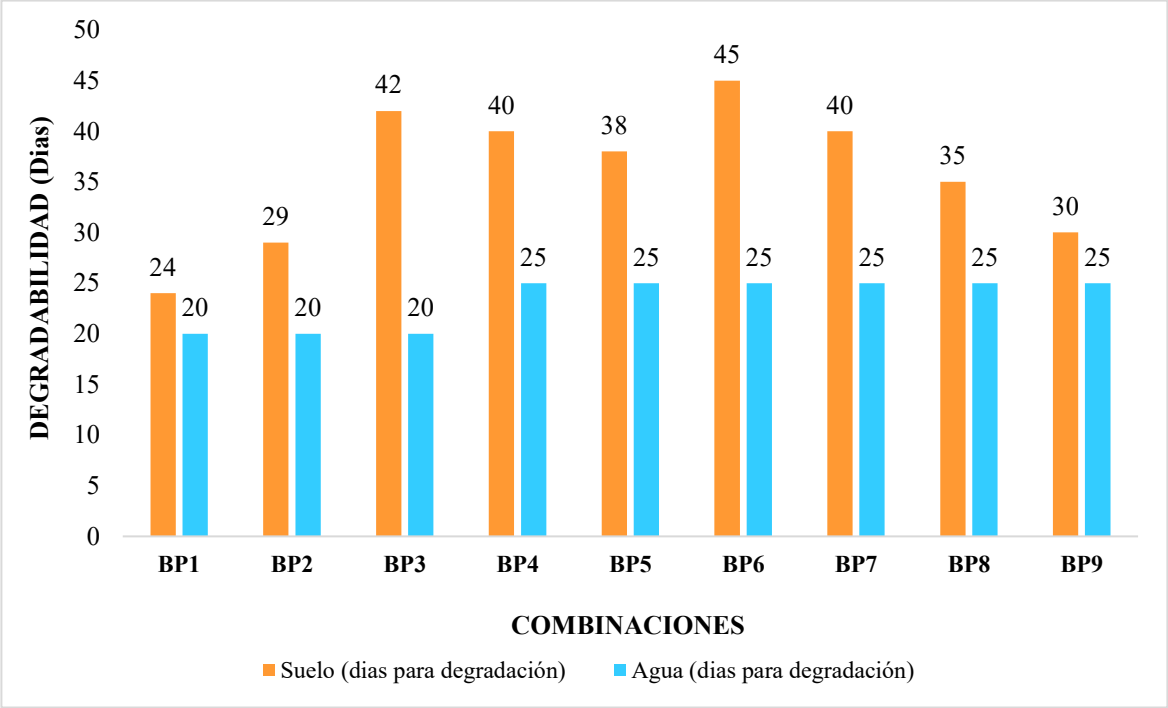


Figura 2318. Resultados de la degradabilidad.
Fuente: Autores, 2024.

Durante el monitoreo del ensayo de degradabilidad en suelo se logró observar; que pasado cuatro (4) días los biopolímeros comenzaron a cambiar de color, pasando de un tono transparente aun blanco leche, cambio que se atribuye a la humedad del suelo y a la capacidad de los biopolímeros de absorber dicha humedad, mientras que, la muestra de referencia permanecía sin ningún cambio.

Al alcanzar el día doce (12) del ensayo, las combinaciones BP5 y BP6, empezaron a segregar un líquido rojizo, en el cual se lograba observar pequeños gusanos delgados, cortos y blancos; otras de las combinaciones que presentaron actividad microbiana visualizada en los cambios físicos, fueron las combinaciones BP3 y BP4, las cuales presentaron un hongo tipo lama, con una estructura similar a la tela de araña, de color blanco, el resto de las combinaciones solo

presentaban humedad excesiva sin presencia visual de organismos, mientras que la muestra de referencia seguía intacta.

Al día veinticuatro (24) la combinación BP1 ya se habían degradado por completo, compenetrándose totalmente con el suelo, y pasado seis (6) días, es decir al día treinta (30) las combinaciones BP2 y BP9 también habían alcanzado su total degradación, para las combinaciones restantes alcanzaron su degradación entre los treinta y cinco (35) y cuarenta y cinco (45) días, siendo la combinación BP6 la que ocupó el tiempo máximo del ensayo para degradarse, en cuanto a la muestra de referencia, pasado la totalidad del tiempo del ensayo no presentó ningún cambio físico o químico y justificado mediante bibliografía referente al tema, se determinó un tiempo de degradación de 365000 días, lo que equivale a 1000 años (Palma y Tenesaca, 2020).

Durante el ensayo de degradabilidad en agua se logró visualizar la ocurrencia de cambios físicos en el color de las combinaciones a partir del día cuatro (4), todos los biopolímeros se tornaron de un color blanco leche; al día diez se empezó a formar una textura tipo nata sobre la lámina de agua, en todas las combinaciones, que según lo observado se atribuye al aditivo lípido (aceite de oliva) que forma parte de las mezclas de los biopolímeros, pues se lograban observar tonos tornasolados, efecto proveniente de las grasas al entrar en contacto con el agua.

Las combinaciones BP1; BP2 y BP3 se degradaron totalmente a los veinte (20) días de iniciado el ensayo, mientras que, las combinaciones restantes alcanzaron su degradación total a los veinticinco (25) días. Para el caso de la muestra de referencia se determinó un tiempo de degradación bibliográfico de 182500 días, lo que equivale a 500 años (Simón, 2021).

9.2.7 Ensayo de sellamiento térmico

Para esta prueba se ocupó una muestra con tamaño de 14 cm x 3 cm, para cada unidad experimental. Las muestras se sometieron a un tratamiento térmico con la selladora térmica

Vacuum Sealer, obteniendo como resultado si el film de biopolímero sellaba o no cuando era sometido al calor (ver figura 24).

