



# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y  
AMBIENTALES**

**CARRERA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

**“EVALUACIÓN DE RESIDUOS DE LIMÓN *CITRUS LIMON* PARA LA  
OBTENCIÓN DE UN POLÍMERO BIODEGRADABLE.”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERÍA  
AGROINDUSTRIAL**

**Línea de investigación: Gestión, producción, productividad, innovación y desarrollo  
socioeconómico.**

**AUTORA**

**ALISSETH FERNANDA MENESES QUIROZ**

**DIRECTOR**

**BIOQ: VALERIA OLMEDO-GALARZA MSc.**

**Ibarra – Ecuador 2026**



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

### AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

#### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	0450146410		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Meneses Quiroz Alisseth Fernanda		
<b>DIRECCIÓN:</b>	El Ángel		
<b>EMAIL:</b>	afmenesesq@utn.edu.ec		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	x	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0989812864

DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO:</b>	Evaluación de residuos de limón <i>citrus limon</i> para la obtención de un polímero biodegradable
<b>AUTOR (ES):</b>	Meneses Quiroz Alisseth Fernanda
<b>FECHA: DD/MM/AAAA</b>	28/01/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
<b>PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> <b>PREGRADO</b> <input type="checkbox"/> <b>POSGRADO</b>
<b>TITULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniera Agroindustrial
<b>DIRECTOR:</b>	Bioq. Valeria Olmedo-Galarza MSc.

## **2. CONSTANCIAS**

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 28 días del mes de Enero de 2026

### **EL AUTOR:**

Meneses Quiroz Aliseth Fernanda

C.I: 0450146410

## CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE TRABAJO EN INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 28 de Enero del 2026

Bioq. Valeria Olmedo-Galarza MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normativas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.



(f).....

Bioq. Valeria Olmedo-Galarza MSc.

## APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificador del trabajo de integración Curricular titulado “Evaluación de residuos de limón *citrus limon* para la obtención de un polímero biodegradable”, elaborado por Meneses Quiroz Alisseth Fernanda, como requisito previo a la obtención del título de Ingeniera Agroindustrial, aprueba el presente informe de investigación, en virtud de que cumple con los requisitos académicos y metodológicos establecidos, en representación de la Universidad Técnica del Norte.



(f).....

Bioq. Valeria Olmedo-Galarza MSc.

C.I: 1714505078



(f).....

Ing. Armando Manosalvas-Quiroz MSc.

C.I: 1001772134

## **AGRADECIMIENTOS**

*Agradezco, en primer lugar, a Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto y darme la fortaleza para superar cada obstáculo en el camino académico y personal.*

*A mi familia, por su apoyo incondicional, su comprensión y su constante motivación durante cada etapa de este proceso.*

*A mi directora de tesis, por su orientación, paciencia y rigurosidad académica, que permitieron mejorar la calidad de este trabajo y guiar correctamente el proceso de investigación.*

*Finalmente agradezco a todas las personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron al desarrollo de esta investigación, ya sea mediante apoyo técnico, académico o emocional.*

*Este trabajo marca la culminación de una etapa académica y proyecta nuevos desafíos profesionales guiados por la ciencia, la disciplina y el compromiso con la sociedad.*

## ***Dedicatoria***

*A Dios, por concederme la vida, la fortaleza y la perseverancia necesaria para afrontar los momentos más exigentes de este proceso académico.*

*A mis padres, mis hermanos y abuelita, por su apoyo constante y su acompañamiento incondicional en cada amanecer cansado y en cada noche de dudas. Ustedes fueron mi razón para seguir cuando parecía más fácil rendirse.*

*Este trabajo no solo representa el cierre de una etapa académica, sino también el reflejo de todos los sacrificios, la fe y la constancia que me trajeron hasta aquí.*

*Alisseth Meneses*

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3 OBJETIVOS.....	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos .....	4
1.4 HIPÓTESIS.....	4
Hipótesis nula (H <sub>n</sub> ):.....	4
Hipótesis alternativa (H <sub>a</sub> ):.....	4
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>5</b>
<b>MARCO TEORICO .....</b>	<b>5</b>
2.1 LIMÓN VARIEDAD MEYER .....	5
2.1.1 Características botánicas.....	6
2.2 COMPOSICIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL CITRUS LIMON .....	6
2.2.1 Pectina .....	7
2.2.2 Fibra.....	7
2.2.3 Sólidos solubles .....	8
2.2.4 Lípidos .....	8
2.2.5 Índice de Madurez (Colorimetría) .....	8
2.2.6 Ceniza .....	9
2.2.7 Acidez titulable .....	9
2.2.8 pH .....	10
2.3 RESIDUOS CÍTRICOS .....	10
2.4 POLÍMEROS .....	11
2.5 POLÍMERO BIODEGRADABLE .....	12
2.6 PLASTIFICANTES Y RIGIDIZANTES EN BIOPOLÍMERO .....	14
2.6.1 Glicerol .....	14
2.6.2 Ácido acético .....	15

2.6.3 Sorbitol .....	15
2.6.4 Ácido cítrico .....	15
2.7 PROPIEDADES MECÁNICAS .....	16
2.7.1 Tracción .....	16
2.7.2 Impacto .....	17
2.7.3 Biodegradabilidad.....	17
2.7.4 Solubilidad.....	18
2.7.5 Antibacteriano y Antifúngico.....	18
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>20</b>
MATERIALES Y MÉTODOS .....	20
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	20
3.1.1 Enfoque.....	20
3.1.2 Diseño experimental.....	21
3.2 Caracterización del Área de Estudio .....	21
3.2.1 Análisis de las Características Fisicoquímicas de Residuos de Limón .....	21
3.2.2 Elaboración de un polímero biodegradable a partir de residuos de limón. ....	28
3.2.3 Determinación de la Propiedades Mecánicas, Microbiológicas y Biodegradables del Polímero .....	33
<b>CAPITULO IV .....</b>	<b>36</b>
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
4.1 Análisis de las características fisicoquímicas de residuos de Limón .....	36
4.1.1 pH .....	37
4.1.2 Fibra.....	37
4.1.3 Lípidos .....	38
4.1.4 Pectina .....	38
4.1.5 Ceniza .....	39
4.1.6 Grados Brix.....	39
4.1.7 Humedad.....	40
4.1.8 Acidez titulable .....	40
4.2.- Elaboración de un polímero biodegradable a partir de residuos de limón.....	41
4.2.1 Efecto principal de los factores .....	42

4.2.2 Interacciones significativas entre factores .....	44
4.2.3 Comparación de tratamientos .....	44
4.3.- Determinar las propiedades mecánicas, biodegradables, antibacterianas y antifúngicas del polímero. ....	46
4.3.1 Análisis integral de las propiedades de color del biopolímero .....	46
4.3.2 Pruebas mecánicas .....	51
4.3.2 Pruebas microbiológicas.....	55
4.3.3 Biodegradabilidad.....	58
<b>CAPITULO V.....</b>	<b>68</b>
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	68
5.1 Conclusiones .....	68
5.2 Recomendaciones.....	69
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>70</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>76</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1</i> Clasificación taxonómica .....	6
<i>Tabla 2</i> Parámetros y métodos .....	22
<i>Tabla 3</i> Factores de estudio constantes .....	30
<i>Tabla 4</i> Codificación de los tratamientos .....	30
<i>Tabla 6</i> Resultados de las características fisicoquímicas .....	36
<i>Tabla 7</i> Evaluación cualitativa de las películas obtenidas por tratamiento .....	42
<i>Tabla 8</i> Resultados del color .....	47
<i>Tabla 9</i> Resultados de tracción e impacto .....	51
<i>Tabla 10</i> Resultados_ actividad microbiológica.....	56
<i>Tabla 11</i> Resultados de biodegradabilidad y solubilidad.....	59

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Limón Meyer.....	5
<i>Figura 2.</i> Colorimetría del limón .....	9
<i>Figura 3.</i> Video del buceador Rich Horner en la isla hondureña de Roatán hasta Bali, en concreto hasta Manta Point.....	12
<i>Figura 4.</i> Sistema CIELAB.....	22
<i>Figura 5.</i> Potenciómetro GMH 3500 .....	23
<i>Figura 6.</i> .....	25
<i>Figura 7.</i> Refractómetro.....	26
<i>Figura 8</i> Diagrama de flujo del proceso .....	31
<i>Figura 9</i> Tratamientos.....	42
<i>Figura 10.</i> Pareto de efectos estandarizados .....	48
<i>Figura 11.</i> Optimización del color mediante superficies de respuesta .....	48
<i>Figura 12.</i> .....	49
<i>Figura 13.</i> Pareto de efectos estandarizados (Tracción) .....	52
<i>Figura 14</i> Optimización de la tracción mediante superficie respuesta.....	53
<i>Figura 15.</i> .....	55
<i>Figura 16</i> Experimentación prueba antifúngica .....	57
<i>Figura 17</i> Actividad microbiana .....	58
<i>Figura 18</i> Prueba de biodegradabilidad en tierra_ pantallas visibles.....	59
<i>Figura 19</i> Coloraciones rosadas en el ensayo biodegradabilidad .....	61
<i>Figura 20.</i> .....	62
<i>Figura 21.</i> .....	62
<i>Figura 22.</i> .....	63
<i>Figura 23.</i> .....	65
<i>Figura 24.</i> .....	65
<i>Figura 25.</i> .....	66

## ÍNDICE DE ANEXOS

<i>Anexo 1. Prueba de Tukey L*</i> .....	76
<i>Anexo 2. Tukey a*</i> .....	76
<i>Anexo 3. Tukey b*</i> .....	77
<i>Anexo 4. Tukey <math>\Delta E</math></i> .....	78
<i>Anexo 5. Prueba Tukey C*</i> .....	78
<i>Anexo 6. Tukey h*</i> .....	79
<i>Anexo 7. Prueba de Tukey tracción</i> .....	79
<i>Anexo 8. Prueba Tukey Impacto</i> .....	80
<i>Anexo 9. Prueba Tukey Biodegradabilidad</i> .....	80
<i>Anexo 10. Prueba Tukey solubilidad</i> .....	81

## RESUMEN

El presente estudio se enfocó en la elaboración de un polímero biodegradable a partir de residuos de limón, con el objeto de desarrollar un material sustentable con posibles propiedades antibacterianas y antifúngicas, en un contexto donde el manejo de residuos y la contaminación por plásticos representan un problema ambiental y a la salud pública, por lo que se plantea el aprovechamiento de subproductos del limón como la materia prima para ser una alternativa viable en la elaboración del biopolímero.

Se llevó a cabo la caracterización fisicoquímica de los residuos de limón mediante la evaluación de parámetros como color, pH, sólidos solubles (°Brix), acidez titulable, contenido de humedad, lípidos, cenizas, pectina y fibra, a fin de determinar su viabilidad como insumo base. Posteriormente, se diseñó un proceso tecnológico para la extracción de pectina y formulación del polímero, bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo y concentración, aplicando principios de ingeniería y sostenibilidad.

Las láminas de biopolímero obtenidas fueron sometidas a ensayos de caracterización que incluyeron pruebas mecánicas (resistencia a la tracción e impacto), evaluaciones microbiológicas (bacterianas y fúngicas) y análisis de biodegradabilidad en condiciones simuladas. Los resultados demostraron que los residuos de *Citrus limon* presentan propiedades funcionales favorables y actividad antimicrobiana lo que amplía su potencial de aplicación en el desarrollo de empaques activos, películas biodegradables y recubrimientos para la industria alimentaria y farmacéutica.

La investigación concluye que es técnicamente viable la producción de biopolímeros funcionales a partir de residuos cítricos, proponiendo una alternativa sostenible, económica y de valor agregado que contribuye a la economía circular y la reducción del impacto ambiental en sistemas agroindustriales.

**Palabras clave:** polímero, biodegradable, limón, residuos cítricos, impacto ambiental.

## ABSTRACT

This research addresses the valorization of lemon processing residues through the development of a biodegradable polymer with functional properties. In response to current challenges related to plastic pollution and inadequate waste management, lemon byproducts were explored as a renewable raw material for biopolymer production.

The study involved a comprehensive physicochemical characterization of the residues, including the evaluation of color, pH, Brix degrees, titratable acidity, moisture content, lipids, ash, pectin, and fiber, in order to assess their suitability for polymer formulation. Based on these findings, a technological process was established for pectin extraction and polymer synthesis under controlled conditions of temperature, time, and concentration, following engineering and sustainability criteria.

The resulting biopolymer films were evaluated through mechanical testing (tensile and impact resistance), microbiological essays targeting bacterial and fungal activity, and biodegradability assessments under simulated environmental conditions. The results indicated that *Citrus limon* residues exhibit favorable functional performance and antimicrobial activity, supporting their potential application in active packaging uses.

Overall, the findings confirm the technical of producing functional biopolymers from citrus residues, offering a sustainable and value-added alternative that supports circular economy strategies and reduces environment impacts within agro-industrial systems.

**Keywords:** polymer, biodegradable, lemon, citrus waste, environmental impact.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el crecimiento poblacional y el avance de la industrialización han llevado a desafíos ambientales vinculados a los modelos actuales de producción y consumo. Uno de los sectores más afectados es el agroindustrial, en especial la de los cítricos, que genera grandes volúmenes de residuos orgánicos subutilizados. En países como Ecuador, donde se producen aproximadamente 142 mil toneladas anuales de cítricos, cerca del 50% de esta cantidad se convierte en desecho, generando impactos negativos en el ambiente al no contar con procesos adecuados de valorización (Muñoz Briones et al., 2021).

La contaminación generada por plásticos derivados del petróleo constituye actualmente uno de los principales problemas ambientales a escala global, debido a su elevada resistencia a la degradación y los efectos adversos que provoca tanto en los ecosistemas como en la salud humana (GAIA, 2021). Frente a este escenario, el desarrollo de materiales alternativos ha cobrado relevancia, destacándose los biopolímeros como una opción viable por su origen renovable y su capacidad de degradarse en condiciones naturales, lo que contribuye a la reducción del impacto ambiental (Alcaide et al., 2020).

La literatura científica reporta el uso de diversas materias primas orgánicas entre ellas algas, frutas tropicales y residuos agrícolas, para la obtención de biopolímero. En este contexto, los residuos cítricos se posicionan como una fuente relevante y biomasa lignocelulósica, caracterizada por un alto contenido de carbohidratos y una baja proporción de lignina, propiedades que favorecen su aplicación en el desarrollo de polímeros biodegradables (Yaradoddi et al., 2022; Suri et al., 2021). Adicionalmente, el aceite esencial de limón, rico en compuestos como el d-limoneno, presenta propiedades antimicrobianas de interés que pueden mejorar la funcionalidad de los materiales obtenidos (Venkataraman et al., 2024).

El desarrollo de biopolímeros a partir de residuos cítricos se enmarca en los principios de la economía circular, al promover la valorización de desechos y su transformación en insumos de

valor agregado. Este enfoque contribuye, además, al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible relacionados con la producción responsable, la mitigación del cambio climático y la innovación en procesos industriales.

## 1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En los últimos años, la demanda global de cítricos ha experimentado un notable aumento, tanto en su forma fresca como procesada, lo que ha impulsado un incremento en su cultivo y, en consecuencia, en la generación de residuos asociados. La industria alimentaria enfrenta serios desafíos en la gestión de estos residuos sólidos, los cuales, debido a su cantidad y diversidad, representan un problema significativo para el manejo ambiental (Muñoz *et al.*, 2019). La producción de cítricos a nivel mundial supera los 124,3 millones de toneladas anuales, siendo los jugos el principal producto derivado. Sin embargo, tras el consumo, entre el 40 y 60% de la fruta se descarta, lo que genera entre 110 y 120 millones de toneladas de residuos cítricos, tales como cáscaras, membranas y semillas, los cuales provienen del proceso de producción (Mahato *et al.*, 2020; Kim y Kim, 2016).

Según lo indicado por Muñoz Briones *et al.* (2021), en Ecuador, la producción de cítricos alcanza las 142 mil toneladas anuales, de las cuales solo el 50% es aprovechada en aplicaciones alimentarias. El otro 50%, correspondiente a aproximadamente 71 mil toneladas, se constituye en residuos orgánicos, que son desechados sin valor agregado.

El uso extendido de plástico convencionales, como el polietileno, el polipropileno y tereftalato de polietileno, ha intensificado los problemas de contaminación ambiental a escala global, debido a su elevada resistencia a los procesos de degradación y a la acumulación de residuos de difícil manejo. En países como Ecuador y México, la importación de desechos plásticos representa una preocupación creciente, asociada a los impactos ambientales y sanitarios derivados de materiales de origen no renovable y carentes de biodegradabilidad (Merino *et al.*, 2022; GAIA, 2021).

Los residuos de cítricos emergen como una alternativa con alto potencial para la producción de biopolímeros, al tratarse de una materia prima renovable cuyo aprovechamiento contribuye a la

reducción de emisiones de dióxido de carbono y a la disminución del impacto ambiental en comparación con los plásticos convencionales.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

La creciente preocupación por la contaminación ambiental y el impacto de los plásticos convencionales en el ecosistema ha impulsado el desarrollo de alternativas sostenibles, siendo los biopolímeros una opción prometedora. En este marco, los residuos de cítricos, como los de limón (*Citrus limon*), han emergido como una materia prima valiosa debido a sus propiedades fisicoquímicas, tales como la presencia de celulosa, pectina y aceites esenciales con actividad antimicrobiana (Venkataraman *et al.*, 2024). Estos residuos, generados en grandes volúmenes por la industria alimentaria, especialmente en la elaboración de jugos y otros derivados, plantean retos relacionados al manejo adecuado y reducción de desechos. No obstante, su aprovechamiento para la producción de biopolímeros abre una vía hacia la economía circular, permitiendo transformar los desechos en recursos útiles.

La investigación desarrollada se centra en la evaluación de las características fisicoquímicas de los residuos de limón como base para la obtención de un polímero biodegradable. Los componentes estructurales presentes, principalmente pectina y celulosa, ofrecen propiedades adecuadas para la formulación de biopolímeros funcionales y biodegradables, constituyendo una alternativa al uso de polímeros de origen petroquímico. Asimismo, la presencia de aceites esenciales en los residuos cítricos podría aportar actividad antimicrobiana al material final, ampliando su potencial de aplicación, en particular en la industria alimentaria, donde la inocuidad y la conservación de los productos resultan prioritarias.

El desarrollo de un biopolímero a partir de estos residuos no solo contribuiría a la reducción de desechos, sino que también alinearía el proyecto con los objetivos del desarrollo sostenible, específicamente con la creación de soluciones que promuevan ciudades y comunidades sostenibles, tal como plantea la Agenda 2030. Los biopolímeros derivados de los residuos de limón podrían ofrecer propiedades de barrera frente a gases y humedad, mejorar la flexibilidad del

material, y al mismo tiempo, ser una alternativa más ecológica al plástico convencional, con un menor impacto ambiental y una tasa de biodegradabilidad más alta (Kharb y Saharan, 2024).

El estudio contribuye al fortalecimiento del conocimiento científico sobre el aprovechamiento de residuos de limón en la obtención de biopolímeros y aporta bases técnicas para el desarrollo de soluciones sostenibles en la gestión de residuos agroindustriales.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo General

- ✓ Evaluar residuos de limón *Citrus limon* para la obtención de un polímero biodegradable.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- ✓ Analizar las características fisico-químicas de residuos de limón *Citrus limon*
- ✓ Elaborar un polímero biodegradable a partir de residuos de limón.
- ✓ Determinar las propiedades mecánicas, biodegradables, antibacterianas y antifúngicas del polímero.

## 1.4 HIPÓTESIS

**Hipótesis nula (H<sub>n</sub>):** Se puede obtener un polímero biodegradable con propiedades antibacterianas y antifúngicas a partir de residuos de limón *Citrus limon*.

**Hipótesis alternativa (H<sub>a</sub>):** No se puede obtener un polímero biodegradable con propiedades antibacterianas y antifúngicas a partir de residuos de limón *Citrus limon*.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEORICO

#### 2.1 LIMÓN VARIEDAD MEYER

El limón Meyer (*Citrus meyeri*, M.) es una variedad híbrida resultante del cruce entre un limón convencional y una naranja dulce. Su origen se encuentra en China, desde donde fue llevado a los Estados Unidos por Frank Meyer a inicios del siglo XX. Este cítrico es altamente valorado tanto en la cocina como en la industria alimentaria debido a su perfil sensorial único, caracterizado por un sabor más suave y menos ácido, una cáscara delgada y un tono amarillo anaranjado al alcanzar su madurez como se muestra en la Figura 1 (Limón Meyer, n.d.).

*Figura 1.*

*Limón Meyer*



Tomado de: serratosfarms.com

En primera instancia la ubicación geográfica del país es una ventaja para la producción de limón, especialmente, en Loja, Azuay, Imbabura y Pichincha.

