



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

Influencia de la proporción de almidón de maíz (*Zea mays L.*) y residuo de yuca (*Manihot esculenta*), temperatura y tipo de aditivo en la obtención de bioplástico.

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTADO POR

Bach. Castillo Ferrer Giomar Mikail

ASESOR:

M.Sc. Julio Humberto Tirado Vásquez

orcid.org/0000-0002-2274-5543

LAMBAYEQUE-PERÚ

2026



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

UNIDAD DE INVESTIGACION

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

Influencia de la proporción de almidón de maíz (*Zea mays L.*) y residuo de yuca (*Manihot esculenta*), temperatura y tipo de aditivo en la obtención de bioplástico.

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTADO POR

Bach. Castillo Ferrer Giomar Mikail

APROBADO POR EL SIGUIENTE JURADO:

Dra. Tarcila Amelia Cabrera Salazar

PRESIDENTE

Dr. Carlos Reinerio Arce Cruzado

SECRETARIO

Dr. Ronald Alfonso Gutiérrez Moreno

VOCAL

M.Sc. Julio Humberto Tirado Vásquez

ASESOR



ACTA DE SUSTENTACIÓN - 2026

Siendo las 11:00 am del miércoles 20 de mayo del 2026, se reunieron en la sala de sustentación de la Facultad de Ingeniería Química e Industrias Alimentarias los miembros del jurado evaluador de la Tesis Titulada: **Influencia de la proporción de almidón de maíz (*Zea mays* L.) y residuo de yuca (*Manihot esculenta*), temperatura y tipo de aditivo en la obtención de bioplástico**; designados con Res. N°167-2025-D-FIQIA de fecha 13 de mayo del 2025 y aprobada con Res. N°331-2025-D-FIQIA de fecha 25 de julio del 2025, con la finalidad de Evaluar y Calificar la sustentación de la tesis antes mencionada, conformados por los siguientes docentes:

- **Presidente:** Dra. Tarcila Amelia Cabrera Salazar
- **Secretario:** Dr. Carlos Reinerio Arce Cruzado
- **Vocal:** Dr. Ronald Alfonso Gutiérrez Moreno

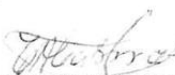
La tesis fue asesorada por el M.Sc. Julio Humberto Tirado Vásquez, nombrado con Resolución N°016-2025-D-FIQIA de fecha 20 de enero del 2025. El acto de sustentación es autorizado con Res. N°159-2026-D-FIQIA de fecha 18 de mayo del 2026.

La Tesis fue presentada y sustentada por el Bachiller: **GIOMAR MIKAIL CASTILLO FERRER; de la Escuela Profesional de Ingeniería Química** y tuvo una duración de 30 minutos.

Después de la sustentación, y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado; se procedió a la calificación respectiva, otorgándole el calificativo de 18 (dieciocho) en la escala vigesimal, mención MUY BUENO.

Por lo que queda APTO para obtener el Título Profesional de **INGENIERO QUIMICO** de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ingeniería Química e Industrias Alimentarias y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Siendo las 12:00 p.m. se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto, con la firma de los miembros del jurado.

Firmas


.....
Presidente
Dra. Tarcila Amelia Cabrera Salazar


.....
Vocal
Dr. Ronald Alfonso Gutiérrez Moreno


.....
Secretario
Dr. Carlos Reinerio Arce Cruzado


.....
Asesor
M.Sc. Julio Humberto Tirado Vásquez

CONSTANCIA DE VERIFICACION DE ORIGINALIDAD

Yo JULIO HUMBERTO TIRADO VASQUEZ usuario revisor de TESIS

☒

Trabajo de Suficiencia Profesional y/o ☐ Trabajo académico ☐

Titulada: Influencia de la proporción de almidón de maíz (*Zea mays L.*) y residuo de yuca (*Manihot esculenta*), temperatura y tipo de aditivo en la obtención de bioplástico.

Cuyo autor Giomar Mikail Castillo Ferrer; con DNI N° 71576799; declaro que la evaluación realizada por el Programa informático ha arrojado un porcentaje de similitud 17.0 %, verificables en el Resumen del Reporte automatizado de similitudes que se acompaña.

El suscrito (a) analizó reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas dentro del porcentaje de similitud permitido no constituyen plagio y que el documento cumple con la integridad científica y con las normas para el uso de citas y referencias establecidas en los protocolos respectivos, Se cumple con adjuntar el Recibo Digital a efectos de la trazabilidad respectiva del proceso.

Lambayeque, 04 Marzo de 2026



Firma (Asesor)

Nombres y Apellidos: Julio Humberto Tirado Vásquez

DNI: 16675190

Defina la modalidad con (X)

Adjunta:

Resumen de Reporte automatizado de similitudes

Recibo digital

Influencia de la proporción de almidón de maíz (*Zea mays* L.) y residuo de yuca (*Manihot esculenta*), temperatura y tipo de aditivo en la obtención de bioplástico.

INFORME DE ORIGINALIDAD

17%

INDICE DE SIMILITUD

16%

FUENTES DE INTERNET

9%

PUBLICACIONES

8%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	1%
2	repositorio.unprg.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	"Migración intrametropolitana y movilidad social : reproducción de clases sociales, capital simbólico y procesos de segregación en la producción del espacio en el Gran Concepción", Pontificia Universidad Catolica de Chile, 2020 Publicación	1%
4	repositorio.unah.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	Submitted to Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López Trabajo del estudiante	1%
7	Submitted to Universidad Tecnologica de los Andes Trabajo del estudiante	<1%
8	Submitted to Universidad Ricardo Palma Trabajo del estudiante	<1%

M. Sc. Julio Humberto Tirado Vásquez
Asesor
DNI N° 16675190

9	uceva.repositoriodigital.com Fuente de Internet	< 1 %
10	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	< 1 %
11	repositorio.upsc.edu.pe Fuente de Internet	< 1 %
12	repositorio.upt.edu.pe Fuente de Internet	< 1 %
13	repositorio.uniscjsa.edu.pe Fuente de Internet	< 1 %
14	www.tdx.cat Fuente de Internet	< 1 %
15	es.scribd.com Fuente de Internet	< 1 %
16	repositorio.uceva.edu.co Fuente de Internet	< 1 %
17	repositorio.unapiquitos.edu.pe Fuente de Internet	< 1 %
18	Submitted to Universidad Nacional de Cajamarca Trabajo del estudiante	< 1 %
19	Submitted to Universidad Alas Peruanas Trabajo del estudiante	< 1 %
20	repository.usta.edu.co Fuente de Internet	< 1 %
21	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	< 1 %
22	repositorio.unac.edu.pe Fuente de Internet	< 1 %
	moam.info	



M. Sc. Julio Humberto Tirado Vásquez
Asesor
DNI N° 16675190

23	Fuente de Internet	< 1 %
24	hdl.handle.net Fuente de Internet	< 1 %
25	Submitted to Colegio San Jorge de Miraflores SCRL Trabajo del estudiante	< 1 %
26	repositorio.uchile.cl Fuente de Internet	< 1 %
27	pdffox.com Fuente de Internet	< 1 %
28	www.mineduc.gob.gt Fuente de Internet	< 1 %
29	www.reincisol.com Fuente de Internet	< 1 %
30	renati.sunedu.gob.pe Fuente de Internet	< 1 %
31	dokumen.pub Fuente de Internet	< 1 %
32	www.coursehero.com Fuente de Internet	< 1 %
33	dspace.ucuenca.edu.ec Fuente de Internet	< 1 %
34	Cruz Canales, Giuliana Milagros De L Villanueva, Luis Eduardo Benites Ramirez, Teresita del Carmen Zapata. "Calidad En El Servicio Del Trade Marketing a Las Bodegas De Lima Metropolitana, En El Sector De Consumo Masivo Para El Rubro De chocolateria", Pontificia Universidad Catolica del Peru - CENTRUM Catolica (Peru), 2021 Publicación	< 1 %



M. Sc. Julio Humberto Tirado Vásquez
Asesor
DNI N° 16675190

35	dspace.utb.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
36	revistas.upt.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
37	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
38	Ocampo, Arnovi Trejos. "Competencias Financieras: Un Estudio Comparativo Entre Adventistas de Origen Anglosajón e Hispano de la Asociación del Gran Nueva York", Universidad de Montemorelos (Mexico) Publicación	<1 %
39	Submitted to Universidad Tecnológica del Peru Trabajo del estudiante	<1 %
40	repositorio.umsa.bo Fuente de Internet	<1 %
41	revistarrancada.cujae.edu.cu Fuente de Internet	<1 %
42	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1 %
43	dspace.udla.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
44	repositorio.isil.pe Fuente de Internet	<1 %
45	Submitted to Universidad Andrés Bello Trabajo del estudiante	<1 %
46	repositorio.uide.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
47	repositorio.untumbes.edu.pe Fuente de Internet	<1 %



M. Sc. Julio Humberto Tirado Vásquez
Asesor
DNI N° 16675190

48	Marilyn Del Rosario Huamán Changa, Talia Mayra Rodríguez Gozar, David Díaz Garamendi. "Comparación de propiedades físicas y mecánicas del hormigón tradicional y el hormigón con fibras metálicas recicladas", Gaceta Técnica, 2022 Publicación	<1 %
49	Submitted to Universidad del Desarrollo Trabajo del estudiante	<1 %
50	dspace.ups.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
51	repositorio.uta.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
52	Submitted to Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo Trabajo del estudiante	<1 %
53	Submitted to Universidad Tecnológica Indoamerica Trabajo del estudiante	<1 %
54	www.grafiati.com Fuente de Internet	<1 %
55	rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com Fuente de Internet	<1 %
56	uvadoc.uva.es Fuente de Internet	<1 %
57	repositorio.utea.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
58	rpp.pe Fuente de Internet	<1 %
59	Submitted to Universidad Internacional de la Rioja	<1 %



M. Sc. Julio Humberto Tirado Vásquez
Asesor
DNI N° 16675190

60	repositorio.unheval.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
61	Submitted to Universidad San Ignacio de Loyola	<1%
	Trabajo del estudiante	
62	www.colibri.udelar.edu.uy	<1%
	Fuente de Internet	
63	www.conftool.pro	<1%
	Fuente de Internet	
64	www.educarm.es	<1%
	Fuente de Internet	
65	Rodríguez Ramos, Rogel. "Planeación Estratégica y Cumplimiento de la Misión Como Predictores del Desempeño Financiero en Empleados Financieros de las Instituciones de la Unión Mexicana Interoceánica", Universidad de Montemorelos (Mexico), 2025	<1%
	Publicación	
66	Submitted to Universidad Rey Juan Carlos	<1%
	Trabajo del estudiante	
67	Valdez Molina, Elsa Paola Saca Aquino, Ishair Guevara Garcia, Jhon Franco Aybar Galdos, Josue Alcibiades. "Calidad en el servicio al cliente en el transporte publico urbano en la provincia del Cusco.", Pontificia Universidad Catolica del Peru - CENTRUM Catolica (Peru), 2020	<1%
	Publicación	
68	ciencialatina.org	<1%
	Fuente de Internet	
69	dialnet.unirioja.es	<1%
	Fuente de Internet	



M. Sc. Julio Humberto Tirado Vásquez
Asesor
DNI N° 16675190

		< 1 %
70	dspace.uazuay.edu.ec Fuente de Internet	< 1 %
71	pt.scribd.com Fuente de Internet	< 1 %
72	repositorio.ucundinamarca.edu.co Fuente de Internet	< 1 %
73	vitela.javerianacali.edu.co Fuente de Internet	< 1 %
74	www.oepm.es Fuente de Internet	< 1 %
75	Submitted to BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA BIBLIOTECA Trabajo del estudiante	< 1 %
76	www.investigacionistct.ec Fuente de Internet	< 1 %
77	hemeroteca.unad.edu.co Fuente de Internet	< 1 %
78	inba.info Fuente de Internet	< 1 %
79	ojs.studiespublicacoes.com.br Fuente de Internet	< 1 %
80	repositorio.unam.edu.pe Fuente de Internet	< 1 %
81	Jaume Gómez Caturla. "Desarrollo y caracterización de polímeros de alto rendimiento medioambiental derivados de residuos agroindustriales y aditivos de origen renovable", Universitat Politècnica de Valencia, 2024	< 1 %