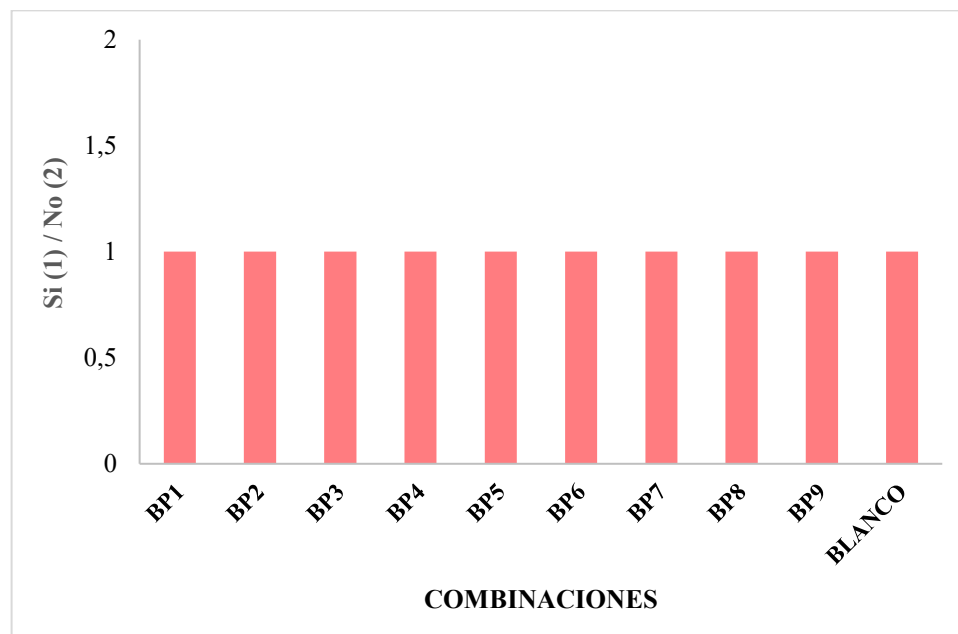


Figura 194. Resultado del sellamiento térmico.
Fuente: Autores, 2024.

En relación, a las propiedades químicas como la degradabilidad, densidad y sellamiento térmico, se obtuvieron resultados muy favorable en comparación con la muestra de referencia, pues los biopolímeros en cuanto a degradabilidad, alcanzaron la degradación total en un intervalo de 24 a 45 días en condiciones ambientales, entre tanto la muestra de referencia pasado los 45 días del ensayo no presento ningún cambio físico o químico, y de acuerdo a lo expresado por la Ambientóloga; Roperó Sandra en el blog ecología verde, un polímero sintético como el tereftalato de polietileno (PET) necesita aproximadamente mil (1000) años para degradarse parcialmente, lo que equivale a 365000 días, también cabe resaltar que la densidad de los biopolímeros se sitúa entre 1,0 a 2,8 g ml⁻¹, mientras que el PET presenta una densidad de 1,37 g ml⁻¹, otro factor positivo del biopolímero es el sellamiento térmico, pues todas las mezclas evaluadas sellaron positivamente frente al sometimiento térmico, favoreciendo así las características químicas de los biopolímeros evaluados, lo que alude al biopolímero a base de almidón de yuca como una estrategia

positiva para reducir los problemas ambientales provocados actualmente por los polímeros sintéticos.

9.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos obtenidos en la ejecución de los diferentes ensayos mecánicos, donde se evaluaron las variables dependientes, fueron analizados con el software IBM SPSS Statistics, donde se utilizó el análisis de varianzas Anova, para determinar la distribución de las muestras analizadas (ver tabla 8), con el HDS Tukey se lograron hacer comparaciones múltiples de las muestras evaluadas bajo las pruebas de tracción, flexión y dureza.

Tabla 8.Análisis de varianza Anova.

ESTADISTICAS DE ANOVA			Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Signif.
PRUEBA DE TRACCIÓN	Esfuerzo máximo (ET)	E. G.	90314,320	9	10034,924	79,483	<0,001
		D. G.	1262,526	10	126,253		
		Total	91576,846	19			
	Elongación (ELT)	E. G.	43082,555	9	4786,951	2,500	0,085
		D. G.	19145,898	10	1914,590		
		Total	62228,453	19			
	Módulo de young (MYT)	E. G.	10,478	9	1,164	2,468	0,088
		D. G.	4,718	10	0,472		
		Total	15,195	19			
PRUEBA DE FLEXIÓN	Esfuerzo máximo (EF)	E. G.	0,000	9	0,000	15,534	<0,001
		D. G.	0,000	10	0,000		
		Total	0,000	19			
	Elongación (ELF)	E. G.	12165239,47	9	1351693,275	0,773	0,645
		D. G.	17476933,07	10	1747693,307		
		Total	29642172,55	19			
	Módulo de young (MYF)	E. G.	0,000	9	0,000	6,675	0,003
		D. G.	0,000	10	0,000		
		Total	0,000	19			
PRUEBA DE DUREZA	Dureza Brinell (DU)	E. G.	4189,312	9	465,479	4,739	0,012
		D. G.	982,266	10	98,227		
		Total	5171,578	19			

E. G: Entre Grupos; D. G: Dentro de Grupos.

Fuente: Autores, 2024.

Por medio del método de estadística análisis de varianzas (ANOVA), se evaluaron las significancias de los biopolímeros en comparación a la muestra de referencia (M.R). Para el desarrollo del análisis estadístico en mención, se estableció un nivel máximo de significancia de $p \leq 0,05$. Soportado en lo anterior, se logra establecer que, para los resultados del ensayo de tracción, la variable del esfuerzo máximo presento diferencias significativas entre grupos, pues el valor de significancia alcanzo un nivel de $p < 0,001$, siendo este resultado menor al nivel de significancia establecido, mientras que la significancia de las variables de elongación ($p = 0,085$) y módulo de Young ($p = 0,088$), determinan que no presentaron diferencias significativas.

Para el ensayo de flexión, las variables de esfuerzo máximo y módulo de Young presentaron diferencias significancias entre grupos con un valor de $p < 0,001$ y $p = 0,003$ respectivamente, dichos valores de significancia no superan el nivel de p establecido, lo que fundamenta una diferencia estadística significativa, por otra parte, la variable de elongación no presento diferencias significativas, pues su nivel de significancia fue de $p = 0,65$ muy por encima del nivel de significancia determinado.