Por otro lado, las características físicas y químicas del suelo son determinantes en el desarrollo adecuado de cítricos. En particular, el limón Meyer muestra un crecimiento más eficiente en sustratos bien drenados, con un pH entre 5,5 y 6,5. La presencia de niveles moderados a elevados de materia orgánica favorece su desarrollo fisiológico, mientras que los suelos profundos resultan esenciales para el establecimiento de un sistema radicular robusto, garantizando tanto la estabilidad estructural del árbol como una absorción eficiente de nutrientes.

Desde el punto de vista climático, esta variedad prospera en rangos de temperatura entre 15 y 30 °C con exposición directa de radiación solar de al menos 6 horas, siendo Imbabura una de las provincias con presencia para potenciar su crecimiento y maximizar su rendimiento frutal.

### 2.1.1 Características botánicas

De acuerdo con Medina (2007) el limón Meyer posee la siguiente taxonomía:

**Tabla 1**

*Clasificación taxonómica*

<b>Nombre comercial</b>	<b>Limón Meyer</b>
Nombre científico	<i>Citrus*meyeri</i>
Clima	Se desarrolla en climas templados
Tipos de propagación	Se produce por semillas y esquejes
Tipo de planta	Árbol frutal perennifolio
Familia	Rutaceae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Rutales
Género	Citrus
Unidad de medida	Kilogramos o gramos
Magnitud	Peso

## 2.2 COMPOSICIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL *CITRUS LIMON*

Los residuos de frutas que contienen polisacáridos y otros pigmentos naturales se están utilizando como una base prometedora para la síntesis de materiales bioplásticos, que de otro modo podrían ser desechados diariamente. Reconociendo la relevancia de estos desechos, los investigadores han empezado a explorar su uso como fuente confiable para la creación de nuevos biomateriales (Kharb & Saharan, 2024). Los polisacáridos naturales, como el almidón, la celulosa y la pectina, han sido empleados de manera eficiente en el desarrollo de polímeros biodegradables con características destacables, debido a su capacidad estructural de flexibilidad (Kharb & Saharan, 2024).

La caracterización fisicoquímica de los residuos de limón permite evaluar su idoneidad como materia prima para la producción de biopolímeros. Para ello, se consideran parámetros como el índice de madurez, pH, humedad, ceniza, brix, fibra, acidez titulable y principalmente pectina, debido a su influencia directa en la capacidad de estos residuos para formar un polímero biodegradable.

### **2.2.1 Pectina**

La pectina, es una sustancia que se obtiene de las plantas, principalmente de frutos. Está compuesta por una mezcla compleja de polisacáridos estructurales, siendo su componente central el ácido galacturónico, que es uno de los principales elementos que conforman la pared celular de tejidos vegetales parenquimatosos (Toyo-Diaz, M. J. et. al, 2023)

Entre las principales fuentes de producción de esta sustancia se encuentran las cáscaras de cítricos, que constituyen las fuentes comerciales más relevantes, con contenidos de pectina que varían entre el 10-15% y el 20-30% en peso base húmeda y seca, respectivamente, cabe resaltar que por sus componentes plastificantes hace posible la estructuración del biopolímero (Belkheiri et al., 2021).

### **2.2.2 Fibra**

La fibra presente en los residuos de limón (*citrus limon*) está constituida principalmente por celulosa, hemicelulosa y pectina, componentes estructurales de la pared celular vegetal. La celulosa es el componente estructural más importante en la mayoría de las fibras naturales desempeñando un papel fundamental en la formación y estabilidad de matrices poliméricas, actuando como un refuerzo natural que contribuye a mejorar la cohesión y resistencia mecánica del biopolímero (Thakur et al., 2014). El alto contenido de fibra en residuos cítricos favorece su aprovechamiento en el desarrollo de materiales biodegradables, ya que estos polisacáridos son biocompatibles, renovables y fácilmente degradables por acción microbiana, lo que incrementa la tasa de biodegradabilidad del material final (Siracusa et al.,2008).

### **2.2.3 Sólidos solubles**

Los sólidos solubles totales, expresados comúnmente en grados Brix (°Brix), representan la fracción de azúcares solubles, ácidos orgánicos y sales presentes en el residuo de limón. Este parámetro se utiliza ampliamente como indicador de madurez del fruto y de su composición química general (Kader, 2008).

En la elaboración de biopolímeros, los sólidos solubles pueden influir en la plasticidad y rigidez de la matriz polimérica, ya que algunos azúcares actúan como plastificantes secundarios, modificando la movilidad de las cadenas poliméricas. Asimismo, concentraciones elevadas de sólidos solubles pueden incidir en la coloración y estabilidad térmica de las películas obtenidas (Azeredo et al. 2011).

### **2.2.4 Lípidos**

El contenido de lípidos en el limón y sus residuos es relativamente bajo; sin embargo, estos compuestos pueden influir de manera significativa en las propiedades funcionales del biopolímero. Los lípidos tienden a aumentar la hidrofobicidad del material, afectando su permeabilidad del vapor de agua y sus interacciones con ambientes húmedos (Sothornvit, R., & Krochta, J. M. (2005). En sistemas poliméricos basados en almidón y pectina, una baja proporción de lípidos favorece la formación de matrices más homogéneas, permitiendo una mejor interacción entre los polisacáridos y los plastificantes. Por esta razón, el reducido contenido lipídico de los residuos cítricos resulta favorable para la obtención de películas biodegradables uniformes (Rhim et al.,2013).

### **2.2.5 Índice de Madurez (Colorimetría)**

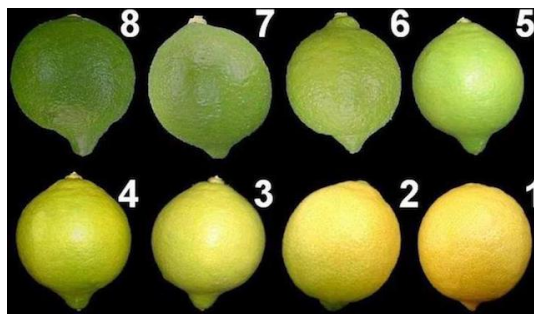
El índice de madurez del limón Meyer se evalúa por diferentes métodos, sin embargo, en la investigación se realizará por el método instrumental de Colorímetro Konica Minolta CR - 400 ideal para inspecciones de color en alimentos, materiales de construcción, plásticos, etc.

Durán (2015, pág.9) menciona que la maduración aceptable para realizar la recolección de frutos en un cultivo es importante para conseguir un producto comercial y de consumo, además es de mucho interés ver la madurez y por ende su color, puesto que, muchos estudios mencionan que a mayor

color de consumo el limón contiene más pectina, a continuación, se muestra el estado de madurez fisiológica del limón según colorimetría del fruto (Figura 2).

**Figura 2.**

*Colorimetría del limón*



Tomado de: (Bertello, 2017)

### **2.2.6 Ceniza**

El contenido de cenizas representa la fabricación mineral total del residuo de limón compuesta principalmente por elementos como calcio, potasio, magnesio y sodio. Este parámetro es un indicador de la riqueza mineral del material vegetal y puede influir en las propiedades fisicoquímicas del biopolímero (AOAC,2019).

Los minerales presentes pueden interactuar con los grupos funcionales de la pectina y el almidón, afectando procesos como la gelificación, reticulación y estabilidad estructural de la matriz polimérica. De manera específica, la presencia de cationes divalentes, como el calcio desempeñan un papel clave en la formación de redes de pectina, al promover la interacción entre cadenas y reforzar la cohesión estructural del biopolímero (Voragen et al., 2009).

### **2.2.7 Acidez titulable**

Este parámetro representa la concentración total de ácidos orgánicos presentes en el residuo de limón, con predominio del ácido cítrico. A diferencia del pH, la acidez titulable contempla las fracciones de ácidos disociados como los no disociados, proporcionando una medida más completa del potencial ácido del material (Nielsen, 2017).

Durante la formación de biopolímeros, la acidez titulable desempeña un papel determinante en la solubilidad de la pectina, en los procesos de gelificación del almidón y en la estabilidad general de la matriz polimérica. Asimismo, la presencia de ácidos orgánicos puede favorecer la actividad antimicrobiana del material obtenido, lo que contribuye a potenciar su funcionalidad como biopolímero activo (Rhim et al., 2013).

### **2.2.8 pH**

Este parámetro es fundamental en la caracterización de los residuos de limón, ya que determina el grado de acidez del sistema y condiciona múltiples reacciones durante el procesamiento. El limón se caracteriza por presentar valores de pH bajos, asociados principalmente a su alto contenido de ácido cítrico (Kader, 2008).

El pH influye directamente en la solubilidad y gelificación de la pectina, la gelificación del almidón y las interacciones entre plastificantes y la matriz polimérica. Un control de pH favorece la formación de películas homogéneas y estables, mientras que valores extremos pueden provocar degradación química o defectos estructurales en las películas obtenidas (Thakur et al., 2014; Voragen et al 2009)

## **2.3 RESIDUOS CÍTRICOS**

El limón, ya sea como fruto o como subproductos derivados de su procesamiento agroindustrial, requieren un tratamiento especial para su disposición final, lo que representa un problema para la industria en esta área.

Diariamente en nuestro país se generan 14.000 toneladas de desechos, lo que representa más de cinco millones de toneladas anuales, de los cuales el 56,20 % corresponde a residuos orgánicos entre cáscaras, pulpas y semillas (MAATE, 2020). La normativa europea, indica que los residuos cítricos presentan un bajo pH, un alto contenido de agua y materia orgánica, lo que impide su eliminación en vertederos y genera gases de efecto invernadero (Santiago et al., 2020).

En el Ecuador, Muñoz Briones et al. (2021) indica que alrededor del 50 % de la fruta es aprovechada y el otro 50 % forma parte de residuos implicando una generación de desechos de 71

mil toneladas. Actualmente, gran parte de estos residuos se han utilizado para diversos fines como abono y generación de materia prima para balanceado de animales, aunque no todos los residuos son procesados a estas áreas, ya que contienen compuestos bioactivos y ácidos que podrían dañar al sistema digestivo de los animales y al suelo (Kharb & Saharan, 2024).

Por otro lado, estos residuos disponen compuestos bioactivos, como flavonoides y ácidos orgánicos, que pueden aprovecharse en la elaboración de biopolímeros, así como contrarrestando a la contaminación y agregando valor a productos alimenticios.

## **2.4 POLÍMEROS**

Los polímeros sintéticos constituyen materiales de amplio uso en la sociedad moderna, con presencia en numerosos ámbitos de la actividad humana. Su origen petroquímico ha permitido el desarrollo de productos indispensables para satisfacer diversas necesidades, que incluyen la fabricación de textiles, envases y estructuras habitacionales, así como su aplicación en sectores estratégicos como el transporte y la agricultura. Asimismo, estos materiales resultan fundamentales en áreas de alta especialización, tales como la industria farmacéutica, los sistemas de diagnóstico y el desarrollo de tecnología electrónica (Kharb & Saharan, 2024).

El uso extendido de plásticos convencionales ha generado una problemática ambiental de alcance global, asociada principalmente a su dependencia de recursos fósiles no renovables y a su limitada capacidad de biodegradación (Kharb & Saharan, 2024). Su resistencia a la degradación biológica y ambiental favorece su persistencia en el entorno, lo que contribuye a la acumulación de micro plásticos. Esta contaminación impacta gravemente en los ecosistemas y supone un riesgo significativo para la vida silvestre y la salud humana.

Se estima que más de 260 millones de toneladas de plástico se producen anualmente, representando el 8% de la producción mundial de petróleo, es por ello que la ONU estima que aproximadamente cada 2.6 kilómetros cuadrados de océano hay 46.000 piezas de plástico de varios tamaños, de las cuales una fracción significativa termina en ecosistemas terrestres y acuáticos, por lo que una cantidad de basura marina que ingresa a las aguas se ha estimado entre 6 y 8 toneladas anuales, estos desechos sometidos a la intemperie y los rayos UV causan su fragmentación en partículas, originando a lo que se ha denominado micro plásticos. Investigaciones han mostrado que la

abundancia y persistencia de los plásticos conducen a riesgos para la salud del ser humano debido a la exposición a sustancias químicas, que bien están presentes en la composición o han sido absorbidos en el medio marino (Figura3).

### ***Figura 3.***

*Video del buceador Rich Horner en la isla hondureña de Roatán hasta Bali, en concreto hasta Manta Point.*



En el afán de contrarrestar la producción de plásticos convencionales se han realizado varias investigaciones y según Venkataraman et al. (2024) manifiesta que si es posible realizar un bioplástico, a pesar de que generalmente se derivan de recursos como el maíz, azúcares y patatas; los cítricos son viables para la producción de este polímero ya que, posee celulosa y pectina, que aproveche los desechos orgánicos para ser una alternativa viable y sostenible; teniendo en cuenta los rangos de las propiedades tanto densidad la cual oscila entre 0,12 a 0,20  $g/cm^3$ , resistencia a la tracción de 9,94 a 25,60 MPa y espesor de 0,25 a 0,74mm.

## **2.5 POLÍMERO BIODEGRADABLE**

Los polímeros ecológicos y sostenibles, conocidos como biopolímeros, se obtienen principalmente a partir de biomasa vegetal, la cual proporciona compuestos naturales esenciales para su síntesis. Entre estos componentes destacan los polisacáridos, como la pectina, celulosa, hemicelulosa, almidón, lignina y lípidos, como los aceites vegetales (Kharb & Saharan, 2024).

Actualmente, la investigación en biopolímeros está cobrando mayor relevancia mediante el uso de recursos renovables, como residuos vegetales y subproductos agrícolas, para su producción (Kharb & Saharan, 2024).

González-Torres et al. (2021) indican que, las partículas biodegradables desempeñan un papel crucial en el ciclo natural de descomposición, contribuyendo significativamente a la sostenibilidad ambiental.

En la mejora funcional de los polímeros, se han investigado diversas combinaciones de plastificantes, como el glicerol y el sorbitol, incrementan la flexibilidad de las partículas al debilitar los enlaces de hidrógeno en las cadenas poliméricas. Este proceso amplía el espacio molecular, optimizando tanto la apariencia visual como la versatilidad en las propiedades mecánicas. Además, influye en las propiedades de barrera contra gases y humedad, en función de las interacciones entre los componentes dentro de las estructuras biodegradables.

De acuerdo con Alcaide et al. (2020) los biopolímeros constituyen una alternativa viable frente a los polímeros convencionales y favorecen el desarrollo de nuevos con enfoque sostenible. Su aplicación ha despertado interés en diversos sectores productivos, especialmente en la agricultura, donde se utilizan como sustitutos de películas plásticas aportando beneficios como la reducción del crecimiento de malezas y la conservación de la humedad del suelo. Asimismo, en el ámbito médico se han incorporado en procedimientos como la odontología, donde se emplean como materiales de relleno tras extracciones dentales, contribuyendo a una recuperación más eficiente.

Por otro lado, estudios de Kharb & Saharan, (2023) , Santos et, al. (2023), Jara Ramírez et al. (2023) & Patel et al. (2023), indican que los biopolímeros han surgido como una alternativa sostenible a los plásticos tradicionales, siendo una de las estrategias más interesantes dentro de la comunidad investigadora y científica puesto que, estos materiales pueden elaborarse a partir de fuentes renovables, como almidón, celulosa, ácido poliláctico, pectina y polihidroxialcanoatos, dando resultados satisfactorios a nivel de laboratorio.

## 2.6 PLASTIFICANTES Y RIGIDIZANTES EN BIOPOLÍMERO

Se utilizaron glicerol y sorbitol como plastificantes en la elaboración de estas películas bioplásticas. Se ha destacado la interacción de estas películas con agua y alcohol para evaluar el efecto de los plastificantes. Las películas que contienen glicerol presentan mayores valores de contenido de humedad (13,29 – 19,28%), solubilidad en agua (51,01 – 58,56%) superando a biopolímeros elaborados con sorbitol. El contenido de humedad más alto registrado es de  $19,28 \pm 3,34\%$  para las películas de biopolímero hechas a partir de cáscara de plátano, las cuales también muestran una menor solubilidad tanto en agua ( $51,01 \pm 5,11\%$ ) como en alcohol ( $44,09 \pm 3,72\%$ ) en comparación con otras películas. En general, se observa que las películas bioplásticas con glicerol tienen una mayor capacidad de absorción de agua que aquellas que contienen sorbitol (Kharb & Saharan, 2024).

Patel et al. (2023) indican que las concentraciones en las que trabajó en su investigación con concentraciones de plastificantes de 0%, 10%, 20%, y 30%, junto con una mezcla de glicerol y sorbitol en proporciones de 2:1, 1:2 y 1:1 (% en peso), aplicando la técnica de fundición en solución. Para evaluar las propiedades morfológicas, estructurales y químicas de las películas de bioplástico, se emplearon diversas técnicas de caracterización. La espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier y las mediciones morfológicas confirmaron la formación de bioplásticos a partir de almidón. Las biopelículas que contenían la mezcla de glicerol y sorbitol como plastificante mostraron una mayor estabilidad térmica y resistencia a la tracción en comparación con aquellas que solo utilizaban glicerol. Además, se observó que las películas con la mezcla de plastificantes presentaban una morfología más compatible que aquellas solo con glicerol. Los resultados sugieren que las muestras de bioplástico sintetizadas tienen un gran potencial para ser utilizadas en diversas aplicaciones, particularmente en materiales de envasado.

### 2.6.1 Glicerol

Es uno de los plastificantes más utilizados en la elaboración de biopolímeros a base de polisacáridos, debido a su alta afinidad por el agua y su capacidad para establecer puentes de hidrógeno con grupos hidroxilo presentes en el almidón y la pectina. Su incorporación en la matriz

polimérica reduce las fuerzas intermoleculares entre las cadenas, incrementando la flexibilidad, elongación y manejabilidad de las películas obtenidas (Sothornvit,2005)

La concentración de glicerol provoca una disminución del modelo elástico y de la resistencia a la tracción, mientras incrementa la movilidad molecular y solubilidad en agua del biopolímero, efecto directamente relacionado con su carácter hidrofílico (Basiak et al., 2018). En sistemas almidón-pectina, el glicerol favorece la formación de películas continuas y homogéneas, evitando la fragilidad típica de matrices no plastificadas (Thakur et al., 2014).

### **2.6.2 Ácido acético**

Es un ácido orgánico débil que se emplea comúnmente como regulador de pH en la elaboración de biopolímeros a base de almidón, mejorar la dispersión de los componentes y estabilizar la mezcla polimérica durante el proceso térmico (Nielsen, 2017). Adicionalmente, favorece la ruptura parcial de las interacciones lo que facilita la compatibilidad entre los plastificantes y la matriz polimérica. En determinados sistemas, se ha documentado que puede ejercer una actividad antimicrobiana de intensidad moderada, lo que contribuye a potenciar la funcionalidad del biopolímero (Rhim et al., 2013).

### **2.6.3 Sorbitol**

Se trata de un alcohol de azúcar utilizado de forma frecuente como plastificante alternativo al glicerol en biopolímeros, el cual se caracteriza por presentar un mayor peso molecular, lo que genera películas con mayor rigidez y estabilidad dimensional. Su uso resulta especialmente útil cuando se busca un equilibrio entre flexibilidad y resistencia estructura en películas biodegradables destinadas aplicaciones de empaque (Sothornviit & Krochta,2005).

### **2.6.4 Ácido cítrico**

Es un ácido tricarboxílico naturalmente presente en los cítricos y ampliamente utilizado en la formulación de biopolímeros debido a su doble función como agente acidificante y agente reticulante. En matrices polisacáridicas, el ácido cítrico puede formar enlaces éster con grupos

hidroxilo del almidón y la pectina, contribuyendo a una mayor cohesión estructural del material (Reddy & Yang, 2010).

Su incorporación ha sido asociada con mejoras en la resistencia mecánica, disminución de la solubilidad en agua y aumento de la estabilidad térmica del biopolímero. Asimismo, el ácido cítrico presenta reconocidas propiedades antimicrobianas, lo que resulta relevante en el desarrollo de materiales biodegradables con funcionalidad activa (Voragen et al., 2009; Thakur et al, 2014).

## **2.7 PROPIEDADES MECÁNICAS**

El potencial de los bioplásticos ha sido ampliamente investigado mediante el análisis de su composición, funcionalidades y características morfológicas, así como sus propiedades mecánicas, contenido de humedad, solubilidad en agua, NaOH, biodegradabilidad y actividad antibacteriana. Diversos estudios han mostrado que las películas bioplásticas poseen cualidades como alta eficiencia energética y biodegradabilidad, lo que las posiciona como alternativas viables a los polímeros tradicionales. Además, la posible actividad antibacteriana de estos materiales sugiere su aplicación en el envasado de alimentos, proporcionando una barrera adicional contra el desarrollo de microorganismos y mejorando su conservación (Kharb & Saharan, 2024).

Por otro lado, la resistencia a la tracción y la elongación son clave para evaluar su durabilidad, mientras que su biodegradabilidad, es decir, su capacidad de descomponerse en condiciones ambientales resulta esencial para su aceptación en el mercado, para ello se realizará pruebas de: Tracción, impacto, biodegradabilidad, antibacteriano y fúngico.