M. Sc. Julio Humberto Tirado Vásquez
Asesor
DNI N° 16675190

82	Submitted to Leiden University Trabajo del estudiante	<1 %
	Niah Holtz, R Craig Albertson. " Variable craniofacial shape and development among multiple cave-adapted populations of ", Integrative Organismal Biology, 2024 Publicación	<1 %
	Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru Trabajo del estudiante	<1 %
85	cia.uagraria.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
86	repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
87	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
88	riunet.upv.es Fuente de Internet	<1 %
	Submitted to Universidad Nacional Agraria La Molina Trabajo del estudiante	<1 %
	Submitted to Universidad Politecnica Salesiana del Ecuador Trabajo del estudiante	<1 %
91	helvia.uco.es Fuente de Internet	<1 %
92	repositorio.upeu.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
93	repositorio.upla.edu.pe Fuente de Internet	<1 %



M. Sc. Julio Humberto Tirado Vásquez
Asesor
DNI N° 16675190

94	Submitted to uncedu	<1 %
	Trabajo del estudiante	
95	www.repositorio.usac.edu.gt	<1 %
	Fuente de Internet	
96	www.slideshare.net	<1 %
	Fuente de Internet	

Excluir citas	Activo	Excluir coincidencias	< 15 words
Excluir bibliografía	Activo		



M. Sc. Julio Humberto Tirado Vásquez
Asesor
DNI N° 16675190



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación, podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Giomar Castillo
Título del ejercicio: Quick Submit
Título de la entrega: Influencia de la proporción de almidón de maíz (Zea mays L.) y...
Nombre del archivo: 05.02_INFORME_GIOMAR.pdf
Tamaño del archivo: 2.19M
Total páginas: 112
Total de palabras: 26,617
Total de caracteres: 147,220
Fecha de entrega: 04-mar-2026 10:32a. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2894239807



UNIVERSIDAD NACIONAL
PEDRO RUIZ GALLO



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

TÍTULO

Influencia de la proporción de almidón de maíz (Zea mays L.) y...
de peso (Muestra estándar, temperatura y tipo de aditivo en la obtención de
bioplásticos)

PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTADO POR

Giomar Castillo (Carné N° 10000000000000000000)

ASERVO

M. Sc. Julio Humberto Tirado Vázquez
asesor@unp.edu.pe 0984 2074 0040

LA ENTREGA SE RECIBIÓ
2894239807



M. Sc. Julio Humberto Tirado Vázquez
Asesor
DNI N° 16675190

Índice de contenido

Índice de contenido	iii
Índice de tablas	xvii
Índice de figuras	xix
RESUMEN	xx
ABSTRACT	xxii
INTRODUCCIÓN	9
1. DISEÑO TEÓRICO	13
1.1. Antecedentes	13
1.2. Bases teóricas.....	18
1.3. Bases conceptuales	25
2. DISEÑO METODOLÓGICO.....	28
2.1. Diseño de contrastación de hipótesis.....	28
2.2. Técnicas, instrumentos, equipos, materiales	36
2.2.2. Técnicas de recolección de datos	36
2.2.3. Instrumentos de recolección.....	37
2.2.4. Procedimiento.....	39
2.2.5. Método de análisis de datos	42
3. RESULTADOS.....	43
4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	96
5. PROPUESTA DE INTERVENCIÓN	100
6. CONCLUSIONES	102
7. RECOMENDACIONES	103
8. REFERENCIAS.....	104
9. ANEXOS	109

Índice de tablas

Tabla 1 Matriz de operacionalización de variables	26
Tabla 2 Tratamientos experimentales variando temperaturas	30
Tabla 3 Formulación de muestras	43
Tabla 4 Prueba de ANOVA para la Resistencia a la Tracción	44
Tabla 5 Prueba HSD Tukey para la Resistencia a la Tracción	45
Tabla 6 Subconjuntos homogéneos – HSD de Tukey para la Resistencia de Tracción	46
Tabla 7 Prueba de ANOVA para la Elongación	47
Tabla 8 Prueba HSD Tukey para la Elongación	47
Tabla 9 Subconjuntos homogéneos – HSD de Tukey para la Elongación.....	48
Tabla 10 Prueba ANOVA para el Módulo Elasticidad	49
Tabla 11 Prueba HSD Tukey para Modulo Elasticidad	50
Tabla 12 Subconjuntos homogéneos – HSD de Tukey para el Módulo Elasticidad	51
Tabla 13 Prueba de ANOVA de Solubilidad en agua	52
Tabla 14 Prueba HSD Tukey para Solubilidad en agua.....	53
Tabla 15 Subconjuntos homogéneos – HSD de Tukey para Solubilidad en agua...	54
Tabla 16 Prueba de ANOVA de Densidad	55
Tabla 17 Prueba HSD Tukey para Densidad	56
Tabla 18 Subconjuntos homogéneos – HSD de Tukey para Densidad	57
Tabla 19 Resumen del modelo para la Resistencia a la Tracción	58
Tabla 20 Prueba de Anova	59
Tabla 21 Coeficientes para la Resistencia a la Tracción	60
Tabla 22 Diagnósticos de Colinealidad para la Resistencia de Tracción.....	61
Tabla 23 Resumen del modelo para la Elongación	62
Tabla 24 Prueba de ANOVA.....	63
Tabla 25 Coeficientes para la Elongación.....	63
Tabla 26 Diagnósticos de Colinealidad para la Elongación	64
Tabla 27 Resumen del modelo para el Módulo Elasticidad	65
Tabla 28 Prueba de ANOVA.....	66
Tabla 29 Coeficientes para el Módulo Elasticidad	67
Tabla 30 Diagnósticos de Colinealidad para el Módulo Elasticidad	68
Tabla 31 Resumen del modelo para la Solubilidad en Agua	68

Tabla 32	Prueba de ANOVA.....	69
Tabla 33	Coeficientes para la Solubilidad en Agua	70
Tabla 34	Diagnósticos de Colinealidad para la Solubilidad en Agua	71
Tabla 35	Resumen del modelo para la Densidad	71
Tabla 36	Prueba de ANOVA.....	72
Tabla 37	Coeficientes para la Densidad	73
Tabla 38	Diagnósticos de Colinealidad para la Densidad	74
Tabla 39	Prueba de ANOVA para la Resistencia a la Tracción	76
Tabla 40	Prueba HSD Tukey para Resistencia a la Tracción	77
Tabla 41	Subconjuntos homogéneos – HSD de Tukey para Resistencia a la Tracción	78
Tabla 42	Prueba de ANOVA para Elongación	79
Tabla 43	Prueba HSD Tukey para la Elongación	80
Tabla 44	Subconjuntos homogéneos – HSD de Tukey para Elongación.....	81
Tabla 45	Prueba de ANOVA para Modulo de Elasticidad	82
Tabla 46	Prueba HSD Tukey para Modulo de Elasticidad	83
Tabla 47	Subconjuntos homogéneos – HSD de Tukey para Modulo de Elasticidad	84
Tabla 48	Prueba de ANOVA para Solubilidad en agua	85
Tabla 49	Prueba HSD Tukey para Solubilidad en agua.....	86
Tabla 50	Subconjuntos homogéneos – HSD de Tukey para Solubilidad en agua..	87
Tabla 51	Prueba de ANOVA para Densidad.....	88
Tabla 52	Prueba HSD Tukey para Densidad	88
Tabla 53	Subconjuntos homogéneos – HSD de Tukey para Densidad	89
Tabla 54	Prueba de ANOVA para la Propiedad Biodegradable.....	90
Tabla 55	Prueba HSD Tukey para la propiedad Biodegradable	91
Tabla 56	Subconjuntos homogéneos – HSD de Tukey para la propiedad Biodegradable	92
Tabla 57	Síntesis del objetivo general: influencia de proporción, temperatura y aditivo sobre propiedades del bioplástico.	95

Índice de figuras

Figura 1 Diagrama de bloques de la extracción de almidón de maíz y residuo de yuca..... 41

Figura 2 Diagrama de bloques de la obtención de bioplástico a partir de almidón...41

AGRADECIMIENTO

"Deseo expresar mi más profundo agradecimiento, en primer lugar, a mi asesor Julio Tirado Vásquez por su invaluable orientación, paciencia y por compartir generosamente su conocimiento científico, siendo una guía fundamental para el rigor de esta investigación. Asimismo, hago extensivo este reconocimiento a mis docentes, quienes con su vocación y exigencia académica forjaron mi criterio profesional y me brindaron las herramientas necesarias para mi desarrollo en esta disciplina. Finalmente, mi gratitud total para mis familiares, cuyo apoyo moral, consejos y soporte emocional ininterrumpido me permitieron mantener la fortaleza y la motivación necesaria para culminar con éxito esta importante etapa de mi formación profesional."

DEDICATORIA:

"A la memoria eterna de mi abuelo, Macedonio Ferrer, quien con su ejemplo de integridad y sabiduría sembró en mí la perseverancia necesaria para enfrentar los desafíos de la vida. A mi abuela, Francisca Castañeda, por su amor infinito y por ser ese pilar de ternura y fortaleza que siempre ha cobijado a nuestra familia. De manera muy especial, a mi madre, Mary Ferrer Castañeda, el motor fundamental de mi existencia, cuya entrega incondicional, sacrificio y fe inquebrantable han sido el sustento de mis sueños. Gracias por ser mi refugio y por enseñarme que con esfuerzo no existen metas inalcanzables. Todo lo que soy y lo que hoy alcanzo, se lo dedico a ustedes."

RESUMEN

Esta investigación evaluó la influencia de la proporción de almidón de maíz (*Zea mays* L.) y residuo de yuca (*Manihot esculenta*), la temperatura de gelatinización y el tipo de aditivo en la obtención de bioplástico. Se aplicó un diseño experimental factorial $3 \times 3 \times 3$ (27 tratamientos), con proporciones 70/30, 50/50 y 30/70; temperaturas de 60, 80 y 100 °C; y aditivos: sin aditivo, glicerina y ácido cítrico. Las biopelículas se elaboraron por el método de casting y se evaluaron resistencia a la tracción, elongación, módulo de elasticidad, solubilidad en agua, densidad y biodegradabilidad mediante análisis de varianza y comparaciones post hoc (Tukey, $\alpha=0,05$). El análisis comparativo de formulaciones identificó como condición más favorable la muestra M3 (3,5 g de almidón de maíz y 1,5 g de residuo de yuca, 100 mL de agua, 1 mL de glicerina y 80 °C), por su equilibrio entre resistencia mecánica, flexibilidad y estabilidad frente a la humedad. Los resultados mostraron que la temperatura (60–100 °C) no produjo diferencias significativas en las propiedades evaluadas ($p>0,05$). En contraste, el tipo de aditivo generó diferencias significativas en resistencia y elongación ($p<0,001$; Tipo 1>Tipo 2>Tipo 3), solubilidad ($p=0,003$; mayor en Tipo 2 y menor en Tipo 3), densidad ($p=0,008$; mayor en Tipo 2) y biodegradabilidad ($p<0,001$; mayor en Tipo 1), mientras que el módulo de elasticidad no mostró diferencias al 5% ($p=0,098$). Se concluye que la optimización del bioplástico depende principalmente de la formulación y del aditivo, pudiendo seleccionarse la temperatura por criterios operativos y de eficiencia energética.

Palabras clave: Bioplástico; Almidón de maíz; Residuo de yuca; Glicerina; Ácido cítrico; Anova.