Finalmente, para el ensayo de dureza se obtuvo un $p = 0,012$ lo que determina que, si revelo una diferencia significativa entre grupo, por obtener un valor de significancia menor al límite establecido.

Para determinar con mayor precisión cuales muestras presentan diferencias estadísticas significativas, se sometieron a una prueba de HSD Tukey bajo un intervalo de confianza de 95% y un nivel de significancia $p \leq 0,05$, así se realizaron comparaciones múltiples entre los biopolímeros y la muestra de referencia, por cada uno de los ensayos mecánicos ejecutados.

En la tabla 9, se logra contemplar que todas las combinaciones de biopolímeros presentaron diferencias estadísticas significativas frente a la muestra de referencia (M.R), específicamente en la variable del esfuerzo máximo a la tracción, pues se visualiza un $p < 0,001$, ratificando los valores presentados en la tabla 7, donde se evidenció un valor mucho

más alto para la muestra de referencia (0,222 MPa) en relación a los biopolímeros que presentaron valores bajos y muy semejantes entre ellos. Para las variables de elongación y módulo de Young no se evidenciaron diferencias significativas.

Tabla 9. Comparaciones múltiples (HDS Tukey) ensayo de tracción.

Variable dependiente	(I) M	(J) M	Diferencia de medias 0,005 (I-J)	Error estándar	Signif.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
Esfuerzo máximo	M.R blanco	BP1	230,050	11,2362189	<0,001	185,569663	274,530337
		BP2	222,270	11,2362189	<0,001	177,789663	266,750337
		BP3	230,045	11,2362189	<0,001	185,564663	274,525337
		BP4	224,745	11,2362189	<0,001	180,264663	269,225337
		BP5	222,910	11,2362189	<0,001	178,429663	267,390337
		BP6	217,475	11,2362189	<0,001	172,994663	261,955337
		BP7	220,690	11,2362189	<0,001	176,209663	265,170337
		BP8	220,820	11,2362189	<0,001	176,339663	265,300337
		BP9	223,830	11,2362189	<0,001	179,349663	268,310337

Fuente: Autores, 2024.

En referencia al ensayo de flexión, se presentaron diferencias significativas establecidas en $p \leq 0,05$, únicamente, en las variables de esfuerzo máximo y módulo de Young, determinando que las combinaciones BP4 y BP5 fueron las que más significancias presentaron frente a las combinaciones BP2, BP3, BP6, BP8, BP9 y la muestra de referencia (M.R), resaltando que la combinación BP5 fue la única que presentó diferencias significativa para la variable módulo de Young en relación al resto de combinaciones, lo que respalda los resultados obtenidos en los ensayos realizados, que determinan, que las combinaciones BP4 y BP5 son las más flexibles y resistentes (ver tabla 10).

Aun cuando, las muestras de biopolímero presentaron un esfuerzo máximo considerablemente inferior a la muestra de referencia, sus elongaciones son comparables e incluso superiores. Esto sugiere que, a pesar de no ser tan rígidos como la muestra de referencia, los biopolímeros a base de almidón de yuca (*Maniholt esculenta crantz*) poseen una flexibilidad significativa que podría ser ventajosa en aplicaciones específicas donde la flexibilidad es preferible. Sin embargo, el módulo de elasticidad de Young más bajo indica

que estos biopolímeros no son adecuados para aplicaciones que requieren materiales de alta rigidez y alta fuerza a la ruptura.

Tabla 10. Comparaciones múltiples (HDS Tukey) ensayo de flexión.

Variable dependiente	(I) M	(J) M	Diferencia de medias 0,005 (I-J)	Error estándar	Signif.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
Esfuerzo máximo	BP4	BP2	0,0000389	0,00000624576	0,002	0,0000141252	0,0000635748
		BP3	0,0000393	0,00000624576	0,002	0,0000145752	0,0000640248
		BP6	0,0000336	0,00000624576	0,007	0,0000088752	0,0000583248
		BP8	0,0000346	0,00000624576	0,006	0,0000098252	0,0000592748
		BP9	0,0000303	0,00000624576	0,014	0,0000055952	0,0000550448
		M.R	0,0000291	0,00000624576	0,019	0,0000043252	0,0000537748
	BP5	BP1	0,0000337	0,00000624576	0,007	0,0000089752	0,0000584248
		BP2	0,0000525	0,00000624576	<0,001	0,0000277252	0,0000771748
		BP3	0,0000529	0,00000624576	<0,001	0,0000281752	0,0000776248
		BP6	0,0000472	0,00000624576	<0,001	0,0000224752	0,0000719248
		BP7	0,0000374	0,00000624576	0,003	0,0000126252	0,0000620748
		BP8	0,0000482	0,00000624576	<0,001	0,0000234252	0,0000728748
		BP9	0,0000439	0,00000624576	<0,001	0,0000191952	0,0000686448
		M.R	0,0000427	0,00000624576	0,001	0,0000179252	0,0000673748
Módulo de Young de la prueba de flexión (MYF)	BP5	BP3	0,0000213	0,00000413733	0,009	0,0000049217	0,0000376783
		BP6	0,0000209	0,00000413733	0,011	0,0000045217	0,0000372783
		BP7	0,0000191	0,00000413733	0,02	0,0000027217	0,0000354783
		BP8	0,0000218	0,00000413733	0,008	0,0000053717	0,0000381283
		BP9	0,0000215	0,00000413733	0,009	0,0000051217	0,0000378783
		M.R	0,0000166	0,00000413733	0,047	0,0000001717	0,0000329283

Fuente: Autores, 2024.

En términos de dureza, las muestras de biopolímero que presentaron diferencias estadísticas significativas frente a la muestra de referencia fueron todas las combinaciones, menos la combinación BP4, lo que comprueba que la combinación BP4 es una de las más óptimas en cuanto a las propiedades mecánicas. También se puede evidenciar que dos combinaciones destacan en el grupo de biopolímeros, por presentar una significancia más representativa, esas combinaciones son la BP1 y la BP9 con un $p = 0,008$ igual para las dos, dicho valor de significancia se sitúa muy por debajo del nivel de significancia determinado (ver tabla 11).