### **2.7.1 Tracción**

Las propiedades de tracción son la principal medida de la resistencia de un material. La fuerza requerida para estirar la probeta se calcula junto con el alargamiento hasta el punto de ruptura. El módulo elástico representa la relación entre el esfuerzo y la deformación por debajo del límite proporcional del material. Este valor es crucial en las pruebas de tracción, ya que las piezas deben diseñarse para que los esfuerzos no superen este límite (Mexpolimeros, 2024).

Un ensayo de tracción es una prueba mecánica esencial en la que se somete una muestra, previamente preparada, a una carga controlada, midiendo el alargamiento de la muestra en relación con el peso aplicado.

### **2.7.2 Impacto**

Un péndulo de impacto está conformado por componentes que cumplen funciones específicas y deben satisfacer los requisitos establecidos por la norma ASTM D256. Estas características son fundamentales para asegurar el funcionamiento aceptable del equipo y validar los ensayos a realizar. El polímero biodegradable estará colocado y fijado adecuadamente, mientras un péndulo, previamente elevado a una altura determinada, será liberado para golpear la muestra en un punto definido. El dispositivo medirá la energía absorbida por el material durante el impacto, lo que permitirá evaluar su resistencia al impacto mediante este método (Betun Mayanza, D. F., & Paguay Paguay, R. O. 2023).

### **2.7.3 Biodegradabilidad**

La capacidad de las sustancias y materiales orgánicos para descomponerse en compuestos más simples, gracias a la acción enzimática de microorganismos (Biodegradabilidad Y Compostabilidad – Ecozema, 2020).

La biodegradabilidad realiza el proceso de su descomposición en condiciones naturales, reduciendo la contaminación. Por otro lado, la reducción de huella de carbono genera menos emisiones de gases de efecto invernadero, contrarrestando el impacto en la salud pública, esto lleva al uso de recursos renovables y agroindustriales que favorecen la economía circular al emplear residuos agroindustriales como por ejemplo la cáscara para obtener aceites esenciales.

Para la prueba de biodegradabilidad, se realizará por un método modificado de Patel et al., (2023) donde menciona que la descomposición de las muestras de bioplástico se determina mediante la prueba de degradación por enterramiento en el suelo con tierra de jardín al 50 % de humedad, sosteniendo que es un % aceptable para el trabajo microbiano de descomposición.

Patel et al., (2023) en su estudio indica que los resultados en pruebas tanto mecánicas y biodegradable con estos métodos han sido satisfactorios, dado que en varias investigaciones se está explorando el uso de residuos agroindustriales, incluyendo cáscaras de cítricos, como materia prima para la producción de bioplásticos, destacando su bajo costo y ajustándose con el objetivo 11 de la agenda 2030 el cual menciona ciudades y comunidades sostenibles.

#### **2.7.4 Solubilidad**

La solubilidad en agua de una película biodegradable se define como la fracción del material que se disuelve al estar en contacto con agua durante un tiempo determinado. En películas basadas en polisacáridos (almidón, pectina, celulosa) esta propiedad es un indicador funcional clave porque refleja la afinidad del material por el agua, su integridad estructural en ambientes húmedos y su potencial aplicación en empaques o recubrimientos (Pérez-Vergara et al., 2020).

Esta propiedad está fuertemente condicionada por la naturaleza hidrofílica de la matriz polisacárido y por la formulación. En particular, el uso de plastificantes como el glicerol incrementa la movilidad de las cadenas poliméricas y facilita la interacción con el agua; por ello se ha reportado que mayores concentraciones de glicerol pueden aumentar la solubilidad de películas de almidón al debilitar parcialmente las interacciones intermoleculares de la red polimérica (Basiak et al., 2018).

#### **2.7.5 Antibacteriano y Antifúngico**

La actividad antibacteriana y antifúngica en los polímeros biodegradables se refiere a su capacidad para resistir la acción de microorganismos patógenos que pueden infiltrarse en su estructura y deteriorarla. Estos patógenos incluyen tanto hongos como bacterias, cuyas características celulares les permiten afectar negativamente diversos materiales orgánicos. Los hongos, por ser organismos eucariotas con estructuras celulares complejas y núcleo definido, pueden inducir daños similares a los que causan en cultivos, como el mildiu o la roya. Por su parte, las bacterias, que son procariotas con células más simples y sin núcleo definido, también representan una amenaza, ya

que pueden generar manchas, pudriciones blandas y canchales, siendo especialmente destructivas en especies vegetales como el tomate y los cítricos (SEO, 2024).

Patel et al. (2023) reportaron que las películas de bioplásticas presentan una actividad antibacteriana significativa frente a diferentes cepas bacterianas, lo que respalda su potencial aplicación en sistemas de envasado de alimentos.

La presente investigación, orientada a la obtención de un polímero biodegradable a partir de residuos de limón, contribuye a la sostenibilidad ambiental y a la valorización de subproductos agroindustriales. Mediante el análisis de las características fisicoquímicas, la evaluación del proceso de elaboración y la determinación de las propiedades del biopolímero, se plantea un enfoque integral para el desarrollo de materiales innovadores con criterios de sostenibilidad.

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Este capítulo detalla los materiales, insumos y procedimientos empleados en la obtención del polímero biodegradable a partir de residuos de *Citrus limon*. Se detallan los reactivos y sustancias auxiliares utilizados, así como los métodos aplicados para la caracterización fisicoquímica de los residuos, el proceso de elaboración del polímero y la evaluación de sus propiedades mecánicas, microbiológicas y de biodegradabilidad. La descripción metodológica desarrollada constituye la base técnica que garantiza la validez y reproducibilidad de los resultados obtenidos en la investigación.

##### 3.1.1 Enfoque

La investigación se realizó bajo un enfoque cuantitativo de tipo explicativo, acorde con su diseño experimental, basado en la recolección y el análisis de datos numéricos para la comprobación de la hipótesis planteada. Para ello, se aplicaron métodos científicos que permitieron evaluar de manera objetiva las propiedades del polímero obtenido mediante ensayos fisicoquímicos, microbiológicos, mecánicos y biodegradables. Este enfoque facilitó el análisis de las relaciones entre las variables estudiadas y la verificación de la viabilidad de los residuos de limón como materia prima para la obtención de un material biodegradable con propiedades funcionales.

El estudio presenta un alcance exploratorio, al centrarse en la caracterización de las propiedades de tracción e impacto, la biodegradabilidad y la evaluación de la actividad antimicrobiana y antifúngica del biopolímero.

### **3.1.2 Diseño experimental**

Esta investigación posee un diseño experimental que se llevó a cabo en el laboratorio de Análisis Físico Químico y Microbiológico del campus San Vicente de Paúl perteneciente a la Universidad Técnica Del Norte. La fase de experimentación fue fundamental para el desarrollo del estudio, ya que permitió aplicar técnicas específicas y recolectar datos precisos que respaldan los objetivos planteados. Las condiciones controladas del laboratorio garantizaron la fiabilidad de los resultados obtenidos durante este proceso.

### **3.2 Caracterización del Área de Estudio**

La materia prima utilizada (*Citrus limon*) se obtuvo de la granja experimental Yuyucocha ubicada en Av. Capitán Espinoza de los Monteros perteneciente al cantón San Miguel de Ibarra entre la parroquia San Francisco y Caranqui. Esta granja se encuentra en las coordenadas de latitud N: 00°-21'-53, latitud W :78°-06'-32" y su altitud de 2228 msnm con temperatura máxima de 18,4°C, precipitaciones de 589,3mm y una humedad relativa en meses secos de 73,9% (Guest, 2022).

El proceso de elaboración del biopolímero en base a la cáscara de limón, los análisis fisicoquímicos, microbiológicos se realizaron en el laboratorio de Análisis Físicoquímico y Microbiológico del campus San Vicente, mientras que las pruebas mecánicas se realizaron en el laboratorio de física en el campus El Olivo. Y la experimentación de biodegradabilidad se la realizó en casa con aptitudes controladas.

#### **3.2.1 Análisis de las Características Fisicoquímicas de Residuos de Limón**

Para el desarrollo de este objetivo se realizó la recepción de los residuos de limón y se clasificó según la colorimetría basado en la normativa ASTM D2244 que se basa en el uso de un Colorímetro Konica Minolta CR- 400 con un iluminante D65 y 10°, ideal para inspección de color en alimentos.

Luego se analizó características fisicoquímicas de los residuos del limón en el laboratorio de Análisis Físicoquímico y Microbiológico del Campus San Vicente de Paúl donde se determinó:

pH, sólidos solubles, acidez titulable, humedad, fibra, lípidos, ceniza y fibra. Los métodos que se usó para cada análisis se encuentran en la Tabla 3.1.

**Tabla 2**

*Parámetros y métodos*

<b>Parámetro</b>	<b>Método</b>	<b>Lugar a realizarse</b>
Color	ASTM D2244	
pH	Método AOAC 981.12	Laboratorios de Análisis Físicoquímico y Microbiológico de la Universidad Técnica del Norte, campus San Vicente
Acidez Titulable	Norma NTE INEN-ISO 750:2013	
Fibra	NTE INEN 522-2012	
Lípidos	NTE INEN 541	
°Brix	NTE INEN 337:2008	
Humedad	Método secado AOAC 925.45	
Ceniza	NTE INEN520:2012	
Pectina	Método modificado de Kharb & Saharan, (2023) y Santos et, al. (2023)	

A continuación, se detalla el proceso que se realizó en cada análisis.

**Determinación de color**

**Figura 4.**

*Sistema CIELab*



Para analizar el color se empleó la normativa ASTM D2244 que se basa en el uso de un Colorímetro Konica Minolta CR - 400 con un iluminante D65 y 10° del observador, utilizando el espacio de color  $L^*a^*b^*$ , se determinó los parámetros de luminosidad ( $L^*$ ), tonalidad de rojo a verde ( $a^*$ ), tonalidad de amarillo a azul ( $b^*$ ). Posteriormente, mediante las ecuaciones (1) (2) y (3) se calcularán los parámetros de ángulo de tono ( $Hab$ ), pureza de color o croma ( $C^*$ ) y diferencia total de color ( $\Delta E$ ), respectivamente (Álvaro Aedo San Martín, 2021).

**Angulo de tono ( $Hab$ )**  $Hab = \tan^{-1} \left( \frac{b}{a} \right) * \frac{180}{\pi}$  (1)

**Croma o pureza de color ( $C^*$ )**  $C = \sqrt{(a)^2 + (b)^2}$  (2)

**Diferencia total de color ( $\Delta E$ )**  $\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$  (3)

### Determinación del pH

**Figura 5.**

Potenciómetro GMH 3500



La determinación del pH en la cáscara se llevó a cabo mediante el método potenciométrico GMH 3500, el cual mide con precisión las concentraciones de iones de hidrógeno. Para este procedimiento, se preparó una suspensión compuesta por 250 ml de agua destilada y 20 gramos de muestra en un vaso de precipitación. La mezcla se dejó reposar y posteriormente se realizó la medida del pH utilizando un potenciómetro previamente calibrado. De acuerdo con Kharb y

Saharan (2024), un pH comprendido entre 1,5 a 3 favorece una extracción eficiente de pectina sin comprometer el rendimiento del proceso; valores fuera de este intervalo pueden afectar negativamente la obtención del biopolímero, haciendo necesario el ajuste mediante la adición del ácido cítrico.

El control del pH resulta determinante en la producción de bioplásticos, ya que influyen directamente en las propiedades químicas de componentes estructurales como la celulosa, la hemicelulosa y las pectinas. Valores inferiores a 1,5 puede inducir la desnaturalización de las pectinas, limitando su capacidad de formar estructuras estables, mientras que pH superior a 3 pueden reducir la elasticidad, la resistencia a la tracción y estabilidad térmica del material final, debido a una menor reactividad de los componentes en condiciones menos ácidas(Kharb & Saharan, 2024).

### **Determinación acidez titulable**

El método volumétrico se realizó según la Norma NTE INEN-ISO 750:2013<sub>2</sub> para la determinación de acidez titulable en productos vegetales y frutícolas, la titulación con la solución estándar de hidróxido de sodio al 0,1 N y en presencia del indicador fenolftaleína, se ingresó el valor obtenido de la titulación en la ecuación 4 para obtener el resultado final y verificar si es la acidez indicada, no se encontró rangos en las investigaciones revisadas.

$$AT = \frac{V_{NaOH} * N * meq * VT}{PM * VA} \quad (4)$$

#### **Donde**

**AT:** acidez titulable

**VNaOH:** Volumen de NaOH consumido en la titulación (ml).

**meq:** miliequivalente de ácido cítrico (0.064).

**N:** normalidad del NaOH.

**VT:** Volumen total de aforo (ml).

**PM:** peso de la muestra (g).

**VA:** volumen de la alícuota(ml).

## Determinación de fibra

*Figura 6*

FIBERTEST



Se empleó la determinación de fibra mediante el método NTE INEN 522-2012 de fibra cruda, para establecer el porcentaje de fibra en los residuos, ya que, según la bibliografía, se recomienda que este contenido se encuentre en el rango de 20-30 %. Este rango es crucial para la elaboración del biopolímero, ya que un contenido bajo de fibra podría comprometer la resistencia mecánica del material, haciendo que el producto final sea más frágil, susceptible a la deformación y menos resistente al desgaste. Por el contrario, un exceso de fibra puede generar una mezcla con mayor viscosidad durante el proceso de fabricación, lo que resultaría en una estructura más quebradiza y rígida. En este caso, la celulosa no se integraría adecuadamente con la matriz polimérica, lo que afectaría la cohesión y flexibilidad del biopolímero, generando un material con propiedades mecánicas deficientes, una vez realizado el proceso de fibra (Anexo 1) los datos ingresan a la ecuación 5.

$$FDA\% = \frac{\text{Residuo seco-ceniza}}{\text{Peso inicial de la muestra}} \times 100 \quad (5)$$

## Determinación de lípidos

Para la determinación del contenido graso presente en la cascara de limón, se empleó el método Soxhlet, un procedimiento de extracción sólido-líquido reconocido por su eficiencia y reproductibilidad. Este método se desarrolló conforme a los lineamientos establecidos en la NTE INEN 541 la cual regula los procedimientos para análisis de grasas y aceites en productos

agroindustriales. El proceso consistió en someter la muestra de tres gramos previamente secada y homogenizada a una extracción continua mediante un solvente orgánico donde se utilizó 45 ml de éter de petróleo a una temperatura de 110°C por 15 minutos en inmersión luego abrir llaves y el dedal posición arriba mantener temperatura 30 minutos, a continuación, cerrar las llaves 35 minutos para recuperación del solvente. Este mecanismo cerrado garantiza una extracción exhaustiva del contenido graso, minimiza pérdidas por volatilización y asegura una cuantificación precisa de los lípidos presentes, luego llevar los casos a la estufa por 30 minutos a una temperatura de 105°C, pasado ese tiempo dejar en el desecador 10 minutos y pesar, finalmente ingresar los datos en la ecuación (6).

$$\%Lípidos = \frac{W_2 - W_1}{W_0} * 100 \quad (6)$$

**Donde**

W0: peso de la muestra seca (gramos)

W1: Peso del caso vacío (gramos)

W2: Peso del matraz + extracto lipídico (gramos)

**Determinación de °Brix**

*Figura 7.*

Refractómetro- Reichert Abbe Mark III



La determinación de los sólidos solubles (°Brix) se efectuó conforme a la norma NTE INEN 337:2008, mediante el uso de un refractómetro digital aplicando a una muestra representativa. De

acuerdo con la literatura especializada, el rango eficiente se sitúa entre 5 y 10, intervalo que permite una estimación adecuada del contenido total de sólidos solubles presentes en el material.

Valores inferiores a este rango pueden afectar la capacidad del material para desarrollar una estructura adecuada, influyendo negativamente en su flexibilidad y desempeño durante el proceso de la elaboración. En contraste, concentraciones superiores pueden incrementar la viscosidad de la mezcla favoreciendo la retención excesiva de humedad y comprometiendo la calidad de producto final. Por esta razón, la medición precisa de los °Brix resulta determinante para asegurar la confiabilidad de los resultados y la integridad de los datos obtenidos.

### **Determinación de humedad**

Se utilizó el método de secado AOAC 925.45 como guía para la determinación de humedad; se lo realizó como paso previo al uso de residuos para el proceso de elaboración de bioplástico; el rango de 8-12%, ya que, de acuerdo con Kharb & Saharan, (2024) hace referencia que si una humedad bajo de 8 tiene dificultades al procesarse, interfiriendo en dispersión de flexibilidad y superior a 12 menor resistencia mecánica y rápida descomposición microbiológica. El proceso se basa en pesar 2g de la muestra, colocar en crisoles, luego se dejó en la estufa a una temperatura de 110°C por 8 horas y colocar al desecador, la humedad de la cascará para proceso debe estar en un rango de 8-12%, siempre pesar la muestra al principio y al final para ingresar datos en la ecuación 7.

$$Humedad\% = \left( \frac{Peso\ inicial - Peso\ final}{Peso\ inicial} \right) * 100 \quad (7)$$

### **Determinación de ceniza**

Se usó el método NTE INEN 520:2012 que incinera la muestra previamente pesada a una temperatura de 550°C por 2 horas, posteriormente se coloca en un desecador por aproximadamente 30 minutos. Si la muestra ha tomado una coloración gris, se pesa. Se repite el proceso hasta obtener un peso constante que no varíe en  $\pm 0,2\text{mg}$  e ingresar a la ecuación 4. Según Marichelvam et al., (2022) indica que un porcentaje del 0.22- 0.25% es un rango adecuado puesto que proporciona una concentración equilibrada de minerales necesarios para la formación de enlaces durante la

polimerización, si el contenido es bajo el bioplástico podría carecer de rigidez y un alto material quebradizo y reducción de flexibilidad. Con los datos obtenidos del proceso se ingresará a la ecuación 8.

$$Ceniza\% = \left( \frac{\text{Peso de la ceniza}}{\text{Peso inicial de la muestra}} \right) * 100 \quad (8)$$

### **Determinación de pectina**

Se utilizó un método modificado de Kharb & Saharan, (2023) y Santos et, al (2023) en el cual mencionan que la pectina es un biopolímero estructurante, el cual proporciona una matriz polimérica que puede ser moldeada en materiales con propiedades plásticas. La pectina según la bibliografía revisada indica que está en un rango de 1-3% del peso total. Entonces se tomarán las cáscaras frescas en una proporción de 1 a 10 en agua si las cáscaras estuvieran secas la proporción debería ser 1-15 o 20. Para este proceso se colocaron 20g de cáscara picada entre 0.5- 1 cm, sin pulpa, luego se ajustó el pH a 2 y se calentó, manteniendo la temperatura entre 80-90 °C por 90 minutos. Se filtró para retirar los restos de cáscaras y el filtrado se añadió alcohol frío en una proporción de 1.5 o 2 - 1 de alcohol y mezcla, para precipitar la pectina, la cual se filtró en un papel previamente pesado, que luego se secó y se pesó nuevamente. Para obtener el porcentaje de pectina se ingresó los datos e la ecuación 9.

$$Pectina\% = \left( \frac{\text{Peso papel+pectina} - (\text{Peso papel})}{\text{Peso muestra}} \right) * 100 \quad (9)$$

### **3.2.2 Elaboración de un polímero biodegradable a partir de residuos de limón.**

Para la ejecución de este objetivo, se usó el diseño factorial fraccionario de  $3^{4-2}$  donde los factores a evaluar fueron:

#### **✓ Factores y niveles de estudio**

#### **Plastificantes**

#### **A: Glicerol**

**A1:** 0%

**A2:** 15%

**A3:** 30%

**B: Ácido acético**

**B1:**0.5%

**B2:**1%

**B3:** 1.5%

**Rigidizantes**

**C: Sorbitol**

**C1:** 0 %

**C2:** 10%

**C3:** 20%

**D: Ácido cítrico**

**D1:** 0.5%

**D2:** 1%

**D3:** 1.5%

Los factores fueron considerados, tomando en cuenta estudios previos (con el uso de otra materia prima) como es el caso de Patel et al. (2023), Kharb & Saharan, (2023) , Santos et al. (2023) y Jara Ramírez et al. (2023), donde las investigaciones concuerdan en que tuvieron como mejores resultados el uso de plastificantes y rigidizantes en las concentraciones antes descritas.

Una vez instaurados los factores de estudio con sus diferentes niveles se procedió a determinar los parámetros constantes, basándose en las investigaciones de Patel et al. (2023), Kharb & Saharan, (2023) y Santos et al. (2023), donde indica que las variables mostradas en la tabla 3 deben mantenerse constantes para evitar daños en las películas o alteración química, en el proceso de producción del biopolímero.

**Tabla 3**

Factores de estudio constantes

<b>Factores</b>	<b>Parámetro</b>
Almidón	10%
Residuo de limón (solución rica en pectina)	4.2%
Temperatura Cocción (°C)	90°C
Tiempo de cocción (min)	180 minutos
Temperatura de secado (°C)	55°C
Tiempo de secado (min)	24 horas

### **Tratamientos**

De la combinación de los factores y niveles de estudio se obtendrá 9 tratamientos como se detalla en la Tabla 4.