ABSTRACT

This study evaluated the effects of the corn starch (*Zea mays* L.)–cassava residue (*Manihot esculenta*) ratio, gelatinization temperature, and additive type on the production of a starch-based bioplastic. A 3×3×3 factorial experimental design (27 treatments) was considered, including ratios of 70/30, 50/50, and 30/70; temperatures of 60, 80, and 100 °C; and three additive conditions: no additive, glycerin, and citric acid. Films were produced by the casting method and characterized in terms of tensile strength, elongation at break, elastic modulus, water solubility, density, and biodegradability using ANOVA and Tukey post hoc tests ($\alpha=0.05$). Formulation screening identified M3 (3.5 g corn starch, 1.5 g cassava residue, 100 mL water, 1 mL glycerin, processed at 80 °C) as the most favorable condition, showing the best balance between mechanical performance, flexibility, and moisture-related stability. Temperature (60–100 °C) did not significantly affect the evaluated properties ($p>0.05$). In contrast, additive type significantly influenced tensile strength and elongation ($p<0.001$; Type 1>Type 2>Type 3), water solubility ($p=0.003$; highest in Type 2 and lowest in Type 3), density ($p=0.008$; highest in Type 2), and biodegradability ($p<0.001$; highest in Type 1). The elastic modulus showed no significant differences at the 5% level ($p=0.098$). Overall, optimization is mainly driven by formulation and additive selection, whereas temperature within the tested range can be chosen based on operational control and energy efficiency

Keywords: bioplastic; corn starch; cassava residue; glycerin; citric acid; ANOVA.

INTRODUCCIÓN

La contaminación por plásticos se ha convertido en una crisis ambiental de alcance global. Anualmente, se vierten aproximadamente 8 millones de toneladas de plástico en los océanos, lo que equivale a descargar un camión de basura lleno de plásticos cada minuto (ECODES, 2019). Esta acumulación masiva de desechos plásticos afecta a más de 600 especies marinas, que pueden ingerir o enredarse en estos materiales, poniendo en riesgo su supervivencia. Además, la producción de plásticos contribuye significativamente al cambio climático, generando en 2019 alrededor de 1.800 millones de toneladas métricas de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que representa el 3,4% del total mundial (Organización de las Naciones Unidas - ONU, 2023).

En Perú, la situación es igualmente alarmante. En Lima Metropolitana y el Callao se generan diariamente 886 toneladas de residuos plásticos, representando el 46% del total a nivel nacional (Ministerio del Ambiente - MINAM, 2021). Estos plásticos que desechamos terminan invadiendo los ecosistemas marinos, dañando la vida que hay en ellos y, de paso, afectando también nuestra salud. El problema se hace más grande porque no se manejan bien los residuos y, además, hay poca infraestructura para reciclar. Al final, todo esto se traduce en más y más plástico acumulado en playas y océanos (Contreras, 2023).

Esta investigación se enfocó en la obtención de bioplásticos usando almidón de maíz y restos de yuca, con la idea de proponer una opción más amigable con el medio ambiente frente a los plásticos de siempre. El almidón de maíz, por un lado, es fácil de conseguir y renovable; y por otro, los residuos de yuca que normalmente se desechan pueden aprovecharse en este proceso. Al juntar estos dos materiales, se puede fabricar un bioplástico que se degrada con el tiempo, lo que ayuda a depender menos del petróleo y a generar menos contaminación.

Además, si se logra optimizar bien el proceso para obtener bioplásticos a partir de maíz y residuos de yuca, se podrían abrir nuevas puertas para aplicaciones sostenibles en distintas industrias. Esto no solo ayudará a reducir la contaminación causada por los plásticos comunes, sino que también impulsa una economía más circular y generaría nuevas oportunidades para quienes cultivan maíz y yuca en el

país. Incluir bioplásticos en diferentes sectores podría marcar una gran diferencia en la huella ecológica y, de paso, motivar prácticas más conscientes con el planeta.

Este estudio partió de la necesidad de entender qué pasa cuando se mezcla almidón de maíz con almidón de yuca y cómo influyen factores como la temperatura o el tipo de aditivo en la estructura y el comportamiento del bioplástico. El almidón, al ser un polisacárido biodegradable, puede formar una especie de red plástica, pero sus propiedades como la resistencia o flexibilidad varían bastante según cómo y con qué se procese. Al analizar estas variables, se puede entender mejor cómo se da la gelatinización, cómo interactúan las moléculas entre sí y qué tipo de enlaces se forman. Todo eso ayuda a crear un bioplástico más sólido, funcional y, sobre todo, sostenible.

Desde un enfoque práctico, esta investigación cobro importancia porque busco dar con bioplásticos que realmente puedan reemplazar a los plásticos tradicionales hechos a base de petróleo, pero de forma mucho más sostenible y biodegradable. Jugar con las proporciones de almidón, regular bien la temperatura y elegir los aditivos adecuados permite mejorar las propiedades del bioplástico que sea más resistente, soporte mejor el calor y se degrade más fácilmente, lo cual lo hace útil para cosas como empaques u otros productos. Además, esto les da un nuevo valor a materias primas renovables, impulsa la industria local y ayuda a bajar el impacto ambiental que dejan los plásticos de siempre.

Desde el lado metodológico, se optó por un enfoque experimental porque permite tener el control total sobre las variables clave: cuánto almidón se usa, a qué temperatura se trabaja y qué tipo de aditivo se incorpora. Así se puede ver, de forma directa, cómo cada uno de estos factores influye en la calidad final del bioplástico. El proceso incluyó preparar mezclas con distintas proporciones de almidón, aplicar temperaturas específicas para que se dé la gelatinización, y agregar aditivos en cantidades bien definidas. Luego, todo se sometió a pruebas estándar para evaluar cómo se comporta el material: qué tan resistente es, cómo reacciona al calor y qué tan fácil se degrada.

Con respecto a la justificación ambiental, el desarrollo de bioplásticos a partir de almidón de maíz y yuca contribuye a la reducción del uso de plásticos derivados de fuentes fósiles, disminuyendo la acumulación de residuos no biodegradables en el medio ambiente. Al utilizar materias primas renovables y biodegradables, el proceso favorece la economía circular y reduce la huella ecológica asociada a la producción y disposición final de plásticos. Además, la optimización de las condiciones de fabricación puede mejorar la degradabilidad del bioplástico, minimizando su impacto ambiental y promoviendo prácticas más sostenibles en la industria del plástico, para ello se formuló la siguiente pregunta problema, ¿Cómo influye la proporción de almidón de maíz, residuo de yuca, la temperatura y el tipo de aditivo en las propiedades físicas, mecánicas y biodegradables del bioplástico obtenido?

Ante esta situación, los bioplásticos elaborados a partir de fuentes naturales representan una alternativa sostenible y ecológica. El almidón de maíz (*Zea mays* L.) destaca por su capacidad para formar materiales biodegradables con buenas propiedades mecánicas, mientras que el residuo de yuca (*Manihot esculenta*), rico en almidón, constituye un recurso económico y abundante que puede aprovecharse para reducir costos y valorizar desechos agroindustriales. La combinación de ambos almidones, junto con la adecuada temperatura de procesamiento y el uso de aditivos apropiados, influye directamente en las propiedades físicas, mecánicas y biodegradables del bioplástico obtenido. Por ello, esta investigación se justifica en la necesidad de optimizar estos factores para desarrollar un material sostenible, funcional y de bajo impacto ambiental que contribuya a la reducción del uso de plásticos convencionales y promueva el aprovechamiento eficiente de recursos naturales locales. El objetivo general de la presente investigación fue evaluar la influencia de la proporción de almidón de maíz y residuo de yuca, la temperatura y el tipo de aditivo en la obtención de bioplástico. Para alcanzar este propósito, se plantean tres objetivos específicos. En primer lugar, establecer las proporciones óptimas de almidón de maíz y residuo de yuca que permitan obtener un bioplástico con características adecuadas, asimismo, analizar el efecto de la temperatura de procesamiento sobre las propiedades físicas y mecánicas del material obtenido. Finalmente, determinar la influencia del tipo de aditivo en las propiedades físico-mecánicas y biodegradables del bioplástico, con el fin de identificar las condiciones más favorables para su elaboración.

La estructura del presente informe de investigación se desarrolla en seis capítulos que permiten abordar de manera ordenada y coherente el estudio. El primer capítulo, denominado diseño teórico, incluye los antecedentes, las bases teóricas y conceptuales relacionadas con la obtención de bioplásticos, así como la operacionalización o categorización de las variables de estudio. El segundo capítulo, correspondiente al diseño metodológico, describe el tipo y nivel de investigación, el diseño de contrastación de, además de detallar la población y muestra consideradas, así como las técnicas, instrumentos, equipos y materiales empleados durante el desarrollo experimental. El tercer capítulo presenta los resultados obtenidos, los cuales se redactan en función de los objetivos planteados, mientras que el cuarto capítulo, referido a la discusión de resultados, contrasta los hallazgos con los antecedentes y teorías pertinentes, interpretando su significado científico. El quinto capítulo comprende la propuesta de intervención, aunado a ello se da a conocer las conclusiones. Finalmente, el sexto capítulo expone las recomendaciones.

1. DISEÑO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

1.1.1. Antecedentes internacionales

Chauhan et al. (2023) realizaron una revisión exhaustiva sobre bioplásticos, abordando su clasificación, fuentes, técnicas de producción y ventajas sobre los plásticos convencionales. Identificaron que los bioplásticos basados en almidón, celulosa y otros biopolímeros tienen características físicas y químicas adecuadas para aplicaciones en sectores como la agricultura, la industria alimentaria y la medicina. Como resultados, determinaron que los bioplásticos derivados de almidón presentan una resistencia a la tracción promedio de 12.5 MPa, mientras que los de celulosa alcanzan valores de 23.8 MPa, comparables al polietileno de baja densidad. En términos de biodegradabilidad, los bioplásticos basados en almidón lograron una descomposición del 85% en 90 días bajo condiciones de compostaje industrial, mientras que los de celulosa alcanzaron el 92% en el mismo periodo. Además, los bioplásticos con mayor contenido de grupos hidroxilo, como el almidón, presentaron una capacidad de absorción de agua del 18% en 24 horas, frente al 7% observado en los bioplásticos de celulosa. Se concluye que el desarrollo de bioplásticos derivados de recursos renovables es crucial para enfrentar los problemas ambientales asociados a los plásticos convencionales y fomentar la sostenibilidad global.

Jacome et al. (2024) tuvieron como objetivo extraer y caracterizar el almidón de la variedad Leona Blanca de papa en Ecuador, buscando reducir las pérdidas postcosecha y promover su uso industrial en la producción de biopolímeros. Se emplearon metodologías de extracción y análisis fisicoquímico, evaluando propiedades como el contenido de amilopectina, que constituye entre el 70% y el 80% del almidón de papa. Los resultados revelaron que esta variedad posee características favorables para aplicaciones industriales, como la fabricación de envases biodegradables y utensilios desechables. El estudio también destacó que la papa es un cultivo fundamental en Ecuador, representando el 4% del PIB agrícola y generando más de 84,000 empleos, según el Ministerio de Agricultura en 2015. Además, se identificaron problemas como la sobreproducción y los bajos precios, que afectan a los agricultores. Se concluye que el aprovechamiento del almidón de papa para desarrollar biopolímeros sostenibles podría ayudar a mitigar el desperdicio de

46,000 toneladas de tubérculos anuales, fomentar una economía circular y contribuir a la sostenibilidad ambiental y económica del país.

Kunarbekova et al. (2023) estudiaron la producción de biopolímeros biodegradables a partir de residuos con almidón, empleando diferentes ácidos orgánicos (acético, láctico y cítrico) y plastificantes (glicerol, PVA y nanomateriales). Utilizaron técnicas avanzadas como microscopía electrónica, análisis termogravimétrico y espectroscopía infrarroja para evaluar las propiedades físicas y químicas. En los resultados, se observó que las muestras presentaron bandas de absorción características en el infrarrojo, como grupos hidroxilo (-OH) a 3250–3300 cm^{-1} y carboxilos (C-O) a 2100–2150 cm^{-1} . Mediante análisis termogravimétrico, los biopolímeros con ácido cítrico y nanopartículas de plata alcanzaron una temperatura máxima de descomposición de 322.5 °C, con un rendimiento de masa residual del 8.17 % a 500 °C. Respecto a la biodegradabilidad, los biopolímeros con ácido cítrico y nanopartículas de plata lograron una degradación del 41 % en 75 días, mientras que los con ácido acético o láctico mostraron menor degradación inicial, incrementando su descomposición después de 30 días. Se concluye que los biopolímeros derivados de residuos con almidón representan una solución efectiva y sostenible para mitigar la contaminación plástica, destacando su potencial para aplicaciones como envases y utensilios desechables. Este enfoque es clave en la economía circular y la gestión de desechos.