Tabla 11. Comparaciones múltiples (HDS Tukey) ensayo de Dureza.

Variable dependiente	(I) M	(J) M	Diferencia de medias 0,005 (I-J)	Error estándar	Significancia	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HBS (Dureza Brinell con bola de acero templado)	M.R (blanco)	BP1	51,885	9,9109	0,008	12,651	91,119
		BP2	41,640	9,9109	0,035	2,410	80,874
		BP3	45,670	9,9109	0,020	6,436	84,904
		BP5	48,960	9,9109	0,012	9,726	88,194
		BP6	43,380	9,9109	0,027	4,146	82,614
		BP7	39,950	9,9109	0,045	0,716	79,184
		BP8	42,370	9,9109	0,032	3,136	81,604
		BP9	52,620	9,9109	0,008	13,386	91,854

Fuente: Autores, 2024.

En general, la menor rigidez del biopolímero reflejada en los módulos de elasticidad de Young, tanto en tracción como en flexión, junto con la menor dureza, indica que este material puede ser más adecuado para aplicaciones que requieran flexibilidad y menor resistencia a la carga. Sin embargo, la rápida degradabilidad del biopolímero destacan sus ventajas para aplicaciones donde la biodegradación es un factor deseable, como en embalajes de un solo uso, productos agrícolas, de limpieza del hogar y personal al igual que de productos de belleza, bolsas de lavanderías, films tipo vinipel, bolsas cuya carga de utilidad no sea muy alta, destacando que el estado de la materia de los productos a embalar en el biopolímero deber ser sólido o semisólido, pues el comportamiento frente al agua de los biopolímeros fue bastante alto siendo un factor desfavorable para el embalaje de productos líquidos

Realizando un análisis individual sobre los resultados obtenidos en la caracterización de los biopolímeros, se logra clasificar el material polimérico como un bioplástico flexible, de acuerdo, a las curvas de esfuerzo vs deformación y demás resultados obtenidos, lo que facilito, establecer el uso industrial de los biopolímeros; para el caso de las combinaciones BP1, BP4 y BP6 presentaron niveles bajos en el esfuerzo tensil y el contenido de humedad absorbida, por lo que, estas combinaciones se recomiendan para fabricar films para envolturas y bolsas cuya funcionalidad no este sometida altas cargas tensil altas ni humedad

excesiva, como por ejemplo: bolsas para embalajes de productos de higiene personal y del hogar, cuya presentación sea en polvo o granulados.

Para las combinaciones BP2, PB7 y BP9, presentaron niveles altos en la resistencia tensil, en el contenido de humedad absorbida y en la dureza, mientras que el nivel de carga a la flexión fue bajo, estas combinaciones pueden ser utilizadas industrialmente para la producción de films tipo vinipel, utilizados para envolver frutas y verduras, empacar en porciones menores productos a granel. En cuanto, a las combinaciones BP3 y BP8 presentaron niveles muy bajos en todas las propiedades mecánicas y muy altos en el contenido de humedad absorbida, por lo que hace difícil atribuir un uso industrial por el momento a dichas combinaciones, para finalizar la combinación que mejores niveles presento fue la BP5, con niveles altos en todas las propiedades mecánicas y bajo para el contenido de humedad absorbida lo que favorece su producción industrial en bolsas para supermercados, lavanderías, farmacias y demás establecimientos comerciales de ventas al detal, entre otras utilidades.

11 CONCLUSIONES

La degradabilidad tanto en agua como en suelo fue una de las características más favorables de los biopolímeros en comparación a la muestra de referencia, ya que los biopolímeros alcanzaron una degradación total en suelo en un intervalo de tiempo de 24 a 45 días y en agua en un periodo de tiempo de 20 a 25 días, en contraste, la muestra de referencia no evidencio ningún nivel de degradabilidad en las mismas condiciones.

Las muestras de biopolímeros BP5 y BP9 destacaron por ofrecer los mejores resultados en términos de resistencia y rigidez. Sin embargo, estos biopolímeros podrían no ser adecuados para aplicaciones que demanden una alta resistencia mecánica, como los envases destinados a soportar cargas elevadas.

Las muestras de biopolímeros BP5, BP6 y BP7 tienen buena flexibilidad, haciéndolos adecuados para aplicaciones que no requieran altos valores de rigidez, como películas plásticas o envolturas flexibles.

El ensayo de dureza reveló que, aunque el biopolímero BP3 presenta buena ductilidad, ninguno de los biopolímeros evaluados destaca significativamente en términos de dureza. Esto los hace más adecuados para aplicaciones donde la resistencia al rayado o a la indentación no sea crítica.

Los biopolímeros analizados muestran un gran potencial en aplicaciones flexibles y desechables, como envolturas o bandejas alimenticias biodegradables, películas biodegradables, envolturas para alimentos frescos y bolsas plásticas biodegradables.

12 RECOMENDACIONES

De acuerdo al desarrollo y resultados obtenidos en la presente investigación, se logró determinar que el tema de los polímeros elaborados a partir de una materia orgánica como es el almidón es bastante extenso y susceptible a variaciones directas e indirectas que pueden modificar los resultados obtenidos, permitiendo así, ampliar el conocimiento científico; es por ello, que recomendamos tener presente para futuras investigaciones los siguientes aspectos:

Perfeccionar el proceso de obtención del biopolímero mediante las herramientas adecuadas y necesarias para tal propósito, como extrusoras de polímeros, hornos de secados, plancha de calentamiento y molino industrias en condiciones de funcionamiento óptimas.

Realizar nuevas investigaciones modificando las combinaciones de las mezclas para obtener biopolímeros con mejores características mecánicas en cuanto a la relación proporcional entre dureza y flexibilidad.

Evaluar la adición de nuevos reactivos que mejoren las características físicas y mecánicas de los biopolímeros a base de almidón de yuca, por ejemplo, analizar el comportamiento mecánico de los biopolímeros agregando fibras orgánicas a las diferentes combinaciones.