**Tabla 4**

*Codificación de los tratamientos*

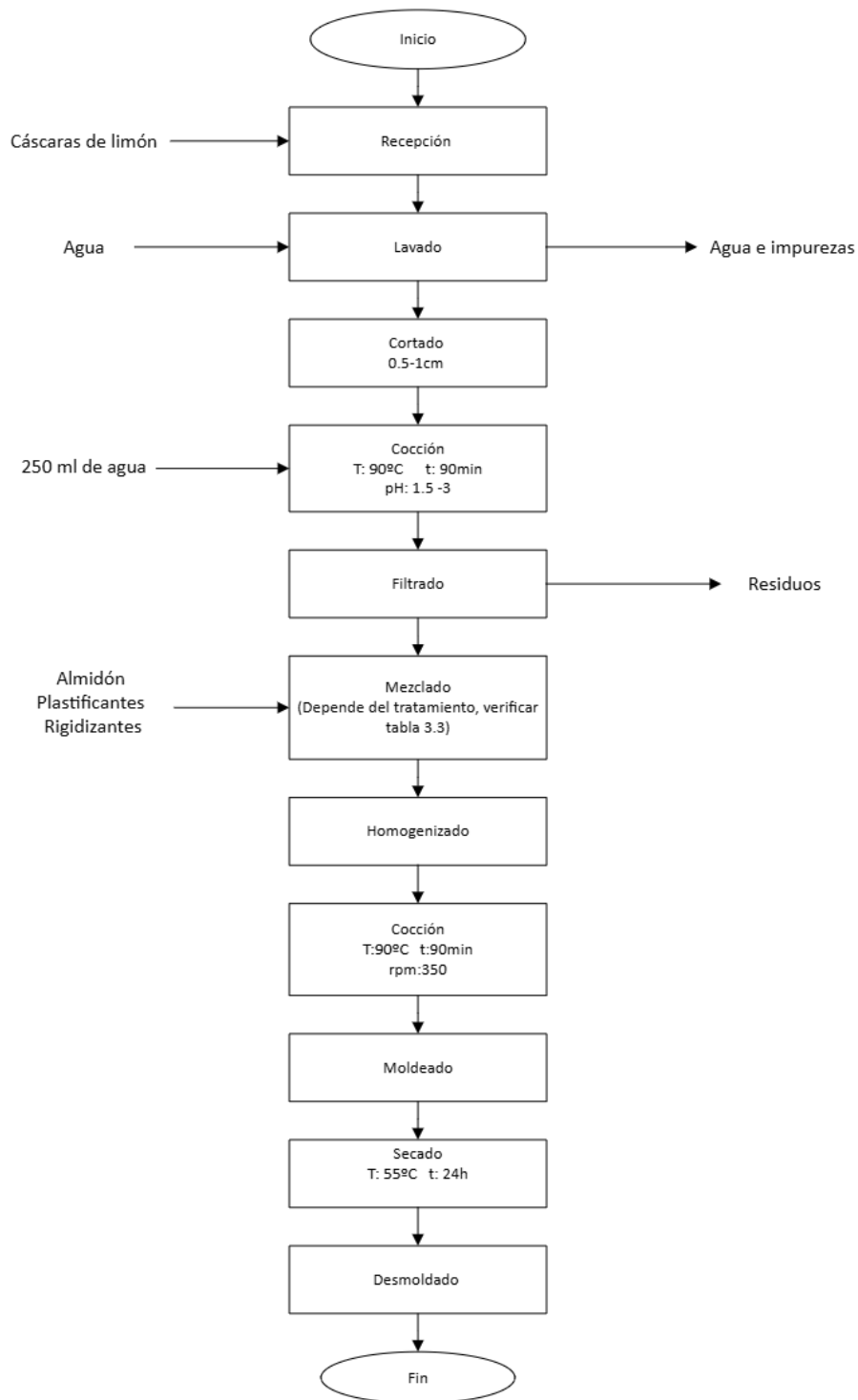
<b>Tratamiento</b>	<b>Nomenclatura</b>
<b>T1</b>	A1C3D1B3
<b>T2</b>	A1C3D2B2
<b>T3</b>	A1C3D3B1
<b>T4</b>	A2C2D1B3
<b>T5</b>	A2C2D2B2
<b>T6</b>	A2C2D3B1
<b>T7</b>	A3C1D1B3
<b>T8</b>	A3C1D2B2
<b>T9</b>	A3C1D3B1

La bibliografía antes descrita menciona que es recomendable una muestra de un kilo de materia prima por lo que se usó dicho tamaño para la unidad experimental.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo del proceso que se siguió en la elaboración del biopolímero como se muestra en la figura 8.

## Diagrama de flujo del proceso

**Figura 8**



*Diagrama de bloques para la obtención de bioplástico de cáscara de limón.*

### **Descripción del proceso.**

**Recepción:** las cáscaras limón fueron recibidas y sometidas a una clasificación colorimétrica, empleando un colorímetro Konica Minolta CR- 400. Esta clasificación asegurará un residuo en buen estado.

**Lavado:** se realizó un lavado con agua potable, con el fin de eliminar impurezas.

**Cortado:** Se cortaron las cáscaras en trozos de (0.5 cm ancho-1cm largo) para facilitar su manipulación durante el proceso.

**Cocción:** En un matraz Erlenmeyer, se colocó 20g de cáscaras en 250 ml de agua potable. Y se realizó la cocción a una temperatura constante de 90°C durante 90 minutos, con agitación continua para asegurar una extracción homogénea. El pH de la mezcla se midió para asegurar que se encuentre entre 1.5 a 3; si no era el caso se ajustó con ácido cítrico en concentraciones de 0.5% a 1% del volumen total de la mezcla (peso/volumen). En caso de que el pH sea inferior a 1.5, se debe proceder con la adición gradual de una solución de NaOH 0.01N, gota a gota, mientras se monitorea el pH utilizando un potenciómetro hasta alcanzar el valor requerido.

**Filtrado:** con ayuda de un colador, se filtró la solución que estuvo en cocción.

**Mezclado:** en un matraz Erlenmeyer de 500ml se colocaron: el glicerol, sorbitol, solución rica en pectina, almidón, ácido cítrico y ácido acético, según el tratamiento asignado (Tabla 3.3). En este punto, las proporciones fueron exactamente medidas para garantizar que sean homogéneas, según el diseño experimental.

**Homogenizado:** con una varilla de vidrio se removió hasta que tome una consistencia uniforme y sin presencia de grumos.

**Cocción:** Se colocó el matraz Erlenmeyer con la mezcla en un agitador magnético a una temperatura de 90°C durante 90 minutos, con una agitación constante de 350 rpm, consiguiendo una mezcla uniforme y espesa, de aspecto gelatinoso.

**Moldeado:** Las mezclas de cada tratamiento, fueron vertidas en cajas Petri de 60 x 15 mm, distribuidas de manera uniforme por toda la superficie hasta alcanzar un espesor de 2mm. Las cajas fueron previamente untadas con aceite de silicón y una fina capa de talco, para evitar que las películas se peguen. Cada tratamiento contó con al menos tres repeticiones.

**Secado:** las cajas se colocaron en la estufa a 55 °C durante 24 horas para eliminar humedad y garantizar una película sólida y uniforme, posteriormente se enfriaron a temperatura ambiente por 1 hora.

**Desmoldeado:** con la ayuda de una espátula, las películas de bioplástico fueron desprendidas y almacenadas en papel Kraft para las pruebas de comportamiento posteriores.

### **3.2.3 Determinación de la Propiedades Mecánicas, Microbiológicas y Biodegradables del Polímero**

Se determinaron las propiedades más importantes que permitieron verificar la calidad del bioplástico, estas son: mecánicas, microbiológicas y biodegradables.

#### **Propiedades mecánicas**

##### **Prueba de tracción**

La resistencia a la tracción se llevó a cabo utilizando muestras estándar preparadas según la norma ASTM D882. Según Patel et al. (2023), esta metodología proporciona un estándar óptimo para evaluar las propiedades de tracción en películas plásticas. Este ensayo se realizó mediante una máquina barras roscada, el cual consistirá en someter la película del polímero a un esfuerzo de tracción axial el cual se aumentó con el tiempo hasta que la película alcance roturas. El procedimiento incluye la aplicación de fuerzas controladas, destacando la relevancia de la Ley de Hooke, permitiendo registrar parámetros clave como el esfuerzo máximo, la elongación y el punto de deformación.

##### **Prueba de impacto**

Las muestras se prepararon conforme a la normativa ASTM D256, que describe el procedimiento para ensayos de impacto. Durante el ensayo, la muestra se fijó adecuadamente, mientras un péndulo, previamente elevado a una altura de 50 cm, será liberado para golpear la muestra en un punto definido. El dispositivo se medirá la velocidad y mediante fórmulas físicas se determinará la fuerza puesta en el péndulo para impactar la lámina de bioplástico, lo que permitirá evaluar su resistencia al impacto mediante el método de péndulo.

## **Pruebas microbiológicas**

El comportamiento frente a *Escherichia coli* y hongos se evaluó mediante cultivos en medios específicos: Agar EMB para bacterias y Agar Sabouraud dextrosa para hongos. La actividad antimicrobiana se determinó empleando la técnica de difusión en disco de Kirby-Bauer, siguiendo la metodología descrita por Patel et al. (2023). En este procedimiento, discos de 1cm de diámetro se colocaron en medios de cultivo correspondiente.

La superficie de los medios se inoculó uniformemente mediante frotis con suspensiones bacterianas y fúngicas previamente preparadas. Posteriormente, las placas incubaron durante 48 horas a una temperatura controlada de  $37 \pm 2$  °C, con monitoreo periódico. Finalmente, se midieron las zonas de inhibición alrededor de los discos y se registraron los crecimientos microbiano observados

## **Propiedades biodegradables**

### **Prueba de solubilidad**

La solubilidad de las películas de bioplástico se evaluó usando los métodos modificados de Patel et al. (2023) y Mukuze et al. (2019) donde se verificó en agua salada a temperatura ambiente simulando el agua marina. Se cortaron las películas en dimensiones de 2cm x 2cm se sumergieron las muestras en 100 ml de la solución salada al 3.85% durante 10 días con agitaciones manuales periódica durante este tiempo se anotaron las observaciones.

### **Pruebas de degradación rápida**

La degradación de las películas de bioplástico se evaluó utilizando el método descrito por Patel et al. (2023) con leves modificaciones, destacando la efectividad de la prueba de enterramiento en tierra húmeda para este propósito. Se registró el peso inicial de las películas y posteriormente, los fragmentos se enterraron en macetas pequeñas de tierra de jardín con 50 a 70%de humedad, lo cual fue controlado con higrómetro. Los fragmentos se colocaron en la parte de pantallas visibles rodeada de tierra para garantizar una distribución adecuada de las condiciones. El porcentaje de humedad garantiza que los microorganismos no enfrenten limitaciones de

crecimiento y si la humedad se excede del rango puede reducir la disponibilidad de oxígeno en el suelo. Además, el pH de la tierra que se utilizó estuvo en un rango neutro de 6.5 -7.5 y una temperatura constante dentro de 15-20 °C, simulando un entorno aceptable para la biodegradación (Adnan et al., 2023).

Con base en la metodología modificada propuesta por Patel et al. (2023), las muestras se sometieron a un seguimiento periódico en intervalos de 5,10, 15, 20, 25 y 30 días. Al concluir el periodo experimental, la información obtenida fue procesada y analizada con el fin de establecer el grado de degradación del material.

**CAPITULO IV**  
**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En el siguiente apartado se presentan los resultados obtenidos a partir de la experimentación, con el fin de cumplir con los objetivos planteados en esta investigación.

**4.1 Análisis de las características fisicoquímicas de residuos de Limón**

El análisis fisicoquímico de los residuos de limón se llevó a cabo con el objeto de caracterizar su composición y evaluar su viabilidad como materia prima en la obtención del biopolímero. Por lo que, se analizaron parámetros fundamentales: color, pH, acidez titulable, fibra, lípidos, sólidos solubles (°Brix), humedad, ceniza, pectina, donde se encontraron los siguientes resultados (Tabla 5).

**Tabla 5**

Resultados de las características fisicoquímicas

<b>Características</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
<b>pH (zumo)</b>		2,26 ± 0,03
<b>pH (cáscara)</b>		5,33 ± 0,03
<b>Sólidos solubles (zumo)</b>	°Brix	8,03 ± 0,03
<b>Acidez Titulable (zumo)</b>	%	3,54 ± 0,05
<b>Índice de madurez</b>		2,3 ± 0,03
<b>Humedad</b>	%	20,84 ± 0,63
<b>Ceniza</b>	%	0,77 ± 0,07
<b>Fibra</b>	%	17,63 ± 1,57
<b>Lípidos</b>	%	0,17 ± 0,03
<b>Pectina</b>	%	15,57 ± 4,55
<b>Color</b>		
<b>L*</b>	U	50,55 ± 1,49
<b>a*</b>	U	9,20 ± 1,35
<b>b*</b>	U	38,90 ± 1,49
<b>C*</b>	U	39,99±1,52
<b>h*</b>	U	1,34±0,03

Los resultados obtenidos en el análisis de color de las cáscaras de limón, evaluados mediante el sistema CIELab, revelan características cromáticas consistentes con lo reportado en la literatura para cítricos.

En particular los parámetros colorimétricos del limón Meyer en estado de madurez comercial revelan un valor de 9,20 para a\*, lo que define un perfil distintivo. Este comportamiento difiere

del observado en el limón común, el cual, según Kato et al. (2004), presenta un perfil de carotenoides más simple, dominado principalmente por luteína y valores de  $a^*$ . En contraste, los resultados experimentales obtenidos se aproximan al patrón cromático reportado para mandarinas y naranjas, caracterizado por la acumulación de carotenoides de tonalidad anaranjada como la  $\beta$ -criptoxantina. Esto puede atribuirse directamente a la naturaleza híbrida del limón Meyer (*Citrus x meyeri M*), el cual hereda genes de la biosíntesis de carotenoides de su parental mandarino. Rodrigo et al. (2013), indica que la expresión de genes como LCYb2 es fundamental para la producción de beta-criptoxantina en naranjas, por lo que podría estar presente en el Meyer, explicando así la tonalidad amarillo-anaranjada única y el valor positivo de  $a^*$ , la pureza de color en la experimentación fue de  $C= 39,99$  y la luminosidad  $L^* =50,55$ , los valores obtenidos son consistentes con un estado de madurez comercial donde coexisten clorofilas residuales responsables de un tono verdoso con carotenoides en plena acumulación.

#### **4.1.1 pH**

En el análisis de pH, se obtuvo un valor de 5,33, el cual difiere de lo reportado por Mahato et al. (2019), quienes encontraron un valor de 3,2. Esta discrepancia se atribuye principalmente a las diferencias metodológicas. Mahato et al. (2019) realizó sus mediciones *in situ*, mientras que, el presente estudio, las materias primas se trasladaron a los laboratorios, y se midió el pH en solución, presentando dilución de la concentración efectiva de protones.

#### **4.1.2 Fibra**

El análisis de fibra en residuos de limón evidenció un contenido promedio de 17,63 % en cáscara. Este valor es especialmente relevante para su aplicación para la elaboración de biopolímero, debido a que la fibra cítrica contiene componentes estructurales clave como celulosa, hemicelulosa y pectinas. Los resultados se alinean con estudios reportados por Rezzouk et al. (2020) y Fernández-López et al. (2009), quienes presentan resultados de 16,5 - 17,2– 19,8% respectivamente para la misma variedad.

La consistencia de estos resultados con los reportes previos respalda la calidad del material analizado y sugiere un comportamiento favorable para la formación de matrices poliméricas con adecuada resistencia y cohesión, De igual manera, el contenido de fibra podría ejercer un efecto positivo sobre las propiedades mecánicas del material final.

#### **4.1.3 Lípidos**

El contenido de lípidos totales presente en la cáscara de limón Meyer, cuantificado mediante el método de Soxhlet, fue de 0,1727%, valor que resulta inferior a lo reportado por Wang et al. (2022) para una mezcla de cáscaras de cítricos, donde se registraron valores entre 0,68% y 0,92%. La diferencia se explica principalmente por la variabilidad entre especies, ya que Wang et al. (2022) lo analizaron en una mezcla de cítricos, mientras que en este estudio se centró exclusivamente en el limón Meyer.

El bajo contenido lipídico encontrado constituye una ventaja importante para el desarrollo de biopolímeros, ya que reduce el riesgo de interferencia en la formación de la matriz polimérica de pectina minimizando la posibilidad de aparición de olores por rancidez durante el almacenamiento. En conjunto, estos resultados posicionan al limón Meyer como una materia prima adecuada y estable para aplicaciones en biopolímeros.

#### **4.1.4 Pectina**

El rendimiento de pectina se situó en 15,57%. Esto es ligeramente inferior a lo reportado por Twinomuhwezi et al. (2020) para cítricos convencionales con valores de 19.35% para el limón (*C.limon*), 21.57% para la naranja y 17.74% para la mandarina, sin embargo, representa un valor óptimo y competitivo para el aprovechamiento de este residuo como base estructural del biopolímero. La diferencia observada, puede atribuirse a factores intrínsecos y metodológicos. En primer lugar, la variedad del cítrico es un factor crucial, ya que el limón Meyer es un híbrido, resultado de un cruce entre limón y mandarina/naranja. Las condiciones de extracción también fueron distintas, Twinomuhwezi et al. (2020) utilizaron ácido cítrico a diferentes temperaturas, es

probable que estas condiciones hayan influido en la eficiencia de la hidrólisis de las protopectinas. A pesar de las diferencias observadas, el rendimiento de pectina obtenido 15,57% se mantiene dentro de los rangos reportados para subproductos cítricos, lo que confirma el potencial de la cáscara de limón Meyer como una fuente viable de pectina. Estos resultados respaldan la factibilidad técnica del aprovechamiento de residuos de limón en aplicaciones alineadas con los principios de la economía circular y resaltan la relevancia de evaluar variedades no tradicionales con fines de biorrefinería.

#### **4.1.5 Ceniza**

El contenido de ceniza de 0,77%, indicando una baja presencia de compuestos minerales inorgánicos. Este resultado es significativamente menor en comparación con los reportados en la literatura para cáscaras de cítricos. Mello et al. (2021) reportaron un contenido de cenizas de 2,92% y 4,52% para distintas variedades de limón (*C. limon*), mientras que Rezzadori et al. (2014) obtuvieron un 3,7% para la cáscara de naranja Valencia. Esta diferencia puede atribuirse a varios factores ya que, en primera instancia se trabajó con un híbrido, además las condiciones climáticas, pudieron cambiar la fisiología del limón cosechado, por otro lado el bajo contenido de ceniza es un indicador de una alta pureza del material orgánico lo que conlleva una ventaja para el uso industrial, puesto que un menor contenido de minerales posee una menor interferencia en los procesos de gelificación, asimilando que este valor es adecuado para evitar interferencias durante el proceso de formulación y mejora la estabilidad química del biopolímero resultante.

#### **4.1.6 Grados Brix**

El contenido de sólidos solubles arrojó un resultado 8,03° Brix, lo que indica una concentración moderada de azúcares, siendo favorable en residuos de limón destinados a la extracción de polisacáridos como pectina. El valor que se obtuvo como resultado se encuentra completamente dentro del rango reportado por Mahato et al. (2019) para cáscaras de cítricos el cual oscila entre 8-10 °Brix añadiendo que los azúcares no participan directamente en la estructura del biopolímero, su presencia puede influir en la viscosidad del medio de extracción y en la formación de enlaces

hidrofóbicos o interacciones que afecten la gelificación del material. Entonces se puede deducir que esta concordancia no solo valida la metodología empleada, sino que también posiciona al limón Meyer como un material consistente y de alta calidad para la fabricación de biopolímeros.

#### **4.1.7 Humedad**

El contenido de humedad determinado para la cáscara de limón Meyer fue de 20.84%. Este valor se encuentra dentro del rango característico reportado en la literatura para cáscaras de cítricos, el cual oscila entre 20-25% (Mahato et al., 2019). Dicho resultado es consistentemente respaldado por el estudio de Mello et al. (2021) quienes reportaron un valor de 21.8% de humedad en cáscara de limón. Esta concordancia con investigaciones previas no solo valida la metodología analítica empleada, sino que también confirma que la materia prima utilizada presenta estabilidad y composición típica de los subproductos cítricos, posicionándola como un insumo confiable para procesos industriales.

#### **4.1.8 Acidez titulable**

Los resultados obtenidos en la determinación de acidez titulable en cáscara de limón muestran valores consistentes con lo reportado en la literatura científica. Gómez- Mejía et al. (2019) reportaron 1.5 - 5% de acidez, lo que sitúa los resultados obtenidos en este estudio dentro del rango esperado. Boukroufa et al. (2025) encontraron en su estudio un 3-5 % de acidez, respaldando la consistencia de los datos. El valor de 3.54% en esta investigación corresponde a un contenido de ácidos orgánicos, presentes en los residuos. Una acidez adecuada mejora el proceso de extracción de pectina, dado que puede evitar su despolimerización drástica de la pectina favoreciendo la obtención del biopolímero con mayor peso molecular y mejores propiedades estructurales.