Hendrawan et al. (2020) investigaron la optimización de bioplásticos a base de almidón de arrurruz (*Maranta arundinacea* L.) utilizando el método de superficie de respuesta (RSM) con un diseño central compuesto (CCD). Este diseño incluyó 13 experimentos que variaron las composiciones de glicerol (2.4%, 3.9% y 5.3%) y quitosano (1.6%, 3.1% y 4.5%). Los resultados mostraron que la adición de 2.554 g de glicerol y 2.068 g de quitosano generó bioplásticos con una resistencia a la tracción de 96.219 MPa y una elongación del 11.78%. La validación arrojó valores promedio de resistencia de 95.82 ± 0.65 MPa y elongación de 11.46 ± 0.52 , con un margen de error inferior al 5%. Además, se observó que los bioplásticos alcanzaron un 75% de degradación en 12 días. Se concluye que el modelo es confiable y que los bioplásticos optimizados presentan características mecánicas y de degradación ideales para

sustituir los plásticos convencionales, representando una solución sostenible y económica frente a la contaminación plástica.

Lestari et al. (2019) desarrollaron bioplásticos a partir de semillas de jackfruit y residuos de arroz, evaluando el impacto de aditivos como polivinil alcohol (PVA), glicerol, quitosano y sorbitol en sus propiedades mecánicas y de biodegradación. El estudio analizó parámetros como grosor, contenido de humedad, resistencia a la tracción y elongación. En los resultados, los bioplásticos con glicerol mostraron una resistencia máxima a la tracción de 49.87 MPa al usar un 10 % de glicerol respecto al peso del residuo de arroz. Por otro lado, los bioplásticos con quitosano alcanzaron una resistencia máxima de 31.8 MPa con un 50 % de quitosano, disminuyendo a 3.33 MPa con un 60 %. En cuanto a elongación, los bioplásticos con glicerol lograron un 6.8 % usando 1 g de PVA y 6 ml de sorbitol, mientras que el aumento de quitosano redujo significativamente la flexibilidad. Respecto al contenido de humedad, las muestras con 3 g de PVA y 6 ml de sorbitol alcanzaron un 2.39 %, frente al 0.3 % en aquellas sin aditivos. Finalmente, los bioplásticos elaborados con 10 % de glicerol y 50 % de quitosano mostraron una biodegradación del 32.18 % en 14 días. Se concluye que la combinación adecuada de aditivos permite obtener bioplásticos con propiedades mecánicas y de biodegradación ajustadas a diversas aplicaciones, destacándose como una alternativa viable a los plásticos convencionales.

1.1.2. Antecedentes nacionales

Quispe (2022) elaboró bioplásticos utilizando cáscaras de plátano (*Musa paradisiaca*) recolectadas en seis establecimientos de juguerías ubicados en Ilave. Se recolectaron inter diariamente 8.4 kg de cáscaras en seis días, que sirvieron como materia prima para el estudio. El tipo de investigación fue experimental y cuasiexperimental, donde se utilizó glicerina, vinagre, agua destilada y maicena para obtener una mezcla homogénea. Posteriormente, el material fue moldeado y secado a temperatura ambiente. Se evaluaron las propiedades físicas y la biodegradabilidad de los bioplásticos mediante pruebas con muestras de 10 cm expuestas a agua, tierra húmeda y condiciones ambientales durante 50 días. Se obtuvo una densidad promedio de 0.0035 g/cm³, significativamente mayor a la de un plástico convencional (0.001 g/cm³). En conclusión, las cáscaras de plátano representaron un recurso

valioso para la creación de bioplásticos, destacando su flexibilidad y su potencial como alternativa sostenible frente a los plásticos tradicionales.

Montoya et al. (2022) desarrollaron bandejas biodegradables combinando corteza de plátano (*Musa paradisiaca*) y almidón de maíz (*Zea mays*), explorando sus propiedades físicas y mecánicas. Para la producción, se realizaron 16 tratamientos que incluyeron análisis de capacidad de absorción de agua, densidad, color, espesor y resistencia a la tensión. Se determinaron características del almidón extraído de las cáscaras de plátano, encontrando 42% de humedad, 3.52% de proteínas y 0.26% de amilosa/amilopectina. El mejor tratamiento en términos de resistencia a la tensión (39.73 N) y absorción de agua (0.53) fue el A4B3. En cuanto a densidad, el tratamiento A4B1 presentó el valor más alto (4.93 g/cm³). En el análisis de espesor, A3B1 obtuvo un espesor significativo de 3.03mm. En conclusión, el estudio demostró que los residuos agrícolas como la cáscara de plátano y el almidón de maíz pueden transformarse en materiales biodegradables útiles para la industria, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental.

Machaca (2022) investigó la extracción de almidón de semillas de palta (*Persea americana*) variedad Hass y su aplicación en la fabricación de bioplásticos. El almidón, obtenido mediante decantación húmeda, presentó un rendimiento del 14.62% y una composición de 38.67% de amilosa y 61.33% de amilopectina. Se desarrollaron nueve bioplásticos utilizando diferentes proporciones de ácido acético (3, 5 y 7 ml) y glicerina (5, 10 y 15 ml) mediante el método de moldeo. Las propiedades mecánicas, evaluadas según la norma ASTM D882, indicaron que la mezcla con 7 ml de ácido y 5 ml de glicerina mostró una resistencia a la tracción de 2.82 MPa y una elongación de 12.89%. En cuanto a la biodegradabilidad, se obtuvo una degradación del 33.47% a los 90 días según la norma ISO 17556:2003. En conclusión, el almidón de semilla de palta representa un recurso sostenible con potencial para la producción de bioplásticos, ofreciendo una alternativa al uso de plásticos convencionales.

Bernedo y Palomino (2020) tuvieron como objetivo desarrollar bioplásticos a partir de algas *Macrocystis pyrifera*, conocidas por su contenido de pectina y alginato, polímeros biológicos que presentan propiedades similares a los plásticos convencionales. Para el estudio, se utilizó harina de alga en tres concentraciones: 20 g, 30 g y 40 g, complementándolo con almidón de yuca y sorbitol como plastificante.

Las biopelículas obtenidas variaron en propiedades físicas y mecánicas. La tercera concentración (40 g) mostró un mejor desempeño con una resistencia a la tracción de 0.032 MPa y una elongación del 20%. Además, estas biopelículas fueron sometidas a pruebas de solubilidad y biodegradación. La solubilidad se evaluó en dos litros de agua doméstica, donde la biopelícula más eficiente se disolvió completamente en cinco días. Respecto a la biodegradación, las muestras se degradaron en 20 días al ser expuestas a dos kilogramos de tierra de cultivo. Estos resultados resaltan la efectividad de las algas *Macrocystis pyrifera* como alternativa sostenible para la fabricación de plásticos biodegradables. En conclusión, el estudio demostró que este material es viable para sustituir plásticos tradicionales, contribuyendo a mitigar el impacto ambiental ocasionado por los residuos plásticos de difícil degradación.

Chuquista y Uriarte (2020) desarrollaron bioplásticos utilizando cáscaras de plátano (*Musa × paradisiaca*) recolectadas en el mercado Modelo de Chiclayo. La investigación tuvo un enfoque descriptivo, con una población conformada por todos los desechos generados en dicho mercado, seleccionando 2.5 kg como muestra. Para la producción de los bioplásticos, se emplearon reactivos como glicerina, vinagre blanco, maicena y agua, siguiendo tres procedimientos con variaciones en la cantidad de agua utilizada. El tercer procedimiento, que redujo la cantidad de agua, produjo el bioplástico con mejores propiedades de resistencia y flexibilidad. En los resultados, se evaluó la biodegradabilidad mediante la exposición de tres muestras de bioplástico de 5 cm en agua, suelo húmedo y temperatura ambiente durante siete días. En suelo húmedo, la degradación fue más acelerada, alcanzando una descomposición del 90 % al séptimo día, mientras que en agua fue del 75 % y en temperatura ambiente del 60 %. Además, el bioplástico del tercer procedimiento presentó un módulo de elasticidad de 4.2 MPa y una resistencia a la tracción de 1.8 MPa, superando a los obtenidos con otras formulaciones. Finalmente, se fabricó un sobre con dimensiones de 20 cm por 8.5 cm, demostrando la viabilidad del material para aplicaciones prácticas.

1.2. Bases teóricas

1.2.1. Bioplásticos

Los bioplásticos han surgido como una solución innovadora frente a los graves problemas ambientales causados por el uso masivo de plásticos derivados del petróleo. Estos materiales, obtenidos a partir de recursos renovables como vegetales, algas y residuos agrícolas, presentan propiedades que los hacen biodegradables o menos contaminantes, lo que resulta en un impacto ambiental reducido. Desarrollar este tipo de bioplásticos es clave para frenar la acumulación de plásticos en la naturaleza y también para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que se generan tanto al fabricarlos como al desecharlos. Además, estos materiales son un paso adelante en la búsqueda de opciones más sostenibles para sectores como el de los empaques, la construcción e incluso la industria médica, donde cada vez se necesita más innovación sin descuidar el impacto ambiental (Vargas, Pazmiño, & Dávila, 2021).

1.2.1.1. Bioplásticos biodegradables:

Estos bioplásticos tienen la ventaja de que, bajo ciertas condiciones como la presencia de microbios, algo de humedad y la temperatura adecuada, pueden descomponerse por completo. Lo mejor es que, al hacerlo, no dejan residuos tóxicos, sino cosas simples como agua, dióxido de carbono y biomasa. Por eso resultan tan útiles cuando se trata de reducir la contaminación en espacios naturales, ya sea en la tierra o en cuerpos de agua (Sierra, 2022).

1.2.1.2. Bioplásticos no biodegradables:

Aunque estos bioplásticos no se descomponen tan rápido en la naturaleza, tienen un punto a favor: se fabrican a partir de materias primas renovables, como el maíz o la caña de azúcar. Eso ya representa una diferencia, porque su producción contamina mucho menos que la de los plásticos tradicionales. En ese sentido, se podrían considerar una especie de punto medio entre los plásticos comunes y los biodegradables del todo (Lestari, y otros, 2019).

1.2.1.3. Bioplásticos híbridos:

Este tipo de bioplásticos mezcla materiales biodegradables con otros que no lo son tanto, con la idea de mejorar aspectos como la resistencia y la durabilidad, pero sin dejar de lado del todo la sostenibilidad. Son como una solución intermedia,

pensada para usos donde se necesita que el material funcione bien, pero también se quiera reducir un poco el impacto ambiental. Por eso, estos híbridos se aplican en áreas donde ese equilibrio entre utilidad y conciencia ecológica es clave (Pérez, 2022).

1.2.2. Almidón como materia prima

El almidón es un polisacárido que se encuentra fácilmente en muchas plantas, lo que lo convierte en una materia prima clave para fabricar bioplásticos. Gracias a su estructura, puede formar una especie de red plástica que, en muchos casos, puede reemplazar a los plásticos hechos a base de petróleo. Lo bueno es que es renovable, biodegradable y se puede modificar sin mucha complicación, lo que lo hace perfecto para este tipo de usos. A nivel mundial, el maíz destaca como una de las fuentes más accesibles y baratas de almidón, lo cual facilita bastante su aplicación en proyectos enfocados en la sostenibilidad (Avellán, y otros, 2020).

1.2.2.1. Estructura molecular:

El almidón está hecho, básicamente, de dos componentes clave: la amilosa y la amilopectina. La amilosa es una molécula más lineal, que le da rigidez y estructura al material, mientras que la amilopectina, que es más ramificada, aporta flexibilidad y un carácter más amorfo. La cantidad de cada una depende de la planta de donde venga el almidón, y esa proporción influye directamente en cómo se comporta el bioplástico al final: más duro, más flexible, más resistente, etc. (Vásquez, 2020).