Ampliar la investigación a la evaluación de diferentes polímeros sintéticos como muestras de referencia que permitan realizar el cotejo de similitudes en relación a las propiedades mecánicas de cada uno de los biopolímeros obtenidos en la presente investigación, con el fin de facilitar la elección de un uso industrial específico.

Buscar alianzas estratégicas con industrias locales y nacionales, que otorguen apoyos directos e indirectos para el desarrollo de investigaciones similares que aporten significativamente al progreso de la ciencia, el desarrollo sostenible y al bienestar social.

13 BIBLIOGRAFIA

- Aguilera, M., (2012). *La yuca en el Caribe colombiano: De cultivo ancestral a agroindustrial*. Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional y Urbana. Banco de la República - Economía Regional. https://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/dtser_158.pdf
- Álvarez, R., Rondón, C., Gutiérrez, F., Aguilar, C., Suárez, I., & Hernández, F. (2017). *Alternativa ecológica en la obtención de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca dulce*. Revista Agrollania de Ciencia y Tecnología, volumen 14, pág. 37-44. <http://www.postgradovipi.50webs.com/archivos/agrollania/2017/agro6.pdf>
- Araujo, N. (2023). *Guía de prácticas laboratorio de química general (ingeniería agronómica)*. Escuela de Ciencias Agroalimentarias, Animales y Ambientales Ingeniería Agronómica. https://www.researchgate.net/profile/Nelson-Araujo-4/publication/373773520_Guia_de_Practicas_Laboratorio_de_Quimica_General_Ingenieria_Agronomica/links/64fbda9ec5dd8170a081b2fc/Guia-de-Practicas-Laboratorio-de-Quimica-General-Ingenieria-Agronomica.pdf
- Arocena, F., & Sansone, S. (2020). *¿Hámsteres en la rueda? Aceleración y cuarta revolución industrial*. Revista de ciencias sociales. <https://www.scielo.br/j/civitas/a/cnfGzypQqwc5CsVf8Zxs3qj/?format=pdf&lang=e>
- Arrieta, Á., Durango L., & Arizal, E. (2018). *Estudio de las propiedades absorbentes de un biopolímero a base de almidón de yuca (Manihot esculenta Crantz)*. Revista espacios vol. 39, pág. 15. <https://www.revistaespacios.com/cited2017/cited2017-15.pdf>
- Arroyo E., & Alarcón H. (2013). Obtención, caracterización y análisis comparativos de polímeros biodegradables a partir de la yuca, papa y maíz. Instituto de investigación científica.

https://www.ulima.edu.pe/sites/default/files/research/files/presentacion_de_informe_final_34.pdf

ASTM International. Norma ASTM-D638. *Método de prueba estándar para propiedades de tracción de plásticos*. (21 de julio de 2022). <https://www.astm.org/d0638-14.html>

ASTM International. Norma ASTM D5947-18. *Métodos de prueba estándar para dimensiones físicas de muestras de plástico sólido*. (04 de junio de 2024). <https://www.astm.org/d5947-18.html>

ASTM International Industrial physics. Norma ASTM-D882. *Método de prueba estándar para propiedades de tracción de plásticos*. (04 de agosto de 2024). <https://industrialphysics.com/es/normas/astm-d882-es/>

ASTM International. Norma ASTM-D790. *Métodos de prueba estándar para propiedades de flexión de plásticos reforzados y no reforzados y materiales aislantes eléctricos*. (04 de agosto de 2024). <https://www.instron.com/es-ar/testing-solutions/astm-standards/the-definitive-guide-to-astm-d790>

ASTM International. Norma ASTM-D695. *Determinación de las propiedades de compresión de plásticos rígidos*. Instron. (04 de agosto de 2024). <https://www.instron.com/es-es/testing-solutions/astm-standards/astm-d695-plastics>

Avendaño, M. (2022). *Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos para la generación energía en Bogotá*. Fundación universidad de América. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8899>

Avilés, G. (2006). *Obtención y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca*. Ingeniería y Ciencia, vol. 2, pág. 5-28. <https://www.redalyc.org/pdf/835/83520401.pdf>

- Barrada, A. (2009). *Gestión integral de residuos sólidos municipales, estado del arte*. Universidad politécnica de Madrid. <https://oa.upm.es/1922/>
- Barrios, A.J., García S., Manríquez R., Rivera, J.J., & Lomelí, M.G. (2015). *Compósitos biodegradables elaborados a partir de almidón termoplástico y partículas de madera de fresno*. Revista mexicana de ciencias forestales, vol. 6, pág. 26-41. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322015000200003
- Calderón, I.A., Buelvas, M.A. (2023). *Estudio del comportamiento mecánico, la porosidad y la densidad del concreto reciclado con adición de fibras de Tereftalato de polietileno (PET)*. Universidad de Cartagena. <https://repositorio.unicartagena.edu.co/server/api/core/bitstreams/313be48c-7b6b-478f-8118-d1e59da7f743/content>
- Caselles, D.G. (2018). *Modelación de dispersión de gases O₂, CO₂, H₂S, CH₄) y análisis al material particulado (PM₁₀), en el relleno sanitario del parque tecnológico ambiental "Las Batas" de Aguachica, Cesar mediante el uso de herramientas computarizadas*. Universidad Francisco de Paula Santander. <https://repositorioinstitucional.ufpso.edu.co/bitstream/handle/20.500.14167/4482/Trabajo%20de%20grado%20Dayana.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cedeño, G., Crooks, K., Soto, M., Terán, N., & Walters, A. (2022). *Conciencia ambiental frente al inadecuado manejo del plástico por el ser humano*. Asociación nacional de enfermeras. <https://revistas.anep.org.pa/index.php/edh/article/view/35/16>
- Congreso de Colombia. (1973, 19 de diciembre). Ley 23 de 1973. *Por el cual se conceden facultades extraordinarias al presidente de la República para expedir el Código de Recursos Naturales y de Protección al Medio Ambiente y se dictan otras disposiciones*.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=9018#:~:text=Es%20objeto%20de%20la%20presente,los%20habitantes%20del%20territorio%20nacional.>

Congreso de Colombia. (1993, 22 de diciembre). *Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.*
<https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/ley-99-1993.pdf>