Con base en los resultados de grados Brix y la acidez titulable, se realizaron los cálculos para la obtención del índice de madurez, indicando que el residuo proviene de frutos en una etapa de maduración comercial. Este valor se considera relevante, característico y deseable en cítricos ácidos, ya que define su perfil de sabor y su larga vida postcosecha. Sdiri et al. (2012) reportaron un índice de madurez de 2 para el limón *Eureka*, mostrando un índice de madurez similar.

El resultado obtenido de 2,3 en el índice de madurez indica que es apropiado para garantizar una buena extracción y funcionalidad del biopolímero

Entonces se puede decir que los parámetros fisicoquímicos analizados confirman que los residuos de limón son eficientes y poseen las condiciones adecuadas para su uso debido a su alto contenido de humedad, fibra y pectina lo que favorece la extracción de compuestos funcionales.

#### **4.2.- Elaboración de un polímero biodegradable a partir de residuos de limón.**

Para alcanzar este objetivo se realizó la fase experimental de los diferentes tratamientos, con base en la estandarización de la materia prima establecida en el apartado anterior.

El proceso de elaboración del polímero biodegradable se evaluó, mediante el diseño factorial fraccionario  $3^{(4-2)}$ .

Las formulaciones permitieron formar una matriz continua tras el secado a 55°C por 24 horas, evidenciando la gelatinización del sistema almidón-solución rica en pectina y formación de películas con espesores cercanos a 2mm.

A nivel macroscópico se observaron diferencias atribuibles a las concentraciones de plastificantes y rigidizantes. Los tratamientos con mayor proporción de plastificante presentaron películas más flexibles y con mejor capacidad de desmolde, mientras que formulaciones con mayor efecto rigidizante mostraron películas más firmes, pero con tendencia a mayor fragilidad o presencia de fisuras en algunos casos.

La Figura 9 muestra el aspecto general de las películas obtenidas por tratamiento, y la Tabla 6 resume la evaluación cualitativa de formación, uniformidad y facilidad de manejo, utilizada como evidencia comparativa inicial previa a los ensayos mecánicos, microbiológicos y de biodegradación.

**Figura 9**

*Tratamientos*



**Tabla 6**

*Evaluación cualitativa de las películas obtenidas por tratamiento*

*Escala: 0 deficiente/no cumple*

*1= aceptable*

*2=bueno*

<b>Tratamientos</b>	<b>Película formada</b>	<b>Desmolde</b>	<b>Uniformidad</b>	<b>Flexibilidad</b>
<b>T1</b>	2	2	2	2
<b>T2</b>	2	2	2	1
<b>T3</b>	2	2	2	2
<b>T4</b>	2	2	2	1
<b>T5</b>	2	2	2	1
<b>T6</b>	2	2	2	2
<b>T7</b>	2	2	2	1
<b>T8</b>	2	2	2	2
<b>T9</b>	2	2	2	2

#### **4.2.1 Efecto principal de los factores**

##### **Glicerol**

El glicerol mostró un efecto principal negativo sobre la rigidez y un resultado positivo sobre la flexibilidad del biopolímero. Los tratamientos A1(0%) como T1 presentaron mayor resistencia mecánica, mientras que niveles elevados como A3(30%) provoca películas blandas con mayor

pegajosidad y una menor cohesión interna, evidenciando un sobreplastificado, sin embargo, se observó una excepción en el T6 puesto que se añadió 30% de glicerol y es un tratamiento que resistió la prueba mecánica. Lo que dio lugar a un mayor aporte porcentual de la variación en la textura y flexibilidad, con un efecto principal dominante sobre cualquier interacción.

### **Ácido acético**

El ácido acético funcionó como agente catalizador en la gelatinización del almidón y la solubilización de pectina. Como se muestra en el nivel B3 (1.5%), se favorece un mejor equilibrio entre viscosidad y flujo durante la cocción, mostrando una influencia moderada y significativa en la calidad visual y en la ausencia de burbujas internas.

### **Sorbitol**

Este compuesto actuó como corigidizante, aumentando la consistencia estructural cuando se combinó con niveles bajos de glicerol.

El nivel C3 (20%) en los tratamientos T1, T2 y T3 mostró una mayor integridad y estabilidad dimensional, mientras que combinaciones con glicerol redujeron significativamente su efecto. El análisis evidenció que el sorbitol resulta en la reducción de grietas superficiales y en el aumento de la dureza, siendo el segundo factor más influyente.

### **Ácido cítrico**

El ácido cítrico actuó como agente que mejora la cohesión de la matriz del biopolímero; en el nivel D3 (1,5 %), fue determinante en la formación de láminas más rígidas y uniformes (T3, T6, T9), mientras que niveles bajos como D1 (0,5 %), generaron películas más frágiles y con una menor integridad mecánica.

El análisis permitió deducir que el factor D presentó la interacción más significativa con el sorbitol (C \* D), produciendo reorganización estructural más estable.

#### 4.2.2 Interacciones significativas entre factores

El diseño factorial permitió identificar interacciones críticas que explican la variabilidad observada:

Interacción A\*C (Glicerol \* Sorbitol)

Esta interacción mostró un comportamiento significativamente alto puesto que:

- Una concentración baja de glicerol A1 + altas de sorbitol C3 = alto desempeño estructural T1
- Concentraciones altas de glicerol A3 + bajas de sorbitol C1 = presenta películas débiles y poco cohesivas

Las interacciones mostradas a continuación explican de mejor manera las diferencias drásticas entre tratamientos extremos.

Interacción C \* D (sorbitol \* ácido cítrico)

Esta interacción fue la interpretación más determinante del diseño experimental, puesto que, altos niveles de ambos factores C3 + D3 generaron matrices poliméricas más compactas con menor deformación y buena apariencia (T3). Este comportamiento sugiere sinergia entre el reticulante y el co-rigidizante, durante el secado.

Interacción A \* D (glicerol \* ácido cítrico)

Ambos plastificantes mostraron un efecto competitivo.

- Altos niveles de D reducen la plasticidad generada por A.
- Altos niveles de A disminuyen la capacidad reticulante de D.

El análisis presentado se evidenció en los tratamientos T7 y T9, donde A3 interfería con la reticulación, produciendo películas blandas y deformables.

#### 4.2.3 Comparación de tratamientos

Tras analizar efectos principales e interacciones, los tratamientos con mejor comportamiento visual, mecánico preliminar y estable fueron:

T1 (A1C3D1B3), T2 (A1C3D2B2), T3 (A1C3D3B1)

- Alta rigidez + buena textura posee un máximo de sorbitol y 0% de glicerol

T4 (A2C2D1B3), T5 (A2C2D2B2), T6 (A2C2D3B1)

- Posee un equilibrio entre flexibilidad y resistencia, puesto que posee un 15% de glicerol + sorbitol 10% + ácido cítrico 1%

T7 (A3C1D1B3), T8 (A3C1D2B2), T9 (A3C1D3B1)

- Buena reticulación y apariencia, pese al glicerol alto

De manera que se mostró que los factores sí contribuyen a diferencias significativas de color, aroma y textura, puesto que, a distintas concentraciones, el biopolímero presenta texturas más flexibles o rígidas.

El diseño factorial fraccionario, permitió identificar que los factores glicerol(A) y sorbitol(C), fueron los que presentaron mayor influencia sobre las propiedades físicas y biodegradabilidad del polímero. La tendencia observó que, los altos niveles de glicerol redujeron la rigidez y aumentaron la flexibilidad, esto coincide con estudios donde se indica que este plastificante disminuye la reticulación interna del almidón y favorece la movilidad molecular.

Por el contrario, el sorbitol actuó como agente corigidizante, contribuyendo a la formación de películas más compactas, estables y con mejor integridad estructural.

Asimismo, el ácido cítrico (D) mostró una interacción altamente significativa con el sorbitol, generando enlaces éster entre polisacáridos que fortalecieron la cohesión interna del material. Este comportamiento ha sido ampliamente descrito en polímeros con base en almidón, donde la reticulación incrementa la resistencia mecánica.

El ácido acético (B), aunque tuvo un efecto menor en comparación con los otros factores, aportó en la mejora de la gelatinización y la homogeneidad de la matriz, tal como reportan diversas investigaciones que destacan su capacidad para favorecer la dispersión del almidón y estabilizar la fase polimérica.

#### **4.3.- Determinar las propiedades mecánicas, biodegradables, antibacterianas y antifúngicas del polímero.**

Dentro de este apartado se realizó la fase experimental con las películas de biopolímero para determinar su color, resistencia en diferentes pruebas mecánicas, las cuales fueron adaptadas a los tratamientos obtenidos. A continuación, se presenta lo encontrado.

##### **4.3.1 Análisis integral de las propiedades de color del biopolímero**

El color constituye una de las propiedades visuales más relevantes en materiales poliméricos destinados a aplicaciones como empaques biodegradables, debido a su influencia directa en la percepción de calidad y aceptabilidad del producto. En la presente investigación, el comportamiento cromático del biopolímero obtenido a partir de residuos de cáscara de limón fue analizado mediante los parámetros  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$ ,  $h^*$ ,  $\Delta E^*$ , ya que permiten una evaluación integral de la luminosidad, tonalidad, saturación y diferencia total de color del material.

Los resultados experimentales evidenciaron que la formulación del biopolímero ejerció efectos diferentes sobre los distintos parámetros colorimétricos. La luminosidad ( $L^*$ ) presentó variaciones principalmente asociadas al grado de homogeneidad de la matriz polimérica, mientras que los parámetros cromáticos  $a^*$  y  $b^*$  evidenciaron cambios vinculados a la incorporación de plastificantes y agentes ácidos, los cuales influyeron en la totalidad y en la intensidad del color del material.

El parámetro  $C^*$  (croma) permitió evaluar la saturación del color, integrando los efectos observados en  $a^*$ ,  $b^*$ , mientras que el ángulo de tono  $h^*$  proporcionó información sobre el desplazamiento cromático del material. Finalmente, la diferencia total de color  $\Delta E^*$  permitió cuantificar de forma global la magnitud del cambio cromático inducido por las diferentes formulaciones evaluadas. En la siguiente tabla se muestran los resultados del color en el biopolímero.

**Tabla 7***Resultados del color*

Tratamientos	Color					
	L*	a*	b*	h*	C*	$\Delta E$
T1	39,96 ± 0,54	8,34± 0,36	24,26± 0,55	1,24 ± 0,01	25,66±0,64	19,88±0,73
T2	37,71 ± 1,88	9,29±0,40	19,63±2,46	1,13±0,03	21,72±2,42	19,00±1,08
T3	39,94 ±0,98	9,25±0,01	22,25±1,13	1,17±0,019	24,19±1,04	20,33±0,34
T4	38,98±0,65	7,91±1,03	21,40±1,15	1,21±0,06	22,84±0,70	19,76±0,17
T5	39,73±0,85	8,15±0,85	22,21±1,22	1,21±0,05	23,68±0,83	20,42±0,07
T6	40,82±1,82	7,47±0,30	23,18±1,39	1,25±0,01	24,35±1,40	20,74±1,12
T7	40,92±0,62	7,97±0,53	22,32±0,28	1,22±0,02	23,70±0,29	20,66±0,50
T8	40,13±0,56	7,90±0,23	22,64±0,70	1,23±0,01	23,98±0,58	20,09±0,25
T9	38,26±0,57	8,77±0,16	20,46±1,24	1,16±0,01	22,27±1,20	19,16±0,57

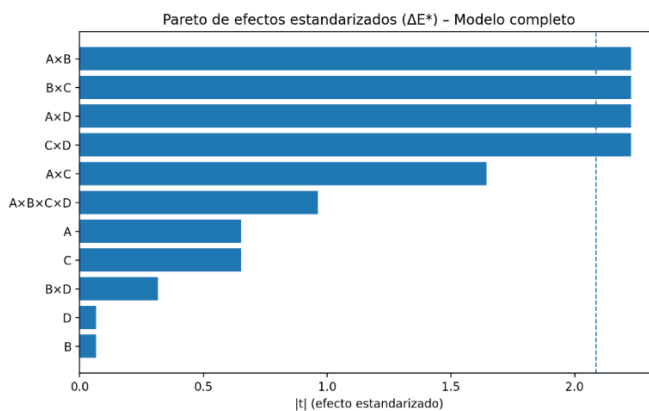
**Análisis estadístico**

El análisis de varianza correspondiente al diseño factorial fraccionado  $3^{(4-2)}$  indicó que, para la mayoría de los parámetros de color, los efectos principales de los factores evaluados (glicerol, ácido acético, sorbitol y ácido cítrico) no resultaron estadísticamente significativos ( $p < 0,05$ ). Sin embargo, se identificaron interacciones relevantes entre los factores, especialmente en la variable  $\Delta E^*$ , donde las combinaciones AB,AD,BC y CD presentaron efectos estadísticamente significativos. Este comportamiento sugiere que las características cromáticas del biopolímero no están determinadas por un solo componente, sino por la interacción conjunta entre los plastificantes y los agentes ácidos, condición propia de sistemas poliméricos complejos basados en polisacáridos naturales.

El análisis mediante la gráfica de Pareto corroboró que las interacciones entre los factores presentaron efectos estandarizados superiores a los efectos individuales, lo que evidencia que las variaciones de color están principalmente controladas por combinaciones específicas de formulación del biopolímero (Figura 10).

**Figura 10.**

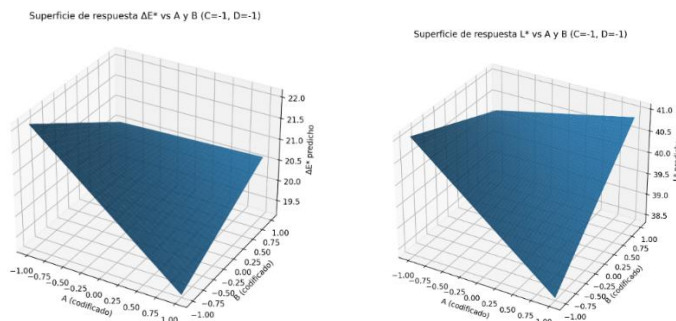
*Pareto de efectos estandarizados*



El análisis de superficie-respuesta permitió identificar regiones óptimas de formulación en las cuales se favorecen simultáneamente la luminosidad, la intensidad cromática y la diferencia total de color del biopolímero (Figura 11).

**Figura 11.**

Optimización del color mediante superficies de respuesta



En el caso de  $L^*$ , se observó que formulaciones con mayor contenido de glicerol favorecieron valores elevados de luminosidad, atribuibles a un mejor efecto plastificante y a una mayor uniformidad de la matriz, lo que reduce la dispersión irregular de la luz.

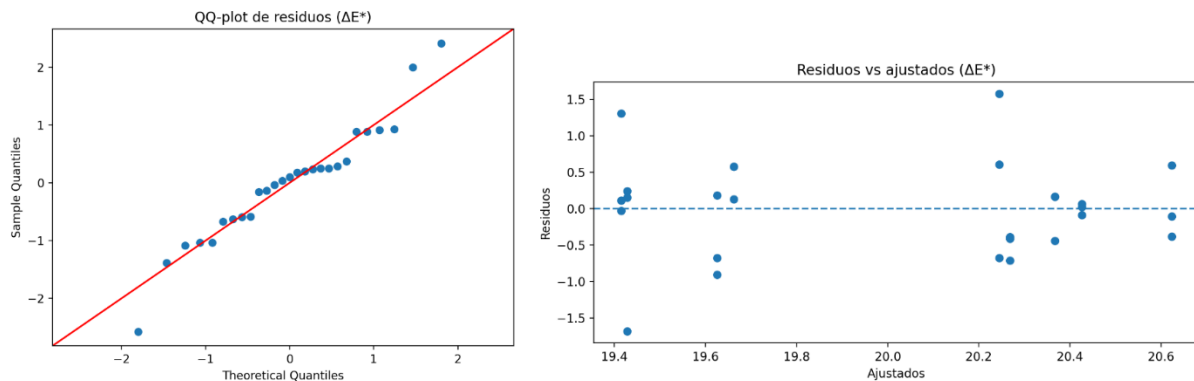
Para  $a^*$ ,  $b^*$ , los resultados indicaron que el contenido de sorbitol y la concentración de ácidos influyeron en la tendencia cromática del material, promoviendo tonos más amarillentos y cambios en la tonalidad del biopolímero.

La optimización de  $C^*$  y  $h^*$  mostró que la saturación y el ángulo de tono se ven influenciados por la relación entre plastificantes, evidenciando que la combinación adecuada del glicerol y sorbitol permite estabilizar la intensidad del color.

Finalmente, la optimización de  $\Delta E^*$  permitió identificar una formulación que maximiza la diferencia total de color, destacándose el tratamiento T7, el cual presentó valores elevados y estables  $\Delta E^*$ , confirmando una modificación cromática claramente perceptible.

Los modelos ajustados para los parámetros de color cumplieron con los supuestos estadísticos requeridos para la interpretación de resultados. En los casos donde se observaron ligeras desviaciones de la normalidad, estas se atribuyen a la variabilidad inherente al cálculo de parámetros derivados como  $C^*$ ,  $h^*$  y  $\Delta E^*$ , sin comprometer la validez del análisis comparativo entre tratamientos. En la Figura 12 se muestra su comportamiento.

**Figura 12**



### Comparación de tratamientos

La prueba de comparación múltiple de Tukey (Anexos) permitió identificar diferencias específicas entre los tratamientos evaluados. En este sentido, el tratamiento T7 se posicionó de manera consistente entre los valores más elevados de  $L^*$  y  $\Delta E$ , mientras que tratamientos como T2 registraron los valores más bajos, presentando diferencias estadísticas significativas en algunos de los parámetros analizados.

Si bien no todos los parámetros colorimétricos mostraron diferencias significativas entre tratamientos, el análisis integral de los resultados evidenció tendencias definidas que permiten establecer criterios de formulación desde el punto de vista cromático.

El aumento de la luminosidad, la intensidad cromática y la diferencia total de color observado en formulaciones con mayor contenido de glicerol puede atribuirse a su efecto plastificante, el cual favorece una mayor cohesión y homogeneidad de la matriz polimérica. En contraste, concentraciones elevadas de sorbitol y ácido cítrico promueve reacciones químicas que pueden generar oscurecimiento y modificaciones en la tonalidad del material. En conjunto, los resultados indican que las propiedades de color del biopolímero están determinadas principalmente por la interacción entre los componentes de la formulación, más que por los efectos individuales de cada factor. La formulación correspondiente al tratamiento T7 se identificó como la más favorable en términos de estabilidad cromática y diferencia total de color, por lo que se recomienda como la condición óptima desde el punto de vista visual para el biopolímero desarrollado.

Una vez identificadas las diferencias estadísticas entre tratamientos, se procede a analizar el comportamiento cromático del biopolímero en relación con la materia prima utilizada. Los residuos de limón utilizados como materia prima presentaron una coloración característica de materiales cítricos, con alta luminosidad ( $L^* = 50,55 \pm 1,49$ ), elevada intensidad del componente amarillo ( $b = 38,90 \pm 1,49$ ) y alta saturación ( $C = 39,99 \pm 1,52$ ). Estos valores reflejan la presencia de pigmentos naturales propios del tejido vegetal y confirman una coloración brillante y definida, típica de residuos frescos de limón.

Tras el proceso de elaboración del biopolímero, se evidenció una disminución de los valores de  $L^*$ ,  $b^*$  y  $C^*$  con rangos de 37,71 - 40,92, 19,63 - 24,26 y 21,72 - 25,66 respectivamente. Este comportamiento indica un oscurecimiento del material y una reducción en la intensidad y saturación del color, atribuible a los tratamientos térmicos, al secado y a la formación de una matriz polimérica más compacta, donde ocurren interacciones entre pectina, fibra y plastificantes.

La comparación directa entre la materia prima y el biopolímero final demuestra que el proceso de transformación afecta principalmente la intensidad y luminosidad del color, mientras que el ángulo de tono ( $h$ ) se mantiene relativamente constante, evidenciando que el biopolímero conserva la tonalidad características del limón. Este comportamiento confirma una adecuada estabilidad

cromática del material final, lo cual resulta favorable para aplicaciones donde se valore la identidad natural del biopolímero.

Estos resultados evidencian que el color del biopolímero está directamente influenciado por la materia prima y por las condiciones del proceso de elaboración.

#### 4.3.2 Pruebas mecánicas

La resistencia a la tracción es una de las propiedades mecánicas más importantes para evaluar el desempeño estructural de materiales poliméricos, destinados a aplicaciones como empaques biodegradables, ya que define la capacidad del material para soportar esfuerzos de tensión sin presentar falla. La tracción del biopolímero elaborado a partir de residuos de cáscara de limón, fue evaluada con el fin de determinar la influencia de la formulación y establecer las condiciones que maximicen esta propiedad.

Las pruebas mecánicas se realizaron mediante ensayos de resistencia a la tracción y resistencia al impacto, de acuerdo con los métodos descritos en la normativa ISO 527 y ASTM D256.