1.2.3. Gelatinización:

Este proceso sucede cuando el almidón se calienta en presencia de agua, lo que hace que sus gránulos se rompan y se forme una especie de gel. Esa matriz gelatinosa es clave en la fabricación de bioplásticos, porque funciona como la base estructural que luego se puede moldear en distintas formas, dependiendo del uso que se le quiera dar (De Gracia, González, Vega, Montenegro, & Marín, 2024).

1.2.4. Compatibilidad química:

Una de las cosas buenas del almidón es que se lleva bastante bien con otros compuestos, como los plastificantes, lo que permite ajustar sus propiedades según lo que se necesite. Gracias a estas combinaciones, se puede hacer que el bioplástico sea más flexible, más rígido o más resistente, dependiendo del uso que se le quiera

dar. Esto lo vuelve un material súper versátil para distintas aplicaciones (Torres, 2021).

1.2.5. Residuos de yuca como recursos sostenibles

La yuca es un cultivo bastante común en zonas tropicales y subtropicales, sobre todo porque rinde mucho y no necesita tantos cuidados ni insumos. El detalle es que, al procesarla, se genera una buena cantidad de residuos como las cáscaras y las fibras que, por lo general, se tiran sin más. Lo interesante es que esos restos están llenos de carbohidratos, especialmente almidón, lo que los convierte en una materia prima con mucho potencial para hacer bioplásticos. Aprovechar estos residuos no solo ayuda a reducir la cantidad de desechos agrícolas, sino que también le da un valor extra a toda la cadena de producción (Quintanilla, Rosado, & Arias, 2024).

Aprovechar los residuos de yuca es una gran oportunidad para impulsar la economía circular en las zonas donde se cultiva, promoviendo prácticas más sostenibles que no solo cuidan el medio ambiente, sino que también pueden beneficiar directamente a las comunidades agrícolas. Al darle valor a estos subproductos que normalmente se desperdician, se reduce la dependencia de recursos naturales y, al mismo tiempo, se abre paso a la innovación en el sector agroindustrial (Vélez, Zambrano, Delgado, Burgos, & Cedeño, 2021).

1.2.5.1. Composición química:

Los restos de yuca, como las cáscaras y fibras, están llenos de almidón, celulosa y hemicelulosa. Estos compuestos son clave para crear biopolímeros, ya que no solo sirven como base estructural, sino que también ayudan a mejorar la resistencia y el comportamiento del material. En pocas palabras, lo que normalmente se desecha puede convertirse en un recurso bastante útil para fabricar bioplásticos con mejores propiedades (Quintanilla, Rosado, & Arias, 2024).

1.2.6. Aprovechamiento de residuos:

Convertir estos subproductos en bioplásticos no solo ayuda a disminuir la contaminación generada por los residuos agrícolas, sino que también abre la puerta para que pequeños productores se integren a cadenas de valor más sostenibles. Es una forma de darle una segunda vida a lo que antes se tiraba, reforzando esa lógica

de economía circular donde los desechos dejan de ser un problema y pasan a ser parte de la solución (Briones & Riera, 2020).

1.2.7. Propiedades de bioplásticos

1.2.7.1. Propiedades mecánicas:

Propiedades como la resistencia a la tracción, la elongación y la dureza son claves para saber qué tan funcional es un bioplástico. Si el material tiene buena resistencia, por ejemplo, puede usarse sin problema en aplicaciones industriales. Y si además es lo suficientemente elástico, se vuelve ideal para cosas más flexibles, como envolturas o empaques. En resumen, estas características ayudan a definir para qué usos realmente sirve el bioplástico (Rivera & Vilchez, 2020).

1.2.7.2. Biodegradabilidad:

La capacidad de los bioplásticos para descomponerse en condiciones naturales depende de su composición química y de las condiciones del entorno. Los bioplásticos a base de almidón muestran una alta tasa de biodegradación, lo que los hace ideales para reducir la acumulación de residuos plásticos en el medio ambiente (Gonzalez, 2022).

1.2.7.3. Compatibilidad ambiental:

Los bioplásticos renovables contribuyen a la disminución de la huella de carbono, ya que durante su producción emiten menos gases de efecto invernadero en comparación con los plásticos tradicionales (Cuyubamba & Quispe, 2024).

1.2.8. Obtención de bioplásticos

1.2.8.1. Extracción de almidón:

Este proceso incluye la separación del almidón de las fuentes vegetales mediante métodos mecánicos y químicos. Un proceso eficiente garantiza la pureza del almidón, lo que mejora las propiedades del bioplástico (Quispe, 2022).

1.2.8.2. Mezcla y plastificación:

La combinación de almidón con aditivos, como plastificantes, es crucial para modificar su rigidez y mejorar su procesabilidad. Esto permite adaptar el bioplástico a diferentes aplicaciones industriales (Gonzalez, 2022).

1.2.8.3. Moldeo:

La aplicación de procesos como la extrusión y el prensado en caliente asegura una distribución uniforme del material, lo que mejora la calidad y consistencia del producto final (De Gracia, González, Vega, Montenegro, & Marín, 2024).

1.2.9. Impacto ambiental y sostenibilidad

La producción de bioplásticos a partir de fuentes renovables como el almidón de maíz y los residuos de yuca contribuye a mitigar el impacto ambiental asociado al uso de plásticos convencionales. Su biodegradabilidad reduce la contaminación en ecosistemas terrestres y acuáticos, mientras que su fabricación genera menos emisiones de gases de efecto invernadero (Duarte, 2022).

Además, aprovechar los residuos agrícolas va totalmente de la mano con la idea de economía circular, porque se trata de reutilizar lo que ya tenemos en lugar de seguir generando más desechos. Esto cobra aún más sentido hoy en día, considerando que la contaminación por plásticos se ha vuelto uno de los problemas ambientales más graves a nivel mundial (Huilcarema, Amaguay, & Sevilla, 2024).

Al final, lo valioso de los bioplásticos es que ayudan a reducir la dependencia de materiales derivados del petróleo, lo que representa un paso importante hacia un modelo de desarrollo más sostenible. Esta transición va en línea con los objetivos globales de bajar las emisiones contaminantes y cuidar mejor el planeta (Jasso, Aguilera, & Amaya, 2024).

1.2.10. Bases científicas para la evaluación del bioplástico

Evaluar un bioplástico no se trata solo de ver si funciona o no, sino de hacer un análisis completo que tome en cuenta lo físico, lo químico, lo mecánico y hasta su impacto ambiental. Por ejemplo, propiedades como la solubilidad o la resistencia al calor son clave para saber cómo se va a comportar el material mientras se fabrica o se usa. Todo eso influye en si el bioplástico es realmente útil o no para lo que se necesita (Jasso, Aguilera, & Amaya, 2024).

Por otro lado, las propiedades mecánicas como qué tanta fuerza aguanta antes de romperse (resistencia a la tracción) o cuánto puede estirarse (elongación) son súper importantes para saber si el bioplástico sirve o no en ciertas industrias. Estos

datos ayudan a detectar qué se puede ajustar o mejorar en el diseño y en la mezcla de los materiales para que se adapten mejor a su uso final (Montenegro & Gomajoa, 2024).

Y, por último, está la parte ambiental. Ahí se hacen pruebas de biodegradabilidad y análisis del ciclo de vida del producto, para asegurarse de que el bioplástico realmente sea sostenible y logre reducir su impacto en el medio ambiente. No se trata solo de que sea “eco”, sino de que lo demuestre con resultados concretos (Noriega, 2023).

1.2.11. Bases legales

La base legal de esta investigación se sustenta en normas, leyes y acuerdos nacionales e internacionales que promueven el desarrollo sostenible, la protección del medio ambiente y la innovación en la gestión de residuos plásticos. A continuación, se presentan las principales disposiciones legales relacionadas con la presente investigación:

1.2.12. Normas internacionales

1.2.12.1. Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de Desechos Peligrosos y su Eliminación (1989):

Este acuerdo internacional se encarga de regular cómo se manejan los residuos peligrosos, entre ellos los plásticos. Su objetivo principal es reducir al mínimo la generación de desechos y promover el uso de tecnologías más limpias. En ese sentido, esta investigación aporta a esa meta, ya que plantea el uso de bioplásticos biodegradables como una alternativa más sostenible y amigable con el planeta.

1.2.12.2. Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (2015):

Dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), hay dos que encajan perfecto con lo que plantea este proyecto: el ODS 12, que habla sobre producción y consumo responsables, y el ODS 14, que se enfoca en proteger la vida submarina. Ambos promueven reducir el impacto ambiental, manejar mejor los residuos y frenar la contaminación por plásticos. Justamente, esta iniciativa va en esa dirección, aportando una alternativa concreta y alineada con esas metas globales.

1.2.13. Legislación nacional

1.2.13.1. Ley N° 28611 - Ley General del Ambiente:

Esta norma reconoce que todas las personas tienen derecho a vivir en un ambiente sano y equilibrado. También impulsa el desarrollo sostenible y una gestión responsable de los residuos sólidos. Justamente, eso va de la mano con lo que busca esta investigación: encontrar soluciones biodegradables usando recursos renovables, aportando así a un modelo más respetuoso con el entorno.

1.2.13.2. Decreto Legislativo N° 1278 - Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos:

Esta ley se encarga de regular cómo se manejan los residuos en el Perú, con énfasis en darles un nuevo valor y avanzar hacia una economía circular. En ese contexto, la propuesta de crear bioplásticos a partir de almidón de maíz y restos de yuca encaja perfectamente, ya que aprovecha subproductos agrícolas que normalmente se desperdician y les da un uso útil, aportando de manera directa a lo que plantea este marco legal.

1.2.13.3. Ley N° 30884 - Ley que Regula el Plástico de un Solo Uso y los Recipientes o Envases Desechables:

Esta ley busca reducir el uso de plásticos descartables y, al mismo tiempo, impulsar alternativas más sostenibles, como los bioplásticos. Justamente ahí se enfoca esta investigación, en proponer una opción más responsable con el ambiente que esté en sintonía con lo que este marco legal promueve.

1.2.14. Normas, técnicas y reglamentos

1.2.14.1. Norma Técnica Peruana (NTP) 900.058:2008:

Esta norma define las características y especificaciones técnicas de los plásticos biodegradables. La investigación se desarrolla bajo este marco técnico para garantizar que los bioplásticos obtenidos cumplan con los estándares de biodegradabilidad y sostenibilidad.

1.2.14.2. Reglamento Nacional para la Gestión y Manejo de Residuos Sólidos (Decreto Supremo N° 014-2017-MINAM):

Establece las directrices para la gestión de residuos sólidos, fomentando el reciclaje y el uso de tecnologías innovadoras para mitigar la contaminación ambiental. La presente investigación está alineada con estos principios.

1.2.15. Políticas nacionales

1.2.15.1. Política Nacional del Ambiente (Decreto Supremo N° 012-2009-MINAM):

En esta política se prioriza la reducción de contaminantes y el uso eficiente de los recursos naturales. La propuesta de esta investigación responde a estas prioridades al optimizar el uso de almidón de maíz y residuos de yuca en la producción de bioplásticos biodegradables.

1.2.15.2. Plan Nacional de Acción sobre Residuos de Plásticos (2021-2030):

Este plan establece estrategias para reducir la contaminación plástica en el Perú mediante la innovación tecnológica y la promoción de alternativas sostenibles. Los objetivos de esta investigación están directamente alineados con las metas establecidas en este plan.

1.3. Bases conceptuales

1.3.1. Variable independiente: Composición del bioplástico

1.3.1.1. Definición Conceptual:

La composición del bioplástico hace referencia a la combinación de materiales utilizados en su formulación, los cuales determinan sus propiedades físicas, mecánicas y biodegradables. En el caso del bioplástico obtenido a partir de almidón, su estructura se basa en polímeros naturales que pueden ser modificados con plastificantes, agua y otros aditivos para mejorar su flexibilidad, resistencia y durabilidad.

1.3.1.2. Definición Operacional:

La composición del bioplástico se determinó a través de un proceso experimental en el que se mezclan los componentes en proporciones específicas y

se someten a condiciones controladas de temperatura y presión para obtener el material deseado.