Congreso de Colombia. (2022, 07 de julio). Ley 2232 de 2022. *Por la cual se establecen medidas tendientes a la reducción gradual de la producción y consumo de ciertos productos plásticos de un solo uso y se dictan otras disposiciones.*
<https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2024/07/LEY-2232-DE-07-DE-JULIO-DE-2022.pdf>

Escalante, W. (2014). *Plan de gestión y manejo ambiental para disminuir los agentes contaminantes a base de petróleo que permita minimizar los riesgos sobre la salud humana y el ambiente, en la comunidad de Aguachica.* Universidad nacional abierta y a distancia (UNAD).
<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/2606/77181078.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Flores, D.S. (2009). *Elaboración de materiales biodegradables base sacarosa.* Centro de investigación química aplicada.
<https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/370/1/Daniela%20Sara%20Flores%20Valdez.pdf>

- Gaitán, J.A. (2009). *Obtención, caracterización y comparación de almidón termoplástico a partir de almidón de yuca y maíz*. Universidad de los andes.
<https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/ab042059-fa63-4830-8253-10a353762425/content>
- Gatica, G., Ospina D., Montenegro B., & Monroy, M.V. (2020). *Tercer Encuentro Nacional de Semilleros de Investigación de Ingeniería Industrial (ENSIII)*. Universidad Santo Tomás.
https://www.researchgate.net/publication/347311005_Tercer_Encuentro_Nacional_de_Semilleros_de_Investigacion_de_Ingenieria_Industrial_ENSIII_-_2019/link/607e1f9c881fa114b414bcd0/download?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19
- Greenpeace. (2018). *Un millón de acciones contra el plástico*.
<https://es.greenpeace.org/es/sala-de-prensa/informes/un-millon-de-acciones-contra-los-plasticos/>
- Hernández, A. (2021). *Análisis de la gestión de residuos sólidos en Colombia*. Universidad militar Nueva Granada.
<https://repository.unimilitar.edu.co/server/api/core/bitstreams/f909739c-a8df-46a5-8d52-d1cc4422aa0f/content>
- Labeaga, A. (2018). *Polímeros biodegradables. Importancia y potenciales aplicaciones*. Departamento de química orgánica e ingeniería química.
<https://es.scribd.com/document/415096508/Labeaga-Viteri-Aitziber-TFM>
- Mejía, D.C. (2020). *Estudio del manejo de residuos plásticos en Colombia*. Tecnológico de Antioquia, institución universitaria. Medellín.
<https://dspace.tdea.edu.co/bitstream/handle/tdea/952/Residuos%20plasticos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Meneses, J., Corrales, C.M. & Valencia, M. (2007). *Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca*. Revista EIA. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372007000200006
- Mijanjos, C. (2020). *100 años de Ciencia de Polímeros en el mundo, 73 años en nuestro país*. Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8109366>
- Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (2003, 26 de septiembre). Resolución 1045 de 2003. *Por la cual se adopta la metodología para la elaboración de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos, PGIRS, y se toman otras determinaciones*. <https://minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-1045-2003>
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2018, 26 de julio). Resolución 1407 de 2018. *Por la cual se reglamenta la gestión ambiental de los residuos de envases y empaques de papel, cartón, plástico, vidrio, metal y se toman otras determinaciones*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/resolucion-1407-de-2018.pdf>
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2016, 28 de abril). Resolución 0668 de 2016. *Por la cual se reglamenta el uso racional de bolsas plásticas y se adoptan otras disposiciones*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Resolucion-0668-2016.pdf>
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2019, 26 de diciembre). Resolución 2184 de 2019. *Por la cual se modifica la resolución 668 de 2016 sobre uso racional de bolsas plásticas y se adoptan otras disposiciones*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/resolucion-2184-de-2019.pdf>

- Morfin, A. (2020). *Síntesis y caracterización de nanomateriales híbridos para el uso como sistema de carga y liberación de fármacos*. Centro de investigación de química aplicada, programa de doctorado en tecnología de polímeros. <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/660/1/Tesis%20DTP%20Adriana%20Morf%C3%ADn%2026%20Nov%202020.pdf>
- Navia, D.P., & Villada, H.S. (2013). *Impacto de la investigación en empaques biodegradables en ciencia, tecnología e innovación*. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612013000200020
- Palma, G.H., & Tenesaca, C.F. (2020). *Estudio de la degradabilidad del PET (polietileno tereftalato) dosificado con celulosa de la cascara de cacao*. Universidad politécnica salesiana sede cuenca. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18373/4/UPS-CT008688.pdf>
- Posada, J.C., & Montes, E. (2021). *Revisión: materiales poliméricos biodegradables y su aplicación en diferentes sectores industriales*. Instituto tecnológico metropolitano. <file:///C:/Users/sayjo/Downloads/Dialnet-RevisionMaterialesPolimericosBiodegradablesYSuApli-8905948.pdf>
- Presidencia de la república de Colombia. (1974, 18 de diciembre). Decreto 2811 de 1974. *Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1551>
- Presidencia de la república de Colombia. (2002, 06 de agosto). Decreto 1713 de 2002. *Por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994, la Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo, y el Decreto Ley 2811 de*

1974 y la Ley 99 de 1993 en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=5542>

Presidencia de la república de Colombia. (2003, 06 de junio). Decreto 1505 de 2003. *Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1713 de 2002, en relación con los planes de gestión integral de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones.*
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=8434>

Presidencia de la república de Colombia. (2016, 11 de abril). Decreto 596 de 2016. *Por el cual se modifica y adiciona el Decreto 1077 de 2015 en lo relativo con el esquema de la actividad de aprovechamiento del servicio público de aseo y el régimen transitorio para la formalización de los recicladores de oficio, y se dictan otras disposiciones.*
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=69038>

Presidencia de la república de Colombia. (2017, 26 de diciembre). Decreto 2198 de 2017. *Por el cual se modifica el epígrafe de la Parte 5 del Libro 1 y se adiciona el Título 6 a la Parte 5 del Libro 1 del Decreto 1625 de 2016 Único Reglamentario en Materia Tributaria, para reglamentar el parágrafo 1 del artículo 512-15 y los numerales 3 y 4 del artículo 512-16 del Estatuto Tributario.*
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=85046>

Red colombiana de metrología. (2021). *Guía para la determinación de contenido de humedad en granos y cereales INM/GTM-T/06.* <https://inm.gov.co/web/wp-content/uploads/2021/12/GUIA-DETERMINACION%CC%81N-CONTENIDO-DE-HUMEDAD.pdf>

Reina, K.A., & Torres, Z.Y. (2020). *Actualización del plan de manejo integral de residuos sólidos - PMIRS para el bioparque los ocarros en la ciudad de Villavicencio, Meta.*
Universidad Santo Tomas.