En las propiedades mecánicas se encontró lo siguiente Tabla 8.

**Tabla 8**

*Resultados de tracción e impacto*

<b>Tracción</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>T6</b>	<b>T7</b>	<b>T8</b>	<b>T9</b>
Resultados (MPa)	7.85	1.47	1.47	3.43	2.45	7.85	1.47	1.96	4.9
<b>Impacto</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>T6</b>	<b>T7</b>	<b>T8</b>	<b>T9</b>
Resultado (N)	1.962	1.962	1.962	1.962	1.962	1.962	1.962	1.962	1.962

Los resultados experimentales evidenciaron diferencias marcadas en los valores de tracción entre los tratamientos evaluados, lo que indica que la formulación del biopolímero tiene un efecto directo sobre su comportamiento mecánico. Los valores de resistencia a la tracción obtenidos variaron entre 1,47 MPa y 7,85 MPa, lo que evidencia diferencias en el grado de cohesión y la capacidad resistencia de la matriz polimérica. Los tratamientos T1 y T6 alcanzaron los valores más elevados de tracción (7,85MPa), mientras que tratamientos T2,T3 y T7 presentaron las resistencias más

bajas, con valores cercanos a 1,47 MPa. Esta variabilidad indica que el comportamiento mecánico del biopolímero está condicionado por la combinación específica de plastificantes y agentes ácidos empleados en su formulación.

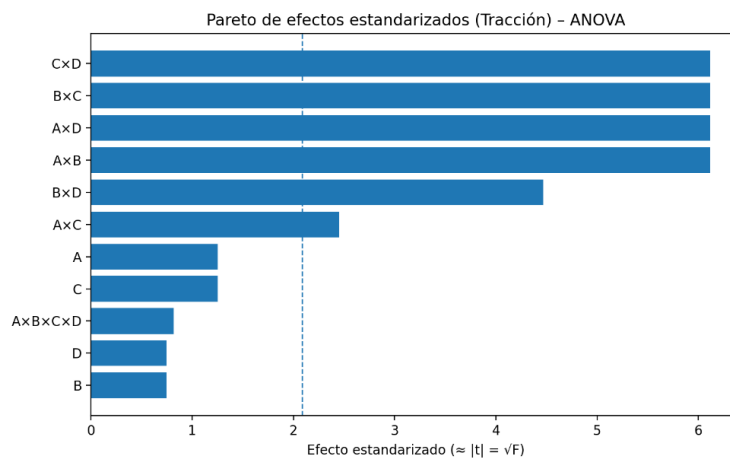
El análisis de varianza correspondiente al diseño factorial fraccionado  $3^{(4-2)}$  mostró que los efectos principales de los factores evaluados (glicerol(A), ácido acético(B), sorbitol(C) y ácido cítrico(D)) no fueron estadísticamente significativos ( $p < 0,05$ ). No obstante, se identificaron interacciones con un efecto altamente significativo sobre la respuesta de tracción.

En particular, las interacciones AB,AD,BC y CD presentaron valores de probabilidad extremadamente bajos ( $p < 0,001$ ), mientras que las interacciones AC y BD también mostraron significancia estadística, lo que confirma que la resistencia a la tracción del biopolímero está principalmente gobernada por la interacción entre los factores de formulación más que por los efectos individuales de cada componente.

Este comportamiento es característico de sistemas poliméricos, en los cuales la movilidad de las cadenas, la formación de enlaces intermoleculares y de cohesión de la matriz dependen del balance entre los componentes de la formulación. A continuación, se muestra la figura 4.13 los efectos estandarizados \_ Pareto.

**Figura 13.**

*Pareto de efectos estandarizados (Tracción)*



La gráfica de efectos estandarizados permitió identificar de forma visual los factores con mayor influencia sobre la resistencia a la tracción. En este análisis se evidenció que las interacciones entre

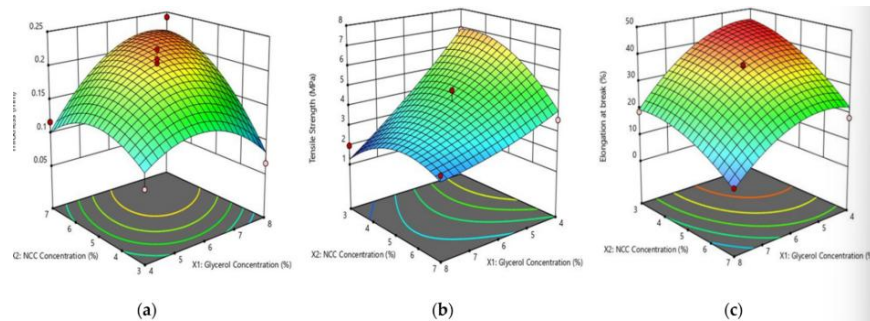
los factores evaluados presentaron los efectos estandarizados más elevados, destacándose particularmente las combinaciones AB, AD, BC y CD.

La limitada contribución de los efectos principales respalda que la tracción del biopolímero está controlada predominantemente por la interacción entre los componentes de la formulación, lo que refuerza la importancia de optimizar el sistema de manera integral en lugar de considerar cada factor de forma aislada.

El análisis de superficies de respuesta permitió identificar regiones del espacio experimental asociadas a los valores elevados de tracción. El modelo matemático indicó una tendencia favorable hacia formulaciones con mayor contenido de glicerol, bajo contenido de sorbitol y combinaciones específicas de los ácidos evaluados (Figura 14).

**Figura 14**

*Optimización de la tracción mediante superficie respuesta*



La optimización del modelo sugirió como condición cercana al máximo una formulación correspondiente al tratamiento T9; puesto que, al contrastar esta predicción con los resultados experimentales, se observó que los mayores valores reales de tracción fueron alcanzados por los tratamientos T1 y T6, ambos con 7,85 MPa.

Por lo tanto, desde un punto de vista experimental y práctico, T1 y T6 se consideran las formulaciones más representativas para maximizar la resistencia a la tracción del biopolímero.

Por otro lado, las pruebas de normalidad indicaron que los residuos del modelo de tracción presentan una distribución aproximadamente normal. No obstante, las pruebas de

homocedasticidad e independencia mostraron desviaciones respecto al comportamiento ideal, asociadas principalmente a la baja variabilidad entre repeticiones, dado que los valores de tracción fueron idénticos dentro de cada tratamiento.

### **Comparación de tratamientos**

La prueba de comparación múltiple de Tukey permitió clasificar los tratamientos T1 y T6 ubicándose en el grupo estadísticamente superior, presentando valores de tracción significativamente mayores que el resto de las formulaciones evaluadas.

Por el contrario, los tratamientos T2, T3 y T7 conformaron el grupo con menor resistencia mecánica. Estos resultados confirman que existen diferencias claras entre tratamientos extremos, aun cuando el diseño experimental sea fraccionado.

El elevado valor de tracción observado en los tratamientos T1 y T6, puede atribuirse a un balance adecuado entre plastificante y cohesión estructural de la matriz polimérica. El glicerol actúa como plastificante, incrementando la movilidad de las cadenas poliméricas, mientras que los ácidos influyen en la estructura y estabilidad del sistema, favoreciendo la formación de una matriz más compacta cuando se combinan en proporciones adecuadas.

Por el contrario, formulaciones con combinaciones desfavorables de plastificantes y ácidos pueden generar matrices menos cohesionadas, lo que explica los bajos valores de tracción registrados en algunos tratamientos. Este comportamiento concuerda con estudios previos sobre biopolímeros a base de polisacáridos, donde la resistencia mecánica depende principalmente de la interacción entre plastificantes y agentes estructurales.

### **Prueba de impacto**

En lo correspondiente a la prueba de impacto todos los tratamientos resistieron a los pesos, luego de esto todos tuvieron una rotura inmediata en el punto máximo que fue de 1,96 N, según el estudio de Muller et al. (2020) presentó un resultado de 0,8 – 1,2 N en esta prueba, mientras que en este estudio arrojó un resultado de 1,96 N, sugiriendo viabilidad técnica para el uso de estas

láminas mostrando que la resistencia al impacto aumenta cuando existe un equilibrio entre rigidez y capacidad de deformación.

Este comportamiento indica que bajo las condiciones del experimento y con los valores registrados, la formulación no generó diferencias observables en la respuesta de impacto.

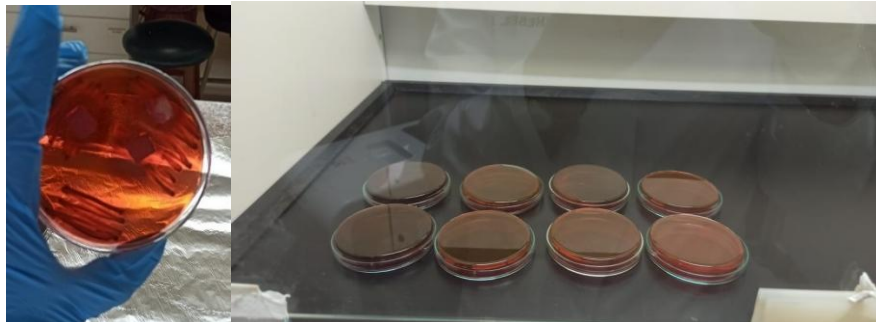
Debido a que la variable impacto presentó una varianza nula, el análisis de varianza ANOVA no es estadísticamente interpretable para la evaluación.

#### 4.3.2 Pruebas microbiológicas

La actividad microbiológica se evaluó frente a *E.coli* (bacterias) y al desarrollo del hongo *Aspergillus*, con el objeto de identificar propiedades antimicrobianas derivadas de compuestos presentes en el limón.

Para la prueba, se utilizó agar EMB, en el cual se sembró *E.coli*. En la figura 15 se observa el comportamiento con el biopolímero y en la Tabla 9 los resultados de la actividad microbiológica.

**Figura 15**



**Tabla 9**

*Resultados\_ actividad microbiológica*

Tratamientos	Actividad antimicrobiana	Actividad antifúngica
T1	-	-
T2	-	+
T3	-	+
T4	+	+
T5	-	-
T6	+	+
T7	+	+
T8	+	+
T9	-	+

Nota: (+)presencia de crecimiento microbiano (no inhibición), (-)ausencia de crecimiento microbiano (inhibición)

En el ensayo antibacteriano, se observó que el biopolímero presentó un efecto inhibitorio localizado en los tratamientos T1,T2,T3,T5,T9 evidenciado por la formación de los halos de inhibición de la zona de contacto entre bioplástico y el medio de cultivo. Los tratamientos T2 y T9 presentaron halos de inhibición con un diámetro aproximado de 3mm, mientras que los tratamientos T1, T3 y T5 mostraron zonas de inhibición cercanas a 2 mm, lo que sugiere la presencia de compuestos con actividad antibacteriana derivados de la cáscara de limón en las formulaciones evaluadas.

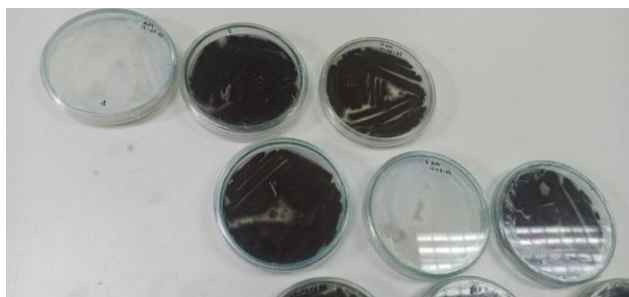
Sin embargo, fuera de la zona de contacto directo con el biopolímero se evidenció un crecimiento considerable de *Escherichia coli*, lo que indica que la actividad antibacteriana observada fue limitada y dependiente de la exposición directa al material.

Estos resultados difieren de lo reportado por Wu et al.(2016), quienes evidenciaron una actividad antimicrobiana significativa de compuestos cítricos, con reducciones de hasta 2log UFC/g. Esta diferencia puede atribuirse a que dicho estudio empleó nanotecnología mediante nanoemulsiones, mientras que en la presente investigación se utilizó pectina extraída de limón Meyer, combinada con plastificantes y rigidizantes, sin la aplicación de sistemas nanoestructurados. Por tanto, las variaciones metodológicas explican las diferencias observadas en la magnitud del efecto antimicrobiano.

Por otro lado, se realizó la prueba antifúngica en donde los tratamientos T1 y T5 tuvieron un crecimiento retardado, con respecto al resto de tratamientos. Esto se puede observar en la Figura 16.

## **Figura 16**

### *Experimentación prueba antifúngica*



En el ensayo antifúngico, se sembró *Aspergillus* sp. y se incubó a temperatura constante durante 5 días.

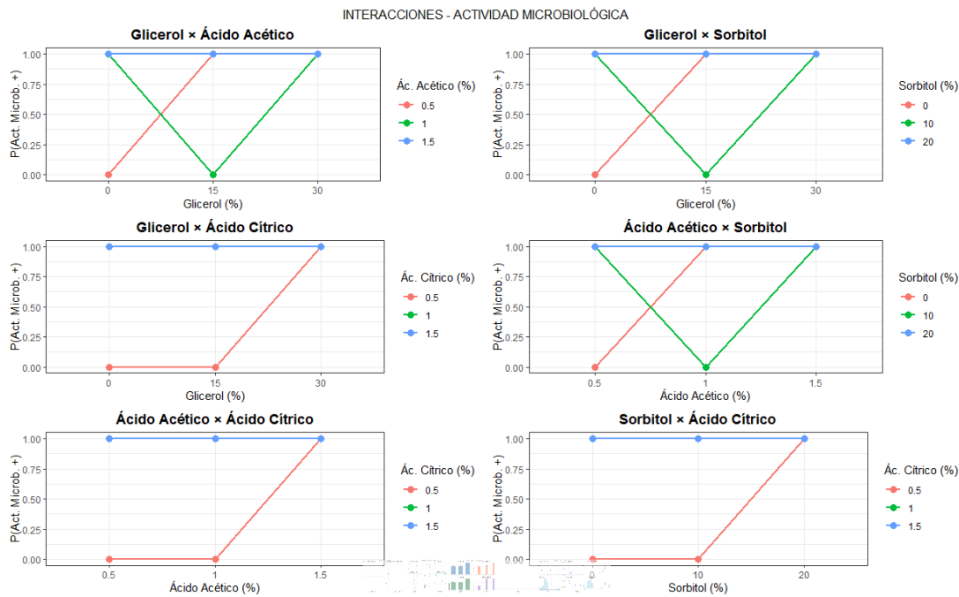
Los resultados mostraron que los tratamientos T1 y T5, tuvieron un crecimiento micelial retardado, evidenciando un efecto inhibitorio parcial del polímero frente al desarrollo del hongo. En contraste, los tratamientos T2, T3, T4, T6, T7, T8, T9 presentaron un crecimiento fúngico abundante, caracterizado por el oscurecimiento del medio debido a la formación de esporas, lo que refleja la ausencia de actividad antifúngica lo que podría atribuirse a la variación en la composición de los tratamientos, los cuales podrían haber reducido la disponibilidad o efectividad de dichos compuestos activos.

Estos resultados sugieren que los tratamientos T1 y T5 conservan compuestos bioactivos propios de la cáscara del limón como el limoneno, también la formulación de estos tratamientos podría estar asociados con la inhibición parcial del crecimiento fúngico observado.

En la siguiente Figura 17 se muestran los efectos de interacciones en la actividad microbiológica.

**Figura 17**

*Actividad microbiana*



Los gráficos de interacción muestran que la actividad microbológica del polímero biodegradable no depende únicamente de los factores individuales, sino de sus combinaciones. Se observa interacciones significativas en los diferentes pares glicerol \* ácido acético, glicerol \* sorbitol, ácido acético \* sorbitol y ácido acético \* ácido cítrico, evidenciadas por líneas que se cruzan. Esto indica que el efecto de un factor cambia dependiendo del nivel del otro. En cambio, las interacciones glicerol \* ácido cítrico y sorbitol \* ácido cítrico presentan cruces pronunciados, lo que sugiere efectos más independientes. En general, el glicerol y el sorbitol tienden a incrementar la actividad microbológica, mientras que los ácidos orgánicos pueden modular dicha actividad, generando puntos donde esta disminuye por completo.

### 4.3.3 Biodegradabilidad

La biodegradabilidad se evaluó mediante dos pruebas: solubilidad en agua salina simulada y degradación en suelo, utilizando pantallas visibles en las cuales se colocaron las muestras y se cubrieron con tierra de jardín, observando los cambios durante 30 días con revisiones periódicas cada 5, según el método modificado de Patel et al.(2023).

La Figura 18, muestra el proceso y los resultados se muestran en la Tabla 10.

**Figura 18**

*Prueba de biodegradabilidad en tierra\_ pantallas visibles*



**Tabla 10**

*Resultados de biodegradabilidad y solubilidad*

<b>Tratamientos</b>	<b>Biodegradabilidad</b>	<b>Solubilidad</b>
<b>T1</b>	73,33±1,52	82,33±0,57
<b>T2</b>	68,33±1,52	76,66±1,52
<b>T3</b>	73,66±1,52	85,66±1,15
<b>T4</b>	62,66±2,51	85,33±1,52
<b>T5</b>	65,33±1,52	89,66±1,15
<b>T6</b>	65,33±1,52	89,66±1,52
<b>T7</b>	64,66±1,52	86,33±1,52
<b>T8</b>	58±2,64	84,66±1,52
<b>T9</b>	65,33±1,52	89,33±0,57

La evaluación de biodegradabilidad del polímero biodegradable obtenido a partir de residuos de limón *Citrus limon* se llevó a cabo mediante un ensayo modificado de Patel et al. (2023), en donde se colocó los nueve tratamientos por triplicado en pantallas visibles, bajo condiciones ambientales controladas.

Durante el periodo de observación, se llevó un registro de cada 5 días donde se vieron cambios físicos progresivos en las muestras, tales como pérdidas de masa, variación de color y alteración en las texturas superficial, por lo que se evidenció el inicio de la degradación.

A partir del día 10 de evaluación, la mayoría de los tratamientos presentó signos iniciales de hinchazón estructural y modificaciones en la porosidad del material; no obstante, los tratamientos T3, T5 y T9, mostraron una mayor estabilidad durante esta etapa. Entre los días 15 y 20 se evidenció la aparición de una coloración rosada en las muestras, acompañada por la formación de orificios, lo que sugiere el inicio de actividad microbiana asociada al proceso de degradación del biopolímero. Finalmente, entre los días 25 y 30, todas las muestras exhibieron un incremento en la fragmentación y una pérdida progresiva de integridad estructural.

Debido a la presencia de remanentes del biopolímero al finalizar los 30 días, el ensayo se extendió hasta los 40 días, período en el cual aún se detectaron pequeñas secuelas del material. Esto confirma que el biopolímero presenta un proceso de biodegradación efectivo en el suelo, aunque de carácter progresivo, esto evidencia un alto potencial biodegradable y compatibilidad para aplicaciones en contacto directo con la tierra.

Estos resultados difieren de lo reportado por Patel et al. (2023), quienes observaron una degradación completa en un periodo de 30 días. La mayor duración del proceso en el presente estudio podría atribuirse a diferencias en el diseño estructural de las muestras y a las condiciones experimentales. Los cambios presentados al término de los 30 días de biodegradación se pueden observar en la Figura 19.

Adicionalmente, el suelo utilizado presentó un pH de 6,75, valor considerado adecuado para la actividad microbiana y el crecimiento vegetal, lo que favorece el proceso de biodegradación observado.

Estos hallazgos, junto con el bajo contenido de cenizas (0,77%) y la adecuada cohesión de la matriz polimérica, respaldan la viabilidad técnica del biopolímero elaborado a partir de residuos de limón para su aplicación en empaques u otros productos biodegradables de carácter sostenible.

## Figura 19

*Coloraciones rosadas en el ensayo biodegradabilidad*



### **Análisis estadístico**

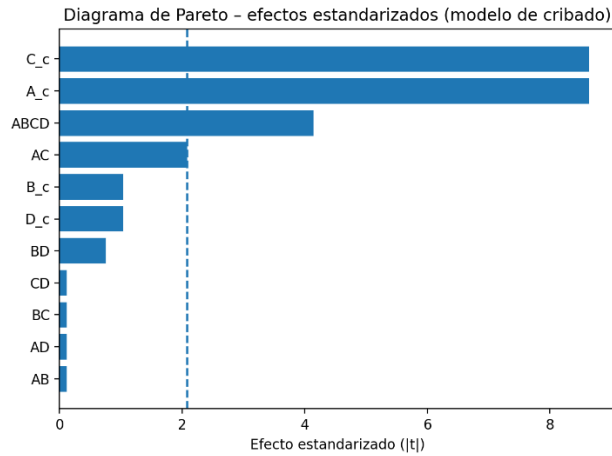
Los factores cantidad de glicerol(A), ácido acético(B), sorbitol (C) y ácido cítrico (D) sobre la biodegradabilidad del biopolímero elaborado a partir de residuos de cáscara de limón (*Citrus limon*), empleando un diseño experimental fraccional  $3^{(4-2)}$  con nueve tratamientos y tres repeticiones.