1.3.2. Variable dependiente: Propiedades del bioplástico

1.3.2.1. Definición Conceptual:

Las propiedades del bioplástico se refieren a las características físicas, químicas y mecánicas que determinan su funcionalidad, como resistencia, flexibilidad, biodegradabilidad, entre otras.

1.3.2.2. Definición Operacional:

Se evaluó las propiedades del bioplástico obtenido mediante pruebas de laboratorio, midiendo parámetros específicos como resistencia a la tracción, elongación, contenido de humedad, degradabilidad y resistencia al agua, bajo condiciones controladas.

Tabla 1

Matriz de operacionalización de variables

Variable	Dimensión	Indicador	Índice
V.I Composición del bioplástico	Proporción almidón de maíz (AM)	% de almidón de maíz	T1: 70% AM / 30% RY
			T2: 50% AM / 50% RY
	Residuo de yuca (RY)	% de almidón de yuca	T3: 30% AM / 70% RY
			Sin aditivo
	Tipo de aditivo	Presencia y tipo de aditivo	Con glicerina
			Con Ácido cítrico
	Temperatura de gelatinización	Grados Celsius (°C)	60 °C
			80 °C
			100 °C

V.D Propiedades del bioplástico	Propiedades Mecánicas	Resistencia a la tracción (MPa)	1 – 100 MPa
		Elongación (%)	1 – 20 %
		Módulo de elasticidad (MPa)	1 – 200 MPa
	Propiedades Físico-químicas	Solubilidad en agua (%)	0-100%
		Densidad (g/cm ³)	0.5 – 2.0 g/cm ³
	Biodegradabilidad	Porcentaje de degradación	% degradación en compost
		Tiempo de descomposición	Días (1-30 días)

Nota. Elaborado por el autor.

2. DISEÑO METODOLÓGICO

2.1. Diseño de contrastación de hipótesis

La investigación presentó un enfoque cuantitativo, ya que se fundamentó en la medición objetiva y numérica de las variables fisicoquímicas y mecánicas del bioplástico obtenido, cuyos datos fueron analizados mediante herramientas estadísticas.

El estudio fue de tipo aplicado, dado que buscó desarrollar una alternativa sostenible para la obtención de bioplásticos mediante el aprovechamiento de almidón de maíz (*Zea mays* L.) y residuos de yuca (*Manihot esculenta*), contribuyendo a la reducción del impacto ambiental asociado al uso de plásticos convencionales.

El diseño de la investigación fue experimental, debido a que se realizó la manipulación intencional de las variables independientes, tales como la proporción de almidón de maíz y residuo de yuca, la temperatura de procesamiento y el tipo de aditivo, con el fin de evaluar su influencia sobre las propiedades del bioplástico. Las condiciones experimentales fueron controladas, lo que garantizó la validez interna y la reproducibilidad de los resultados.

Población y muestra

La población de esta investigación comprendió todos los materiales potenciales de origen natural que fueron utilizados en la obtención de bioplásticos biodegradables. Esto incluye fuentes de almidón provenientes de diferentes variedades de maíz y yuca disponibles en el mercado nacional e internacional, así como otras materias primas con propiedades similares.

La muestra de la investigación estuvo constituida por las variedades específicas de almidón de maíz y los residuos de yuca seleccionados para el proceso experimental de obtención de bioplástico.

Los criterios de selección de la muestra fueron establecidos con base en la disponibilidad, representatividad y calidad de los materiales. Se eligió variedades de maíz y yuca comunes en el mercado peruano, asegurando su disponibilidad y accesibilidad para el desarrollo de la investigación. Además, los materiales seleccionados fueron representativos de las condiciones agrícolas y de

procesamiento locales, con el fin de garantizar la aplicabilidad de los resultados en contextos similares. En cuanto a la calidad, se consideró únicamente aquellas materias primas que cumplan con estándares mínimos, como un contenido adecuado de almidón y pureza suficiente para asegurar la eficacia en la obtención del bioplástico.

El tamaño de la muestra se determinó en función de las necesidades experimentales y los recursos disponibles. Se utilizaron aproximadamente 5 kg de almidón de maíz, divididos en muestras de 1 kg para diversas pruebas, y 10 kg de residuos de yuca, subdivididos en lotes de 2 kg para su evaluación y control. Este tamaño de muestra permitió realizar pruebas experimentales repetidas y extrapolar los resultados a una escala mayor en caso de éxito. Para su recolección, se empleó un muestreo no probabilístico por conveniencia, seleccionando las muestras en función de su disponibilidad, accesibilidad y compatibilidad con los objetivos de la investigación, garantizando que cumplan con los requisitos establecidos para el desarrollo del proyecto.

Factores y niveles:

1) Proporción de almidón y residuos de yuca

- Tratamiento 1: 70% almidón - 30% residuos.
- Tratamiento 2: 50% almidón - 50% residuos.
- Tratamiento 3: 30% almidón - 70% residuos.

2) Temperatura de procesamiento

- Temperatura 1: 60 °C.
- Temperatura 2: 80 °C.
- Temperatura 3: 100 °C.

3) Tipo de aditivos

- Aditivo 1: Sin aditivos.
- Aditivo 2: Glicerina.
- Aditivo 3: Ácido cítrico.

Combinaciones Totales:

Con tres factores y tres niveles para cada uno, se obtuvieron 27 combinaciones experimentales (3 x 3 x 3). A continuación, se presentan cada uno de los tratamientos experimentales:

Tabla 2

Tratamientos experimentales variando temperaturas

Identificación de experimento	Proporción	Temperatura de procesamiento	Tipo de aditivos
1	70% almidón - 30% residuos	60 °C	Sin aditivos
2	70% almidón - 30% residuos	60 °C	Glicerina
3	70% almidón - 30% residuos	60 °C	Ácido cítrico
4	70% almidón - 30% residuos	80 °C	Sin aditivos
5	70% almidón - 30% residuos	80 °C	Glicerina
6	70% almidón - 30% residuos	80 °C	Ácido cítrico
7	70% almidón - 30% residuos	100 °C	Sin aditivos
8	70% almidón - 30% residuos	100 °C	Glicerina
9	70% almidón - 30% residuos	100 °C	Ácido cítrico
10	50% almidón - 50% residuos	60 °C	Sin aditivos
11	50% almidón - 50% residuos	60 °C	Glicerina
12	50% almidón - 50% residuos	60 °C	Ácido cítrico
13	50% almidón - 50% residuos	80 °C	Sin aditivos
14	50% almidón - 50% residuos	80 °C	Glicerina
15	50% almidón - 50% residuos	80 °C	Ácido cítrico
16	50% almidón - 50% residuos	100 °C	Sin aditivos

17	50% almidón - 50% residuos	100 °C	Glicerina
18	50% almidón - 50% residuos	100 °C	Ácido cítrico
19	30% almidón - 70% residuos	60 °C	Sin aditivos
20	30% almidón - 70% residuos	60 °C	Glicerina
21	30% almidón - 70% residuos	60 °C	Ácido cítrico
22	30% almidón - 70% residuos	80 °C	Sin aditivos
23	30% almidón - 70% residuos	80 °C	Glicerina
24	30% almidón - 70% residuos	80 °C	Ácido cítrico
25	30% almidón - 70% residuos	100 °C	Sin aditivos
26	30% almidón - 70% residuos	100 °C	Glicerina
27	30% almidón - 70% residuos	100 °C	Ácido cítrico

Nota. Elaborado por el autor.

Procedimiento experimental

1) Preparación de Materias Primas:

Obtención de almidón de maíz (Zea mays L.)

Etapas 1: Selección y lavado de la materia prima

Se seleccionaron 3 kg de maíz, los cuales fueron lavados con agua a temperatura ambiente para eliminar impurezas. Durante este proceso, se descartaron los granos flotantes y el material restante fue escurrido en un colador limpio. Después del lavado y selección, se obtuvo 2.800 kg de maíz apto para el proceso.

Etapas 2: Remojo y ablandamiento

El maíz seleccionado se dejó en remojo durante 2 horas, con el objetivo de ablandar los granos y facilitar su ruptura durante la molienda, favoreciendo la liberación del almidón contenido.

Etapas 3: Molienda

La molienda se realizó en licuadora utilizando una relación 1:2 (100 g de maíz: 200 ml de agua destilada) por un tiempo de 5 minutos. Este proceso permitió obtener una lechada homogénea.

Etapa 4: Filtración y decantación

La lechada obtenida se filtró con un colador y una tela de tocuyo. El filtrado, de aspecto blanco lechoso, se recogió en un recipiente limpio, eliminando los residuos sólidos. Posteriormente, se dejó reposar el filtrado durante 12 horas para permitir la sedimentación del almidón por gravedad.

Etapa 5: Secado del almidón

Una vez sedimentado, el almidón fue separado del sobrenadante y vertido en bandejas de acero inoxidable. Se procedió al secado en una estufa a 40 °C durante 12 horas. Posteriormente, el almidón seco se desprendió con una espátula, se molió manualmente y se pasó por un molino para lograr una textura más homogénea.

Etapa 6: Tamizado y almacenamiento

El producto se tamizó mediante una malla N.º 200, obteniéndose una masa final de 131 g de almidón de maíz. El almidón tamizado fue almacenado en bolsas herméticas para evitar la absorción de humedad.

Etapa 7: Prueba de humedad y prueba de Lugol

La humedad se determinó utilizando un determinador de humedad a 105 °C durante 11 min y 4 s, obteniéndose un valor de 9,12 %.

Para verificar la presencia de almidón, se emplearon tres muestras de 2 g cada una colocadas en luna reloj, a las que se añadieron tres gotas de Lugol-yoduro. Luego de 5 segundos, se observó un cambio de color azul-negro intenso, confirmando la presencia de almidón. Finalmente, el material se almacenó nuevamente en bolsas herméticas para evitar la absorción de humedad.

Obtención de almidón de residuo de yuca (Manihot esculenta)

Etapas 1: Selección y lavado de la materia prima

Se utilizaron 4 kg de residuo de yuca, eliminando cáscaras y fibras, y se lavaron con agua limpia. Tras el escurrido y selección, se obtuvo 3.180 kg de yuca útil para el proceso.

Etapas 2: Remojo y ablandamiento

La yuca se dejó en remojo durante 2 horas con el fin de ablandar su estructura fibrosa y facilitar la liberación del almidón durante la molienda.

Etapas 3: Molienda

El proceso de molienda se realizó en licuadora con una proporción 1:3 (100 g de yuca: 300 ml de agua destilada) durante 5 minutos, obteniéndose una mezcla homogénea.

Etapas 4: Filtración y decantación

La mezcla se filtró con un colador y tela de tocuyo, obteniéndose un filtrado blanco lechoso. Se dejó reposar durante 12 horas para permitir la sedimentación del almidón por gravedad.

Etapas 5: Secado del almidón

El almidón sedimentado fue separado del sobrenadante y colocado en bandejas de acero para reducir su humedad. Luego se secó en estufa a 40 °C durante 12 horas. Una vez seco, se raspó con espátula, se molió manualmente y posteriormente se pasó por un molino para homogeneizar la textura.

Etapas 6: Tamizado y almacenamiento

El almidón seco fue tamizado con malla N.º 200, obteniéndose 381 g de almidón de yuca. Posteriormente, se almacenó en bolsas herméticas.

Etapas 7: Prueba de humedad y prueba de Lugol

La humedad se midió a 105 °C durante 9 min y 26 s, resultando en 9 % de contenido de humedad. Para comprobar la naturaleza del producto, se tomaron tres muestras de 2 g y se les añadieron tres gotas de Lugol-yoduro. Después de 5 segundos, las muestras cambiaron a un color azul-negro intenso, confirmando la

presencia de almidón. Finalmente, se conservaron en bolsas herméticas para evitar la absorción de humedad.