<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/28063/2020katwinreina.pdf?sequence=16&isAllowed=y>

Rivas, C.A. (2018). *Piensa un minuto antes de actuar: gestión integral de los residuos sólidos*. Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. https://www.academia.edu/49587027/PIENSA_UN_MINUTO_ANTES_DE_ACTUAR_GESTI%C3%93N_INTEGRAL_DE_RESIDUOS_SOLIDOS

Ruiz, P. (2016). *Obtención y caracterización física y química del almidón de yuca (Manihot esculentum) variedad de Guayape*. Universidad nacional. Lambayeque, Perú. [file:///C:/Users/sayjo/Downloads/BC-TES-4008%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/sayjo/Downloads/BC-TES-4008%20(1).pdf)

Sánchez, J.F. (2020). *Impacto del plástico de un solo uso y alternativas para su sustitución en el municipio de Urrao*. Tecnológico de Antioquia institución universitaria. <https://dspace.tdea.edu.co/bitstream/handle/tdea/964/Impacto%20plastico.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

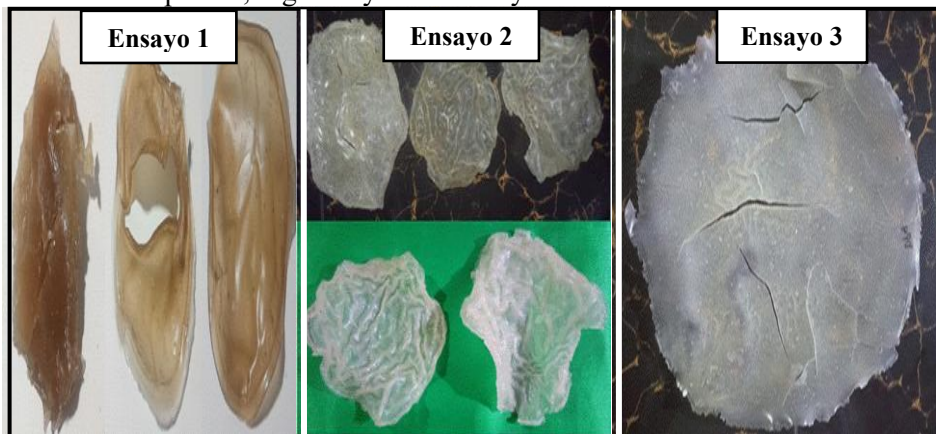
Simón, C.M. (2021). *Biodegradabilidad de plásticos en agua, suelo y compost. Ensayos*. Universidad de Alcalá. <https://core.ac.uk/download/pdf/483369571.pdf>

Soto, H., Tibaduiza, T., Montilla, M., Triana, O., Suarez, D.C., Torres, M., Arias, M.T., & Lugo, L. (2014). *Investigación de vectores y reservorios en brote de Chagas agudo por posible transmisión oral en Aguachica, Cesar, Colombia*. Investigación de vectores y reservorios en brote de Chagas agudo por posible transmisión oral en Aguachica, Cesar, Colombia. <https://www.scielo.br/j/csp/a/fjZzXxyBGYQJtWHM4ScLZLH/?format=pdf&lang=es>

- Soto, J. (2020). *Elaboración y caracterización de películas plásticas a partir de polímeros biodegradables*. Escuela de estudios superiores de Xalostoc. <http://riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/3289/SOGJNC00.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vargas, N.J., Villate, J.P., & Habran, N.M. (2021). *Caracterización mecánica y determinación de la resistencia a la tracción de fibras de caña brava para uso en construcciones rurales*. <https://revistas.uniminuto.edu/index.php/Inventum/article/view/2793/2323>
- Viracacha, Y.J., Cabezas Y.P., & Martínez H. (2004). *Proyecto de viabilidad para establecer una planta procesadora de almidón de yuca en el municipio Aguazul. Casanare*. Universidad nacional abierta y s distancia (UNAD). <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/19539/ypcabezasg.pdf;jsessionid=41757CC0127BD54D7D8BD88EFBBB49?sequence=1>

14 ANEXOS

Anexo 1. Resultado del primer, segundo y tercer ensayo.



Anexo 2. Resultado del cuarto ensayo.



Anexo 3. Resultados generales de la prueba de tracción.

Combinación	Esfuerzo máximo (σ) MPa	Elongación %	Módulo de elasticidad young MPa
BP1	$1,1 \times 10^{-2}$	85,25	$1,3 \times 10^{-1}$
BP2	$2,0 \times 10^{-2}$	112,88	$1,6 \times 10^{-1}$
BP3	$1,3 \times 10^{-2}$	93,90	$5,3 \times 10^{-1}$
BP4	$1,6 \times 10^{-2}$	159,28	$1,9 \times 10^{-1}$
BP5	$2,4 \times 10^{-2}$	155,57	$1,4 \times 10^{-1}$
BP6	$3,1 \times 10^{-2}$	133,77	$1,1 \times 10^{-1}$
BP7	$2,0 \times 10^{-2}$	162,81	$3,8 \times 10^{-1}$
BP8	$1,9 \times 10^{-2}$	152,75	$2,8 \times 10^{-1}$
BP9	$2,0 \times 10^{-2}$	178,11	$4,4 \times 10^{-1}$
MR	$2,2 \times 10^{-1}$	48,08	$5,5 \times 10^1$

Anexo 4. Resultados generales de la prueba de flexión.