El análisis de varianza (ANOVA) mostró que los efectos principales de los cuatro factores evaluados ejercen una influencia estadísticamente significativamente ( $p < 0,05$ ) sobre la biodegradabilidad del material. Este resultado evidencia que las variaciones en la formulación inciden directamente en la capacidad del biopolímero para degradarse bajo las condiciones de ensayo, confirmando que este comportamiento depende en gran medida de la composición del sistema polimérico.

La significancia estadística obtenida respalda la hipótesis de que los plastificantes y agentes acidificantes generan modificaciones en la estructura interna del biopolímero, afectando parámetros como la afinidad por el agua, la porosidad del material y su susceptibilidad frente a la acción microbiana y a las condiciones ambientales.

El diagrama de Pareto permitió jerarquizar la magnitud de los efectos sobre la biodegradabilidad. Los factores que superaron el umbral de significancia estadística fueron cantidad de glicerol (A), sorbitol (C), interacción global (ABC) (Figura 20).

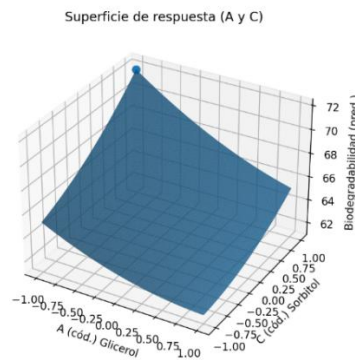
**Figura 20**



Este resultado confirma que los plastificantes desempeñan un rol determinante en la degradación de material, ya que modifican la movilidad de las cadenas poliméricas y la accesibilidad de agua y microorganismos al interior del biopolímero.

Con base en los factores más influyentes, se desarrolló un modelo de superficie de respuesta considerando la cantidad de glicerol (A) y sorbitol (C), incorporando términos lineales, cuadráticos e interacción (Figura 21).

**Figura 21**



$$Y=64,44-2,53A+2,53C-0,76AC+0,7A^2+0,76C^2$$

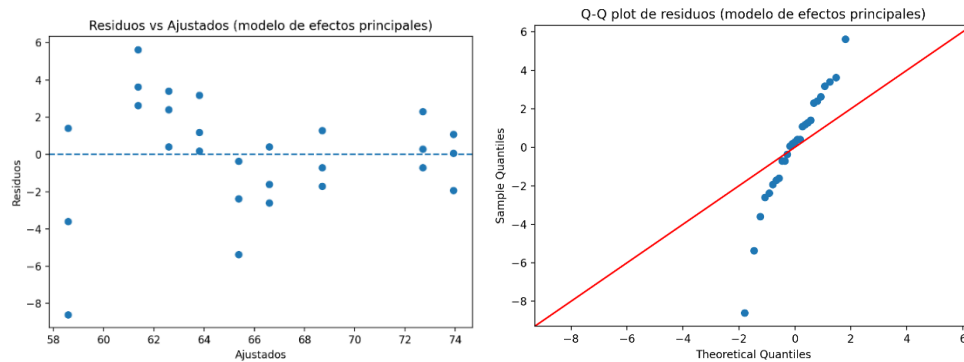
El análisis de la superficie de respuesta mostró que el valor máximo de biodegradabilidad se alcanza cuando el glicerol 0%(A1) y sorbitol.

Bajo estas condiciones, la biodegradabilidad fue de 71,8% evidenciando que la reducción del glicerol y el incremento del sorbitol favorecen la descomposición del biopolímero.

Este comportamiento puede atribuirse a que el sorbitol, al ser altamente hidrofílico, facilita la absorción de agua y la ruptura progresiva de la red polimérica, mientras que el exceso de glicerol tiende a generar matrices más estables y menos susceptibles a la degradación.

Se evaluaron los supuestos estadísticos del modelo de efectos principales (Figura 22).

**Figura 22**



Los gráficos de residuos vs valores ajustados y el gráfico Q-Q confirmaron visualmente la adecuación del modelo, validando la confiabilidad de los resultados estadísticos obtenidos.

Demostrando que la biodegradabilidad del biopolímero elaborado a partir de residuos de limón está significativamente influenciada por la formulación, siendo el glicerol y el sorbitol los factores más determinantes. La condición óptima identificada (0% glicerol y 20% sorbitol) maximiza la biodegradabilidad, confirmando la viabilidad del aprovechamiento de residuos cítricos para la producción de materiales biodegradables funcionales

## **Solubilidad**

El ensayo de solubilidad se realizó mediante una simulación de agua marina, siguiendo las directrices del estudio de Wayman, C., Niemann, H. (2021), quienes describen los principales mecanismos de degradación de los plásticos en ambientes marinos, destacando la fotodegradación

y la biodegradación. Para la simulación, se preparó una solución con 40 gramos de sal marina por litro de agua destilada. En cada ensayo se colocaron muestras de 2\*2 cm, correspondiente a los 9 tratamientos evaluados por triplicado.

Las muestras fueron mantenidas a temperatura ambiente, expuestas a la luz solar, y sometidas a agitaciones manuales cada 8 horas durante un periodo de 10 días. En las etapas iniciales del ensayo se observó una hinchazón marcada del material, acompañada de un aumento en la porosidad y una fragmentación progresiva, lo que evidenció el inicio del proceso de degradación en medio acuoso. Al finalizar el día 10, no se detectaron partículas sólidas visibles, registrándose únicamente una coloración amarillenta del medio.

Respecto al comportamiento por tratamiento, las formulaciones T1, T2, T3, T4, T7 presentaron una degradación más lenta, conservando fragmentos estructurales apreciables. En contraste, los tratamientos T5 y T6 mostraron una disolución completa, lo que indica una elevada susceptibilidad a la degradación en medio acuoso. Por su parte, los tratamientos T8 y T9 evidenciaron una disolución parcial, con presencia mínima de residuos sólidos.

Estos resultados confirman que el incremento en las concentraciones de glicerol y ácido cítrico favorece la hidrofiliidad del material, facilitando su degradación en ambientes acuosos, en concordancia con lo reportado por Wayman, C., Niemann, H. (2021).

La elaboración del polímero biodegradable a partir de la cáscara de limón (*Citrus limon*) permitió evaluar de forma integrada la influencia de los plastificantes y rigidizantes sobre la estructura, el comportamiento mecánico, actividad microbiológica y biodegradabilidad del material. En conjunto, los resultados demuestran que la combinación de factores del diseño experimental desempeñó un rol determinante en el desempeño final del biopolímero, confirmando tendencias previamente reportadas en la literatura para materiales derivados de residuos cítricos.

### **Análisis estadístico**

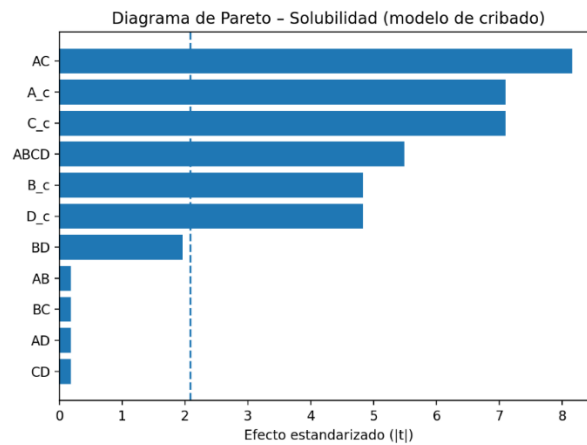
Los resultados mostraron que la solubilidad del biopolímero se ve significativamente influenciada por los factores evaluados ( $p < 0,05$ ), lo que evidencia que las modificaciones en la formulación alteran de manera directa la capacidad del material para disolverse en el medio de ensayo. Este comportamiento pone de manifiesto la sensibilidad de la matriz polimérica frente a las variaciones de plastificantes y agentes acidificantes.

El análisis estadístico evidenció que la interacción entre glicerol y sorbitol (AC), presentó el mayor efecto significativo sobre la solubilidad del biopolímero. Adicionalmente, los efectos principales del glicerol (A) y del sorbitol (C) resultaron estadísticamente significativos, lo que indica que la solubilidad del material está determinada principalmente por el balance entre ambos plastificantes.

De modo que el diagrama de Pareto permitió jerarquizar los efectos de los factores y sus combinaciones sobre la solubilidad. La interacción AC, seguida del efecto principal del glicerol (A) y del sorbitol (C), superó el umbral de significancia estadística, confirmando que estos factores son los principales responsables de las variaciones observadas en la solubilidad del biopolímero

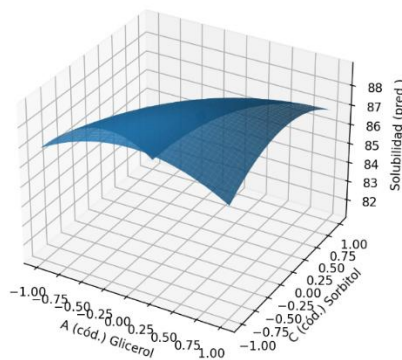
(Figura 23).

**Figura 23**



**Figura 24**

Superficie de respuesta - Solubilidad (A y C)



A partir de los factores más influyentes identificados, se desarrolló un modelo de superficie de respuesta considerando la cantidad de glicerol(A) y sorbitol (C), incorporando términos lineales.

La ecuación del modelo obtenido, expresadas en variables codificadas:

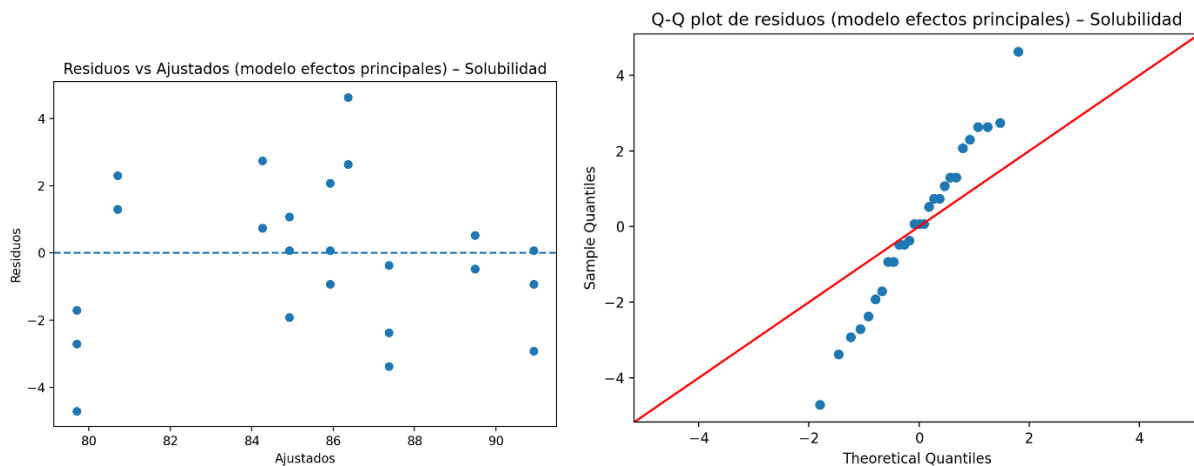
$$\hat{Y}=88.22+1.31A-1.31C+1.35AC-1.35A^2-1.35C^2$$

El análisis de la superficie de respuesta evidenció que el máximo valor de solubilidad se alcanza con niveles intermedios de glicerol y bajos a intermedios de sorbitol, obteniéndose un valor máximo de 88,6.

En términos reales de formulación, la condición óptima corresponde aproximadamente a glicerol 20%, sorbitol 7%, resultados que indican que un aumento moderado de glicerol favorece la solubilidad del biopolímero, mientras que concentraciones elevadas de sorbitol tienden a reducirla posiblemente debido a una mayor cohesión interna de la matriz polimérica.

La validez del modelo estadístico fue evaluada mediante el análisis de los supuestos de normalidad, homogeneidad de varianza e independencia de los errores. La prueba de Shapiro- Wilk confirmó la normalidad de los residuos, mientras que las pruebas de Breush-Pagan y Levene evidenciaron homocedasticidad entre los tratamientos (Figura 25).

**Figura 25**



El gráfico de residuos frente a valores ajustados y el gráfico Q-Q respaldaron visualmente estos resultados, validando la confiabilidad del modelo aplicado para la variable solubilidad.

Los resultados obtenidos demuestran que la solubilidad del biopolímero elaborado a partir de residuos de limón está determinada principalmente por el equilibrio entre plastificantes incorporados en la formulación. El glicerol favorece la afinidad del material por el agua, promoviendo su disolución, mientras que concentraciones elevadas de sorbitol tienden a generar una estructura más densa y, en consecuencia, menos soluble.

La solubilidad constituye un parámetro clave para establecer las posibles aplicaciones del biopolímero, particularmente en sistemas que requiere una rápida dispersión en medios acuosos o, en contraste, una mayor estabilidad frente al contacto prolongado con el agua.

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

Los análisis fisicoquímicos de los residuos de limón (*Citrus\*meyeri M*) evidenciaron un contenido significativo de fibra y pectina, así como valores adecuados de pH, acidez titulable, humedad y sólidos solubles, propios de frutos en estado de madurez comercial. Estos resultados confirman que la cáscara de limón constituye una materia prima técnicamente viable para la formación de matrices poliméricas, favoreciendo su aprovechamiento dentro de esquemas de economía circular y valorización de residuos agroindustriales.

Se logro elaborar un polímero biodegradable a partir de residuos de limón mediante un diseño factorial fraccionado, obteniéndose películas homogéneas. La variación en las concentraciones de plastificantes y rigidizantes influyo de manera directa en la estructura del material, permitiendo identificar formulaciones con equilibrio entre plasticidad y rigidez, lo que demuestra la factibilidad técnica del proceso de obtención del biopolímero a partir de residuos cítricos.

La evaluación de las propiedades del biopolímero evidencio que la formulación condiciona significativamente su comportamiento mecánico, microbiológico y biodegradable. Los tratamientos T1 y T6 presentaron los mayores valores de resistencia a la tracción, mientras que la biodegradabilidad estuvo principalmente influenciada por el balance entre glicerol y sorbitol, alcanzando valores superiores al 70% en suelo. Asimismo, se observó actividad antibacteriana y antifúngica localizada en formulaciones específicas, confirmando que el polímero desarrollado posee propiedades funcionales que lo posicionan como una alternativa sostenible frente a materiales convencionales de origen sintético.

## **5.2 Recomendaciones**

Aplicar los conocimientos de este estudio para optimizar la formulación del biopolímero y evaluar sus posibles aplicaciones.

Posteriores estudios deberán observar el tamaño de partículas de manera microscópica y analizar el suelo al final de la descomposición completa para verificar qué componentes cambiaron.

Evaluar a nivel planta piloto la extracción de pectina con equipos de control preciso de temperatura para optimizar tiempo.

Valorizar integralmente los residuos cítricos, considerando su potencial en pectina, para transformarlos en insumos útiles bajo un enfoque de economía circular.

Implementar el proceso en una planta piloto para evaluar su viabilidad técnica y económica a mayor escala, sentando las bases para una futura producción comercial.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adnan, M., Siddiqui, AJ, Ashraf, SA, Snoussi, M., Badraoui, R., Ibrahim, AM, Alreshidi, MM, Sachidanandan, M. y Patel, M. (2023). Caracterización y optimización de procesos para la producción mejorada de polímero biodegradable basado en polihidroxibutirato (PHB) a partir de *Bacillus flexus* aislado de vertederos de residuos sólidos urbanos. *Polímeros*, 15 .
- Álvaro Aedo San Martín. (2021). *Medición de Color de frutas (manzana verde, limón y mandarina) en distinto grado de madurez*. [https://www.academia.edu/118701419/Medici%C3%B3n\\_de\\_Color\\_de\\_frutas\\_manzana\\_verde\\_lim%C3%B3n\\_y\\_mandarina\\_en\\_distinto\\_grado\\_de\\_madurez](https://www.academia.edu/118701419/Medici%C3%B3n_de_Color_de_frutas_manzana_verde_lim%C3%B3n_y_mandarina_en_distinto_grado_de_madurez)
- Alcaide, M., Collado, C., & Sancho, J. (2020). Bioplástico degradable. *Ingenia Materiales*, 0(2), 9–13. [https://polired.upm.es/index.php/ingenia\\_materiales/article/view/4424](https://polired.upm.es/index.php/ingenia_materiales/article/view/4424)
- Azeredo, H. M. C. (2023). Bioplastics from orange processing byproducts by an ecoefficient hydrothermal approach. *Food Packaging and Shelf Life*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101114>
- AOAC (2019) Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists Official Methods of Analysis of AOAC International. 21st Edition, AOAC, Washington DC. - References - Scientific Research Publishing. (n.d.). Wwww.scirp.org. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2939092*
- Azeredo, H. C., Mattoso, L. C., & McHugh, T. H. (2011). Nanocomposites in food packaging—a review. *Advances in diverse industrial applications of nanocomposites*, 57-78.
- Basiak, E., Lenart, A., & Debeaufort, F. (2018). How glycerol and water contents affect the structural and functional properties of starch-based edible films. *Polymers*, 10(4), 412.
- Bedoya S., Gil Amar S., Barrera R., Ardila A & Arriola E.(2022). Escenario técnico y económico

para la valorización integral a pequeña escala de residuos de naranja en Colombia.  
<http://dx.doi.org/10.14483/23448393.17783>

Belkheiri, A., Forouhar, A., Ursu, A. V., Dubessay, P., Pierre, G., Delattre, C., ... & Michaud, P. (2021). Extraction, characterization, and applications of pectins from plant by-products. *Applied Sciences*, 11(14), 6596.

Bertello, F. (2017, September 29). *Por una cuestión de color, el limón argentino recién podrá entrar a EE.UU. en 2018.* LA NACION.  
<https://www.lanacion.com.ar/economia/campo/por-una-cuestion-de-color-el-limon-argentino-recien-podra-entrar-a-eeuu-en-2018-nid2067581/>

*Biodegradabilidad y compostabilidad – Ecozema.* (2020). Ecozema.com.  
<https://www.ecozema.com/es/biodegradabilidad-y-compostabilidad/>

Guest. (2022). *Datos de Yuyucocha - PDFCOFFEE.COM.* Pdfcoffee.com;  
PDFCOFFEE.COM. <https://pdfcoffee.com/datos-de-yuyucocha-5-pdf-free.html>  
Jara Ramirez, V. N., Ocaña Gonzales, Z. I., Lizarzaburu-Aguinaga, D., Ccuro, F. M., Pérez,

H. R., & Benites-Alfaro, E. (2023). Circular Economy: Use of Fruit Waste to Obtain Bioplastics. *Chemical Engineering Transactions*, 100, 103–108.  
<https://doi.org/10.3303/CET23100018>

Jumbo, L. D. J., Tenezaca, C. M. C., Parco, S. P. V., & Vargas, G. M. C. (2024). Determinación de la Acidez Titulable en Cítricos Amazónicos: Correlación con la Madurez y la Susceptibilidad a la Pudrición. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(2), 2441-2451.

Kader, A. A. (2008). Flavor quality of fruits and vegetables. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88(11), 1863-1868.

- Karan, H., Funk, C., Grabert, M., Oey, M., & Hankamer, B. (2019). Green Bioplastics as Part of a Circular Bioeconomy. *Trends in plant science*, 24(3), 237–249. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.010>
- Kim, J., & Kim, M. (2016). The potential use of citrus juice waste as sources of natural phenolic antioxidants. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 202–205. <https://doi.org/10.7324/japs.2016.601230>
- Kharb, J., & Saharan, R. (2023). Design and synthesis of eco-friendly cucumber peel-based bioplastic materials. *Materials Today: Proceedings*, 82, 123–128. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.12.109>
- Kharb, J., & Saharan, R. (2024). Development of biodegradable and eco-friendly fruit peel-derived bioplastic film with antibacterial potential for food packaging application. *Biomass Conversion and Biorefinery*.
- Mahato, N., Sharma, K., Koteswararao, R., Sinha, M., Baral, E. y Cho, MH (2017). Aceites esenciales de cítricos: Extracción, autenticación y aplicación en la conservación de alimentos. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59 (4), 611–625. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1384716>
- Masaya Kato, Yoshinori Ikoma, Hikaru Matsumoto, Minoru Sugiura, Hiroshi Hyodo, Masamichi Yano, Accumulation of Carotenoids and Expression of Carotenoid Biosynthetic Genes during Maturation in Citrus Fruit, *Plant Physiology*, Volume 134, Issue 2, February 2004, Pages 824–837, <https://doi.org/10.1104/pp.103.031104>
- Mahato, N., Sharma, K., Sinha, M., Baral, E. R., Koteswararao, R., Dhyani, A., Hwan Cho, M., & Cho, S. (2020). Bio-sorbents, industrially important chemicals and novel materials from citrus processing waste as a sustainable and renewable bioresource: A review. *Journal of advanced research*, 23, 61–82.