2) Preparación del Bioplástico:

Obtención de bioplástico

GLICERINA

Para la obtención del bioplástico se utilizó 2 tipos de almidón, el almidón de maíz y yuca de los cuales se trabajó en diferentes proporciones 70% - 30%; 50% - 50%; 30% - 70% utilizando como base total 5g de almidón, se pesó en la balanza analítica las siguientes muestras 3,5 g de almidón de maíz y 1,5g de almidón de yuca, la muestras 2: 2,5g de almidón de maíz y 2,5g de yuca y para la muestra 3: 1,5g de almidón de maíz y 3,5g de almidón de yuca, una vez pesadas cada muestra se mezclan en un vaso precipitado de 250 ml, luego se le añade 100 ml de agua destilada para diluir el almidón, después de coloca el vaso precipitado a una placa calefactora marca VLEP, con agitador magnético, se coloca las muestras en la placa calefactora a 600 rpm en un tiempo de 5 minutos para obtener la uniformidad de la mezcla, después se calentó las muestras hasta 60°C para colocar a cada muestra un 1ml de glicerina gota a gota con una probeta durante 5 minutos, luego de colocar el aditivo a la muestra se aumenta la agitación constante a 1100 rpm hasta que la glicerina este totalmente disuelto, durante 15 minutos se elevó hasta llegar a 80°C para lograr la gelatinización del almidón.

La solución se mantuvo a 25°C durante 10 min. Para ello, se aplicó el método del Casting y la solución viscosa fue vertida a un molde de silicona resistente a altas temperaturas, y se colocó en la estufa de aire forzado de la marca BINDER a 45°C durante 12 horas. Posterior a ello, se obtuvo el bioplástico y se almaceno en bolsas herméticas para evitar que adquieran humedad.

Se repitió la marcha con las mismas proporciones de almidón y el mismo tipo de aditivo, pero cambiando la temperatura cuando se trabajó con una temperatura de 60°C, durante 25 minutos, pero se logra gelatinizar el almidón.

Se repitió la marcha con las mismas proporciones de almidón y el mismo tipo de aditivo, pero cambiando la temperatura, cuando se trabaja con una temperatura de 100°C, la muestra trabaja en un intervalo de 5 minutos a 1000 rpm, pero se observa

que se carboniza, por ello le bajamos el tiempo a 2 minutos, pero presenta el mismo problema de carbonizarse, pero como logra gelatinizarse durante el tiempo de 2 minutos, la solución se mantuvo a 25°C durante 35 min.

Para ello, se aplicó el método del Casting y la solución viscosa fue vertida a un molde de silicona resistente a altas temperaturas, y se colocó en la estufa de aire forzado de la marca BINDER a 45°C durante 12 horas. Posterior a ello, se obtuvo un bioplástico quebradizo que no tenía ni una propiedad mecánica como la elongación y la resistencia.

Glicerina + Sorbitol

Para la obtención del bioplástico se utilizó 2 tipos de almidón, el almidón de maíz y yuca de los cuales se trabajó en diferentes proporciones 70% - 30%; 50% - 50%; 30% - 70% utilizando como base total 5g de almidón, se pesó en la balanza analítica las siguientes muestras 3,5 g de almidón de maíz y 1,5g de almidón de yuca, la muestras 2: 2,5g de almidón de maíz y 2,5g de yuca y para la muestra 3: 1,5g de almidón de maíz y 3,5g de almidón de yuca, una vez pesadas cada muestra se mezclan en un vaso precipitado de 250 ml, luego se le añade 100 ml de agua destilada para diluir el almidón, después de coloca el vaso precipitado a una placa calefactora marca VLEP, con agitador magnético, se coloca las muestras en la placa calefactora a 600 rpm en un tiempo de 5 minutos para obtener la uniformidad de la mezcla, después se calentó las muestras hasta 60°C para colocar a cada muestra un 1ml de glicerina y 1 ml de sorbitol gota a gota con una probeta durante 5 minutos, luego de colocar el aditivo a la muestra se aumenta la agitación constante a 1100 rpm hasta que la glicerina este totalmente disuelto, durante 15 minutos se elevó hasta llegar a 80°C para lograr la gelatinización del almidón.

La solución se mantuvo a 25°C durante 10 min. Para ello, se aplicó el método del Casting y la solución viscosa fue vertida a un molde de silicona resistente a altas temperaturas, y se colocó en la estufa de aire forzado de la marca BINDER a 45°C durante 12 horas. Posterior a ello, se obtuvo el bioplástico y se almaceno en bolsas herméticas para evitar que adquirieran humedad.

Se repitió la marcha con las mismas proporciones de almidón y el mismo tipo de aditivo, pero cambiando la temperatura cuando se trabajó con una temperatura de 60°C, durante 25 minutos, pero se logra gelatinizar el almidón.

Se repitió la marcha con las mismas proporciones de almidón y el mismo tipo de aditivo, pero cambiando la temperatura, cuando se trabaja con una temperatura de 100°C, la muestra trabaja en un intervalo de 5 minutos a 1000 rpm, pero se observa que se carboniza, por ello le bajamos el tiempo a 2 minutos, pero presenta el mismo problema de carbonizarse, pero como logra gelatinizarse durante el tiempo de 2 minutos, la solución se mantuvo a 25°C durante 35 min.

Para ello, se aplicó el método del Casting y la solución viscosa fue vertida a un molde de silicona resistente a altas temperaturas, y se colocó en la estufa de aire forzado de la marca BINDER a 45°C durante 12 horas. Posterior a ello, se obtuvo un bioplástico quebradizo que no tenía ni una propiedad mecánica como la elongación y la resistencia.

3) Caracterización del Bioplástico:

- Evaluación de propiedades mecánicas, térmicas y biodegradables utilizando técnicas estandarizadas.

2.2. Técnicas, instrumentos, equipos, materiales

2.2.2. Técnicas de recolección de datos

Pruebas Experimentales: Se realizaron diversas pruebas experimentales en laboratorio con el fin de obtener bioplástico a partir de almidón de maíz y residuos de yuca. Estas pruebas se dividieron en varias fases: la preparación de materiales, donde se llevó a cabo la extracción de almidón de maíz y el tratamiento de los residuos de yuca para obtener los componentes necesarios para la síntesis. La síntesis del bioplástico consistió en mezclar los materiales extraídos bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo y presión. Finalmente, se realizaron pruebas de caracterización donde se evaluó las propiedades mecánicas (como resistencia y flexibilidad), térmicas (como estabilidad térmica) y biodegradables (mediante pruebas de descomposición en compost), las cuales permitieron conocer la viabilidad del bioplástico para aplicaciones industriales.

Observación Directa: Se llevó a cabo una observación directa durante todo el proceso experimental para registrar cualquier comportamiento o resultado significativo relacionado con la síntesis del bioplástico. Esto permitió detectar cualquier problema o cambio inesperado en los materiales o en cómo se llevó a cabo el proceso, además de observar ciertos fenómenos que, aunque no se pueden medir con números, son igual de importantes para entender cómo se fue formando y comportando el bioplástico.

Técnicas Instrumentales: Para el proceso experimental se usaron varias herramientas de laboratorio que permitieron medir y registrar los resultados con precisión. Entre ellas, se utilizó una máquina universal de ensayos donde se evaluó cómo se comporta el bioplástico frente a la tracción, la flexión y la compresión, es decir, qué tanta fuerza puede resistir. También se aplicó un análisis termogravimétrico para ver cómo reacciona el material al calor y qué tan estable es a diferentes temperaturas. Y, por último, se practicaron pruebas de biodegradación en compost, lo que sirvió para saber en cuánto tiempo se descompone el bioplástico en un entorno natural de compostaje, y así confirmar si realmente es biodegradable.

Análisis Documental: Se realizó una revisión exhaustiva de literatura científica, normas ambientales y estudios anteriores relacionados con la producción de bioplásticos a partir de materiales orgánicos. Esta revisión no solo sirvió para entender en qué punto está actualmente la investigación en este campo, sino también para recoger buenas prácticas, conocer los avances más recientes y tener claro qué regulaciones y estándares internacionales existen para el uso de bioplásticos en distintas industrias. Todo eso ayudó a darle un buen contexto y respaldo al proyecto.

2.2.3. Instrumentos de recolección

Fichas de Recolección de Datos: Son como plantillas organizadas que sirvieron para ir apuntando, de forma ordenada, todo lo que se obtuvo en cada prueba experimental. En estas fichas se registraron cosas como las proporciones de almidón de maíz y residuos de yuca que se usaron, las condiciones del proceso (tipo de aditivo, temperatura, etc.) y los resultados de las pruebas que se hicieron al bioplástico, ya sean mecánicas, térmicas o de biodegradación. Tener todo eso bien anotado fue clave para no perder ningún dato y poder analizarlo después con más claridad.

Máquina Universal de Ensayos: Este equipo se usó para medir cómo se comporta el bioplástico frente a distintas fuerzas, evaluando cosas como su resistencia a la tracción, cuánto se puede estirar (elongación) y qué tan rígido es. Los datos que se obtuvieron en esta máquina son clave para saber si el material puede aguantar el uso real, sobre todo en aplicaciones industriales. Lo bueno es que registró valores bastante precisos, lo que da confianza en los resultados y permitió tomar decisiones bien fundamentadas sobre su desempeño.

Estufa: Este equipo se utilizó para medir cómo se comporta el bioplástico frente al calor, es decir, su estabilidad térmica y a qué temperatura empieza a descomponerse. Básicamente, se le aplica calor de forma controlada y se va registrando cuánto peso va perdiendo el material, lo que indica en qué momento comienza a degradarse. Estos datos fueron súper importantes para saber si el bioplástico puede resistir altas temperaturas, algo clave si se piensa usar en procesos o productos industriales.

Cámara de Biodegradación (Compostaje Controlado): Esta cámara sirvió para simular un ambiente de compostaje y ver cuánto tiempo tarda el bioplástico en descomponerse. Durante el proceso, se controlaron variables como la humedad, la temperatura y el tiempo que pasa hasta que el material empieza a degradarse. Todo lo que se registró da una idea clara de qué tan biodegradable fue bioplástico, lo cual fue clave para entender su impacto real en el medio ambiente.

Cronómetro Digital: El cronómetro se usó para llevar el control del tiempo en cada fase del experimento, ya sea durante la mezcla, el procesamiento o la descomposición. Aunque parezca una herramienta sencilla, cumple un rol clave: ayudó a mantener las mismas condiciones cada vez que se repite el procedimiento, lo que permitió que los resultados sean comparables y consistentes.

Balanza de Precisión: La balanza se utilizó para pesar con precisión cuánto almidón de maíz, residuo de yuca y aditivos se usan en cada mezcla. Esa exactitud es clave, porque si las proporciones varían, los resultados del bioplástico también cambian. Así que, aunque no lo parezca, este aparatito tiene un papel esencial para que todo salga parejo y confiable en cada prueba.

Higrómetro: Se empleó para verificar cuánta humedad hay en el ambiente donde se almacenaron y procesaron los materiales. Puede parecer un detalle menor, pero la humedad influyo bastante en cómo se comporta el bioplástico y en qué tan bien funciona todo el proceso de síntesis. Por eso, tener controlado ese factor es más importante de lo que uno pensaría.

Cámara Fotográfica: Se utilizó para tomar fotos de todo el proceso, paso a paso, y también del bioplástico que se obtenga al final. Tener ese registro visual ayudo mucho, porque no solo permitió ver las diferencias entre una muestra y otra, sino que también complementa los datos numéricos con una perspectiva más cualitativa.

2.2.4. Procedimiento

Selección y Preparación de Materias Primas: El primer paso consistió en seleccionar las materias primas necesarias: almidón de maíz y residuos de yuca. El almidón fue adquirido en forma comercial o extraído del maíz mediante técnicas tradicionales, mientras que los residuos de yuca fueron recolectados de mercados o centros de procesamiento agrícola. Los residuos se sometieron a un lavado y secado previo para eliminar impurezas y humedad, asegurando su aptitud para el procesamiento.

Extracción de Almidón de Maíz y Residuos de Yuca: En el almidón de maíz no estuvo disponible en forma comercial, se procedió a su extracción mediante el proceso húmedo, que incluye molienda del maíz, suspensión en agua y decantación para separar el almidón puro. De manera similar, se procedió con los residuos de yuca para obtener su contenido de almidón, utilizando métodos que garantizaron su conservación y pureza. Este paso aseguro la disponibilidad de materiales de alta calidad para la síntesis del bioplástico.