Combinación	Esfuerzo máximo (σ) MPa	Elongación %	Módulo de elasticidad young MPa
BP1	$1,0 \times 10^{-7}$	1935,70	$4,8 \times 10^{-5}$
BP2	$3,0 \times 10^{-9}$	2062,30	$1,9 \times 10^{-5}$
BP3	$1,0 \times 10^{-9}$	1698,43	$9,1 \times 10^{-6}$
BP4	$4,7 \times 10^{-8}$	2164,80	$2,0 \times 10^{-5}$
BP5	$5,3 \times 10^{-8}$	3225,67	$1,5 \times 10^{-5}$
BP6	$4,0 \times 10^{-9}$	3076,87	$1,1 \times 10^{-6}$
BP7	$1,7 \times 10^{-8}$	2178,20	$3,8 \times 10^{-6}$
BP8	$4,0 \times 10^{-9}$	3101,30	$7,0 \times 10^{-7}$
BP9	$1,2 \times 10^{-8}$	3137,47	$1,8 \times 10^{-6}$
MR	$1,1 \times 10^{-8}$	1747,20	$1,3 \times 10^{-4}$

Anexo 5. Resultados generales de la prueba de dureza.

Combinación	Esfuerzo máximo (σ) MPa	Elongación %	Módulo de elasticidad young MPa
BP1	$1,6 \times 10^{-8}$	337,75	$5,8 \times 10^{-11}$
BP2	$1,4 \times 10^{-8}$	257,07	$1,4 \times 10^{-10}$
BP3	$1,6 \times 10^{-8}$	210,03	$4,0 \times 10^{-10}$
BP4	$1,5 \times 10^{-8}$	597,50	$1,6 \times 10^{-11}$
BP5	$1,6 \times 10^{-8}$	265,90	$3,0 \times 10^{-10}$
BP6	$1,6 \times 10^{-8}$	268,80	$5,7 \times 10^{-11}$
BP7	$1,5 \times 10^{-8}$	243,40	$1,5 \times 10^{-10}$
BP8	$9,0 \times 10^{-9}$	217,43	$7,7 \times 10^{-11}$
BP9	$1,6 \times 10^{-8}$	358,85	$1,8 \times 10^{-10}$
MR	$1,6 \times 10^{-8}$	122,45	$7,3 \times 10^{-10}$

Anexo 6. Porcentaje de contenido de humedad absorbida.

Combinación	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Contenido de humedad absorbida (%)
BP1	3,03	3,7	22,11
BP2	3,14	6,25	99,04
BP3	3,51	4,47	27,35
BP4	3,7	5,52	49,19
BP5	4,66	5,37	15,24
BP6	4,25	5,77	35,76
BP7	3,23	5,58	72,76
BP8	4,09	5,85	43,03
BP9	4,33	7,06	63,05
M.R	1	1	0,00

Anexo 7. Resultados de la prueba de densidad.

Combinación	Volumen inicial (mL)	Volumen final (mL)	Δ Volumen (mL)	Masa (g)	Densidad (g/mL)
BP1	140	141	1	1,49	1,5
BP2	140	142	2	2,44	1,2
BP3	140	142	2	2,56	1,3
BP4	140	142	2	2,55	1,3
BP5	140	142	2	3,08	1,5
BP6	140	142	2	2,71	1,4
BP7	140	141	1	1,95	2,0
BP8	140	141	1	2,82	2,8
BP9	140	143	3	3,14	1,0
M.R	140	140	0	4,14	0

Anexo 8. Resultados de la prueba de degradabilidad.

Combinaciones	Suelo (días para degradación)	Agua (días para degradación)
PB1	24	20
PB2	29	20
PB3	42	20
PB4	40	25
PB5	38	25
PB6	45	25
PB7	40	25
BP8	35	25
BP9	30	25
BLANCO	365000	182500

Fuente: Autores, 2024.

Anexo 9. Registro fotográfico.



Procesamiento de la yuca



Tamizaje de la mezcla



Decantación del almidón



Pesaje de reactivos solidos



Medición de los reactivos



Medición del volumen de agua.







Visita a las instalaciones de la UTS



Equipo para ensayo de impacto



Equipo para ensayo de tracción



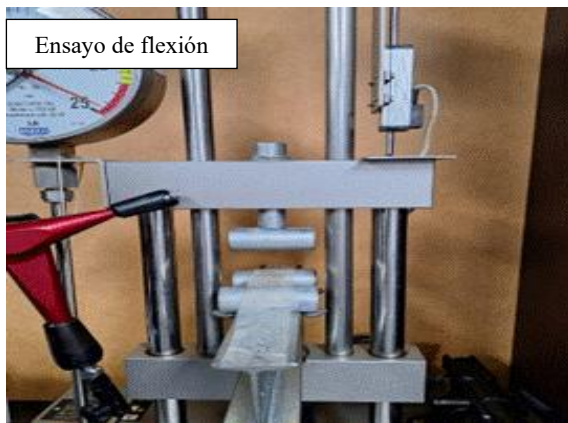
Ensayo de tracción



Medición de las muestras de biopolímeros



Colocación de la muestra para ensayo de tracción



Ensayo de flexión



Medición del punto de ruptura flexión



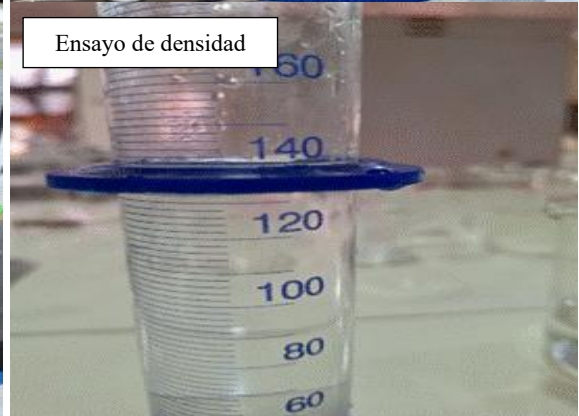
Equipo para ensayo de dureza



Ejecución ensayo de dureza



Ensayo de dureza



Ensayo de densidad



Contenido de humedad absorbida



Ensayo de sellamiento



Degradabilidad en suelo



Degradabilidad en agua