Medina, V. (2007). *UNIVERSIDAD TECNICA DEL NORTE FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES ESCUELA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL LIMÓN MEYER (Citrus limon) Tesis de Grado como Requisito para obtener el Título de Ingeniero Agroindustrial.* <https://repositorio.utn.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/421/1/03%20AGI%20205%20TESIS.pdf>

Merino, D., Quilez-Molina, A. I., Perotto, G., Bassani, A., Spigno, G., & Athanassiou, A. (2022). A second life for fruit and vegetable waste: a review on bioplastic films and coatings for potential food protection applications. In *Green Chemistry* (Vol. 24, Issue 12, pp. 4703–4727). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d1gc03904k>

Mexpolimeros. (2024). *Ensayo de tracción*. Polímeros Termoplásticos, Elastómeros Y Aditivos. <https://www.mexpolimeros.com/modulo%20de%20traccion.html>

Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (2020). Ecuador impulsa la gestión adecuada de residuos orgánicos en las ciudades. Quito Ecuador. <https://www.ambiente.gob.ec/ecuador-impulsa-la-gestion-adeuada-de-residuos-organicos-en-las-ciudades/>

Muñoz M., Santo R., Cárdenas T. (2019). Residuos sólidos urbanos en la ciudad del Carmen, Manabí, Ecuador. Análisis del Sistema de Gestión. *Revista Dominio de las ciencias*, 702-713. <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v5i2.1120>

Nielsen, S. S. (2017). Moisture content determination. In *Food analysis laboratory manual* (pp. 105-115). Cham: Springer International Publishing.

Patel, M.V., Islam, S., Kallem, P., Patel, R.H., Banat, F., & Patel, A. (2022). Potato starch-based

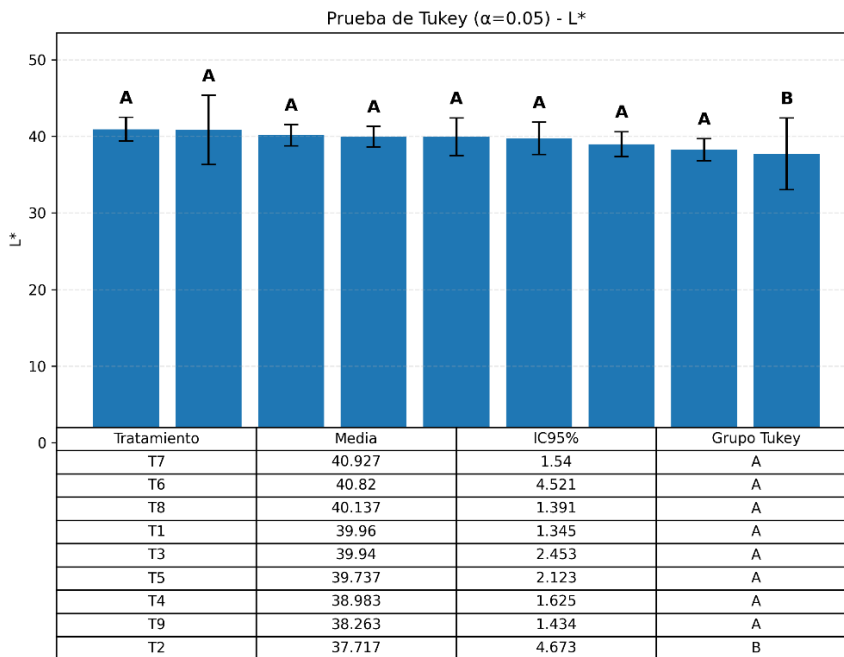
- bioplastics synthesized using glycerol–sorbitol blend as a plasticizer: characterization and performance analysis. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20, 7843-7860.
- Pérez-Vergara, L. D., Cifuentes, M. T., Franco, A. P., Pérez-Cervera, C. E., & Andrade-Pizarro, R. D. (2020). Development and characterization of edible films based on native cassava starch, beeswax, and propolis. *NFS Journal*, 21, 39-49.
- Rhim, J. W., Park, H. M., & Ha, C. S. (2013). Bio-nanocomposites for food packaging applications. *Progress in polymer science*, 38(10-11), 1629-1652.
- Rodrigo, M. J., Marcos, J. F., & Zacarías, L. (2004). Biochemical and molecular analysis of carotenoid biosynthesis in flavedo of orange (*Citrus sinensis* L.) during fruit development and maturation. *Journal of agricultural and food chemistry*, 52(22), 6724–6731. <https://doi.org/10.1021/jf049607f>
- Santiago, B., Moreira, M. T., Feijoo, G., & González-García, S. (2020). Identification of environmental aspects of citrus waste valorization into D-limonene from a biorefinery approach. *Biomass and Bioenergy*, 143, 105844. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105844>
- Santos, L. B., Silva, R. D., Alonso, J. D., Brienza, M., Silva, N. C., Perotto, G., Otoni, C. G., & Suri, S., Singh, A., & Nema, P. K. (2021). Recent advances in valorization of citrus fruits processing waste: a way forward towards environmental sustainability. *Food science and biotechnology*, 30(13), 1601–1626. <https://doi.org/10.1007/s10068-021-00984-y>
- SEO. (2024, May 14). *Diferencias entre fungicidas y bactericidas - IQV Matholding Group*. IQV Matholding Group. <https://iqvagro.com/diferencia-entre-fungicida-y-bactericida/>
- Siracusa, V., Rocculi, P., Romani, S., & Rosa, M.D. (2008). Biodegradable polymers for food packaging: a review. *Trends in Food Science and Technology*, 19, 634-643.

- Sothornvit, R., & Krochta, J. M. (2005). Plasticizers in edible films and coatings. In *Innovations in food packaging* (pp. 403-433). Academic Press.
- Thakur, V.K., Thakur, M.K., & Gupta, R.K. (2014). Review: Raw Natural Fiber-Based Polymer Composites. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 19, 256 - 271.
- Thompson, R. C., Swan, S. H., Moore, C. J., & vom Saal, F. S. (2009). Our plastic age. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1973–1976. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0054>
- Toyo-Diaz, M. J., Toyo-Fernández, B. M., & Moreno-Quintero, M. E. (2023). Extracción de pectina a partir de cáscara de cambur para la producción de una mermelada. *Agroecología Global. Revista Electrónica de Ciencias del Agro y Mar*, 5(9), 21-42.
- Twinomuhwezi, H., Godswill, AC y Kahunde, D. (2020). Extracción y caracterización de pectina de naranja (*Citrus sinensis*), limón (*Citrus limon*) y mandarina (*Citrus tangerina*). *American Journal of Physical Sciences*, 1 (1), 17–30. <https://doi.org/10.47604/ajps.1049>
- Voragen, A. G., Coenen, G. J., Verhoef, R. P., & Schols, H. A. (2009). Pectin, a versatile polysaccharide present in plant cell walls. *Structural chemistry*, 20(2), 263-275.
- Wu, C., Wang, L., Hu, Y., Chen, S., Liu, D., & Ye, X. (2016). Edible coating from citrus essential oil-loaded nanoemulsions: physicochemical characterization and preservation performance. *RSC advances*, 6(25), 20892-20900.
- Yaradoddi, J. S., Banapurmath, N. R., Ganachari, S. V., Soudagar, M. E. M., Sajjan, A. M., Kamat, S.,...Ali, M. A. (2022). Bio-based material from fruit waste of orange peel for industrial

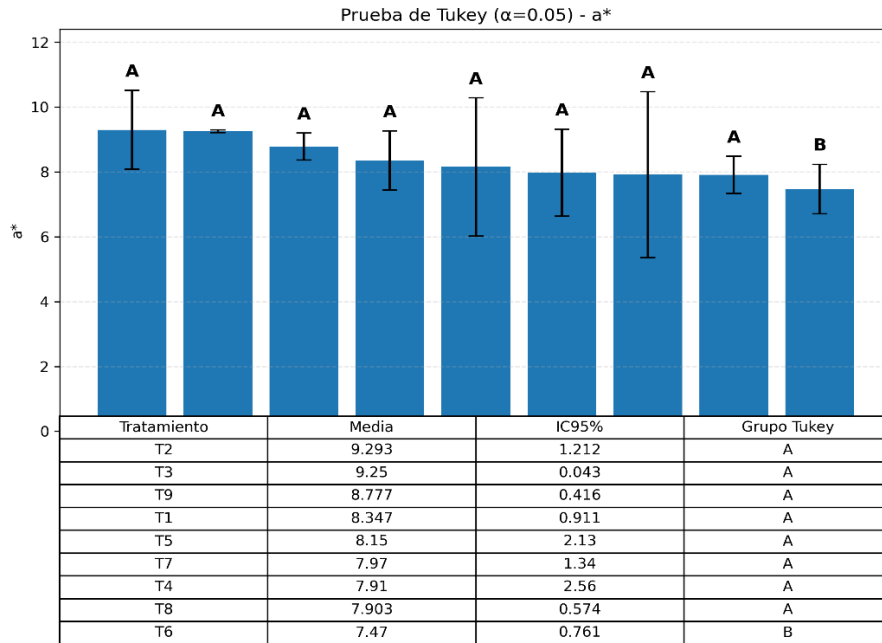
applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 3186-3197.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.016>

## ANEXOS

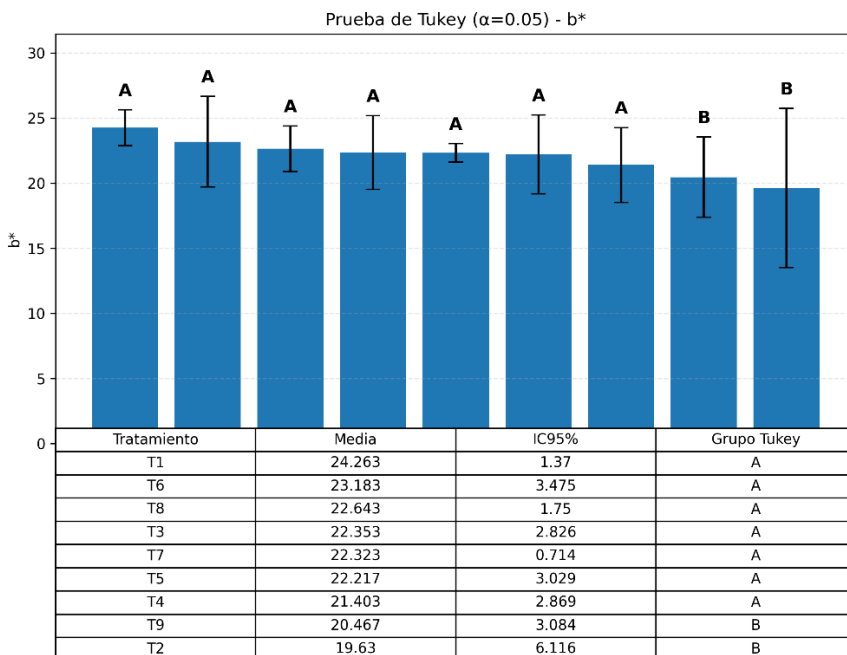
### *Anexo 1. Prueba de Tukey L\**



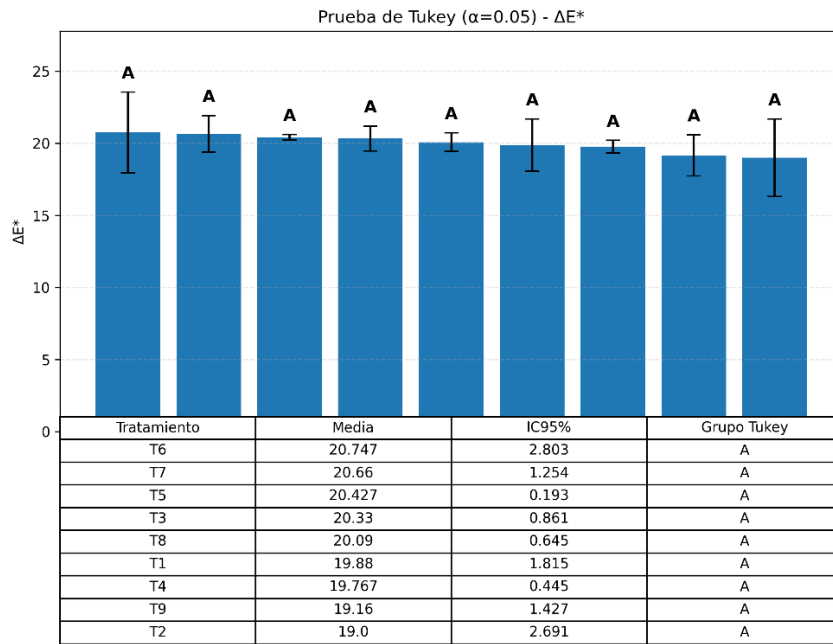
### *Anexo 2. Tukey a\**



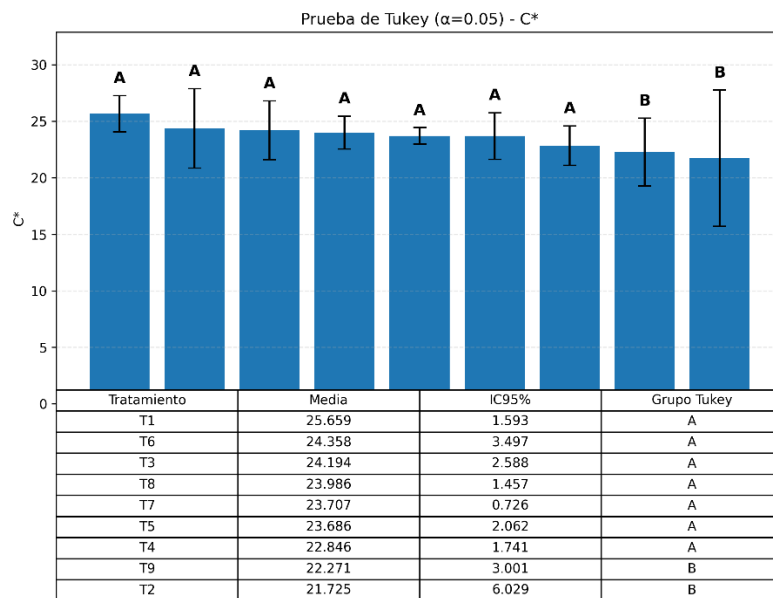
### Anexo 3. Tukey b\*



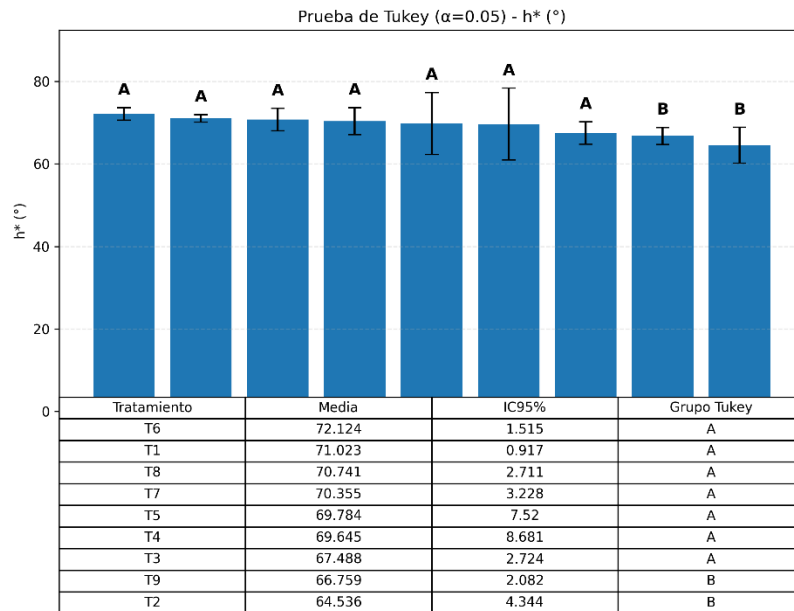
### Anexo 4. Tukey $\Delta E$



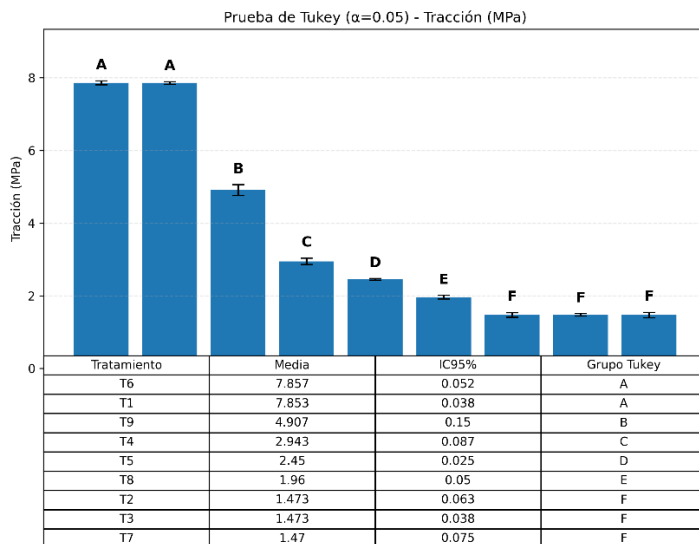
### Anexo 5. Prueba Tukey $C^*$



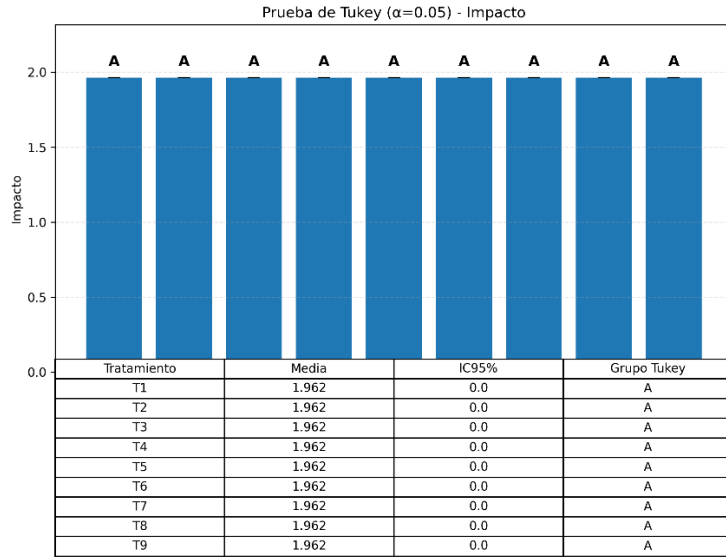
### Anexo 6. Tukey h\*



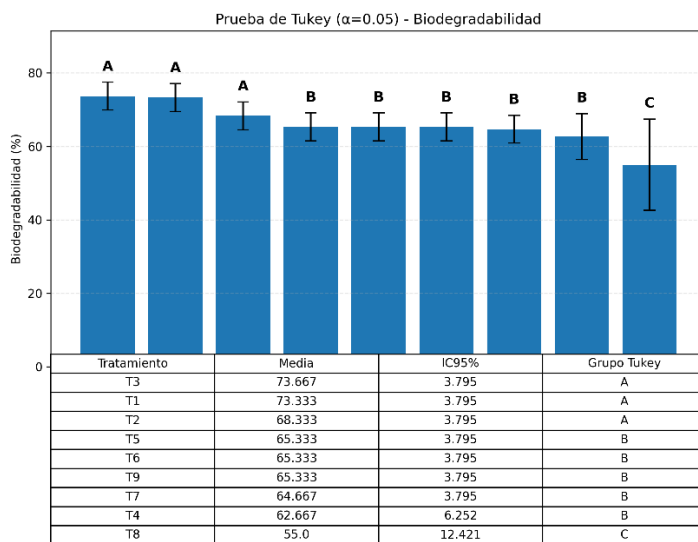
### Anexo 7. Prueba de Tukey tracción



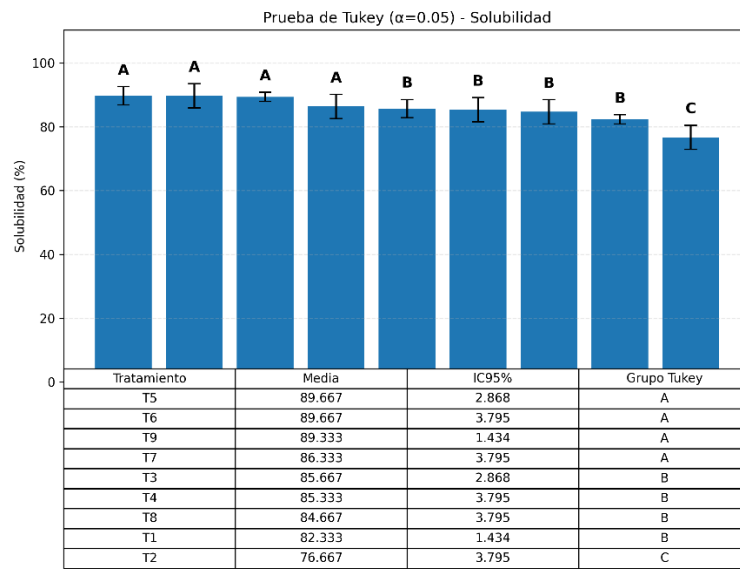
### Anexo 8. Prueba Tukey Impacto



### Anexo 9. Prueba Tukey Biodegradabilidad



## Anexo 10. Prueba Tukey solubilidad



## Anexo 11. Certificado de análisis