Preparación de la Mezcla Experimental: Una vez obtenidos el almidón de maíz y los residuos de yuca, se procedió a realizar las mezclas experimentales en diferentes proporciones definidas previamente (e.g., 70%-30%, 50%-50%, 30%-70%). A estas mezclas se les añadieron aditivos, como glicerina o ácido cítrico, según los tratamientos experimentales establecidos. Cada mezcla fue homogenizada cuidadosamente para garantizar la uniformidad en la distribución de los componentes.

Procesamiento del Bioplástico: Las mezclas experimentales fueron sometidas a temperaturas controladas (60 °C, 80 °C, 100 °C) en un equipo adecuado, como una prensa térmica o extrusora de laboratorio. Durante este proceso, se monitoreó constantemente el comportamiento del material, como su viscosidad y cohesión, asegurando que las condiciones sean óptimas para la formación del bioplástico. Posteriormente, las muestras obtenidas fueron moldeadas en láminas o formas específicas para su caracterización.

Secado y Acondicionamiento de las Muestras: Las muestras de bioplástico fueron secadas en condiciones controladas de temperatura y humedad para eliminar cualquier contenido de agua residual que pueda alterar sus propiedades. Este paso es fundamental para garantizar la estabilidad dimensional y estructural del bioplástico antes de someterlo a las pruebas de caracterización.

Pruebas de Propiedades Mecánicas: Se evaluaron las propiedades mecánicas del bioplástico utilizando una máquina universal de ensayos. Este paso incluyó pruebas de resistencia a la tracción, elongación y rigidez, con el objetivo de determinar la capacidad del material para soportar esfuerzos mecánicos. Estas pruebas fueron esenciales para evaluar su viabilidad en aplicaciones industriales.

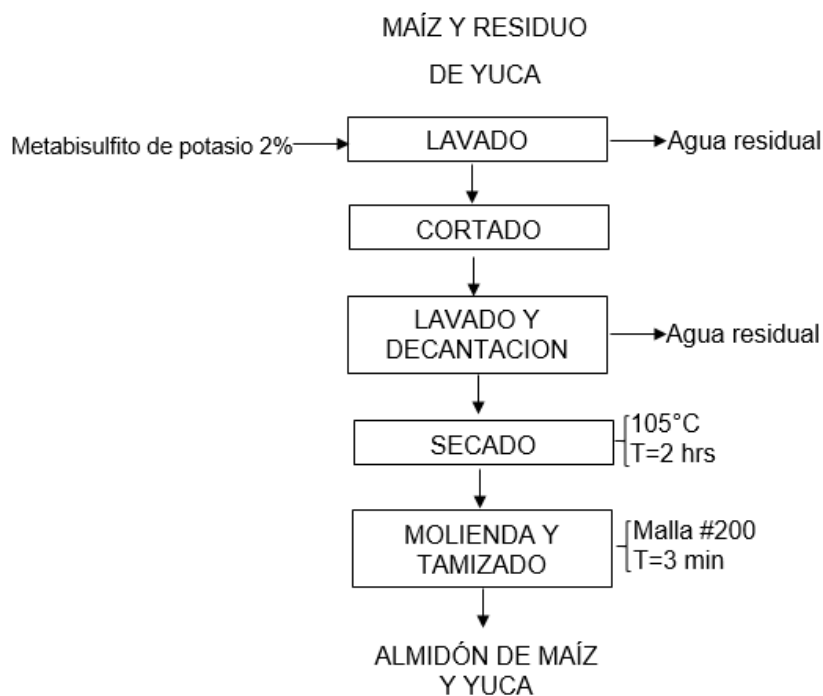
Evaluación de Propiedades Térmicas: Se realizó análisis termogravimétricos (TGA) para determinar la estabilidad térmica y la temperatura de degradación del bioplástico. Este procedimiento permitió identificar las condiciones bajo las cuales el material puede ser utilizado sin comprometer su estructura y funcionalidad.

Pruebas de Biodegradabilidad: Las muestras de bioplástico fueron sometidas a condiciones simuladas de compostaje en una cámara de biodegradación. Durante este procedimiento, se monitoreó la descomposición del material a lo largo del tiempo, registrando los cambios en su peso y estructura. Esto permitió evaluar el impacto ambiental del bioplástico y su capacidad para degradarse de manera sostenible.

Documentación y Registro de Resultados: Durante cada paso del procedimiento, se realizó un registro detallado de las observaciones y datos obtenidos en las fichas de recolección de datos. Este registro incluyó mediciones, fotografías y cualquier observación relevante que ayudó al análisis posterior de los resultados.

Figura 1

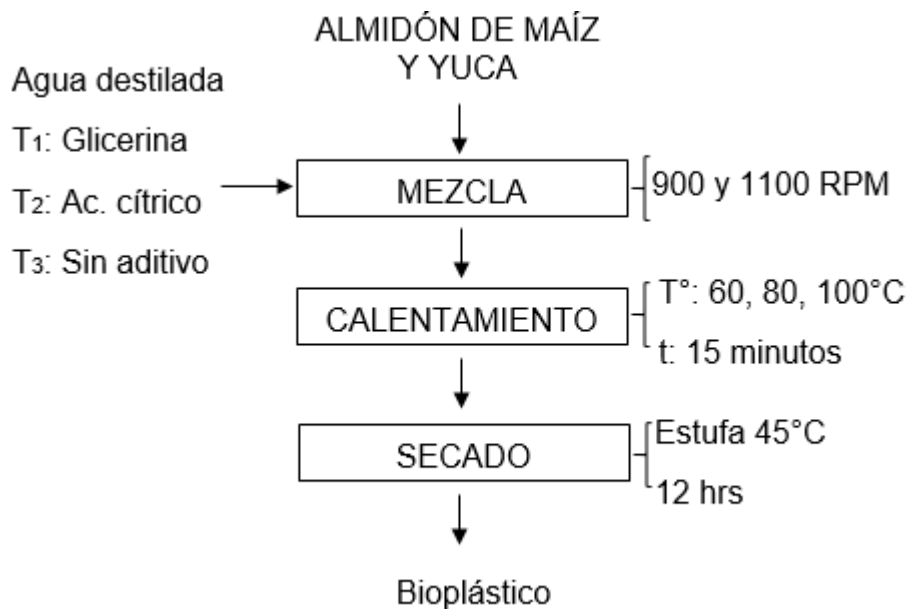
Diagrama de bloques de la extracción de almidón de maíz y residuo de yuca



Nota. Elaborado por el autor.

Figura 2

Diagrama de bloques de la obtención de bioplástico a partir de almidón



Nota. Elaborado por el autor.

2.2.5. Método de análisis de datos

Análisis Descriptivo: Los datos obtenidos durante las pruebas experimentales se organizaron y resumieron a través de un análisis descriptivo, el cual proporcionó una descripción detallada de las propiedades del bioplástico bajo las diferentes condiciones experimentales. Este análisis permitió visualizar tendencias, promedios, distribuciones y patrones de comportamiento de las variables estudiadas, y sirvió como base para los análisis posteriores.

Análisis Comparativo: Se realizó un análisis comparativo entre los resultados obtenidos de las diferentes pruebas experimentales donde se identificó las condiciones óptimas del proceso de síntesis del bioplástico. Este análisis ayudó a determinar qué proporciones y condiciones de procesamiento de almidón de maíz y residuos de yuca fueron las más adecuadas para obtener bioplásticos con las mejores propiedades físicas, térmicas y biodegradables, lo cual fueron crucial para la optimización del proceso.

Análisis Estadístico: Se aplicaron herramientas estadísticas avanzadas para analizar la relación entre las variables independientes y dependientes y validar la hipótesis planteada. Entre las técnicas estadísticas utilizadas, se trabajó con el análisis de varianza (ANOVA) para comparar los efectos de diferentes proporciones de materiales en las propiedades del bioplástico, y la regresión lineal, que permitió establecer relaciones predictivas entre las variables, ayudando a predecir cómo pequeñas variaciones en las proporciones de los componentes pueden afectar las propiedades finales del bioplástico.

3. RESULTADOS

3.1. Objetivo Especifico 1: Establecer las proporciones óptimas de almidón de maíz y residuo de yuca para la obtención del bioplástico.

Tabla 3

Formulación de muestras

Ítem	Temperatura (°C)	Almidón de maíz (g)	Residuo de yuca (g)	Agua (ml)	Aditivo
M1	60	2.5	2.5	100	1 ml glicerina
M2	60	1.5	3.5	100	1 ml glicerina
M3	80	3.5	1.5	100	1 ml glicerina
M4	80	1.5	3.5	100	1 ml glicerina + 1 ml sorbitol
M5	100	2.5	2.5	100	1 ml glicerina + 1 ml sorbitol
M6	100	3.5	1.5	100	1 ml glicerina + 1 ml sorbitol

Nota: *Elaboración propia*

Como se observa en la tabla 3, las seis formulaciones fueron procesadas a 60 °C, 80 °C y 100 °C, la formulación M3 (3.5 g de almidón de maíz, 1.5 g de residuo de yuca, 100 mL de agua y 1 mL de glicerina, procesada a 80 °C) fue identificada como la más óptima para la obtención del bioplástico. Esta mezcla presentó la mejor combinación de resistencia mecánica, flexibilidad adecuada y estabilidad frente a la humedad, evidenciando una matriz polimérica más homogénea y compacta en comparación con las demás formulaciones evaluadas.

➤ **Análisis Inferencial**

Con el fin de evaluar de manera objetiva el efecto de la temperatura de procesamiento y del tipo de aditivo sobre las propiedades físico-mecánicas del bioplástico, los resultados experimentales fueron analizados mediante Análisis de Varianza (ANOVA) y regresión lineal, utilizando un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$.

3.2. Objetivo Especifico 2: Analizar el efecto de la temperatura de procesamiento sobre las propiedades físicas y mecánicas del material obtenido

➤ Análisis de Varianza

– ANOVA para el efecto de la temperatura de procesamiento

Se aplicó un ANOVA de un factor para determinar si la temperatura de procesamiento (60, 80 y 100 °C) ejerce una influencia significativa sobre las propiedades mecánicas y físicas del bioplástico.

a) Resistencia a la Tracción

Tabla 4

Prueba de ANOVA para la Resistencia a la Tracción

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	,001	2	,000	,032	,969
Dentro de grupos	,129	15	,009		
Total	,130	17			

La prueba de ANOVA de un factor realizada para evaluar la resistencia a la tracción no mostró diferencias estadísticamente significativas entre los grupos analizados. El análisis indicó un valor de $F = 0,032$ con una significancia de $p = 0,969$, la cual es mayor que el nivel de significancia establecido ($\alpha = 0,05$).

Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula, concluyéndose que no existen diferencias significativas en la resistencia a la tracción entre los grupos evaluados. Esto sugiere que el factor de agrupación considerado no tuvo un efecto significativo sobre la resistencia a la tracción en la muestra estudiada.

Tabla 5*Prueba HSD Tukey para la Resistencia a la Tracción*

(I) TEMPERATURA	(J) TEMPERATURA	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
60,00	80,00	,00000	,05362	1,000	-,1393	,1393
	100,00	,01167	,05362	,974	-,1276	,1509
80,00	60,00	,00000	,05362	1,000	-,1393	,1393
	100,00	,01167	,05362	,974	-,1276	,1509
100,00	60,00	-,01167	,05362	,974	-,1509	,1276
	80,00	-,01167	,05362	,974	-,1509	,1276

La prueba HSD de Tukey se aplicó para identificar diferencias específicas en la resistencia a la tracción entre los tratamientos de temperatura (60, 80 y 100 °C). Los resultados indican que no se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre ninguno de los tratamientos evaluados ($p > 0,05$).

Las comparaciones entre 60 y 80 °C, 60 y 100 °C, así como entre 80 y 100 °C, mostraron diferencias de medias cercanas a cero y valores de significancia elevados (Sig. = 1,000 y 0,974). Además, en todos los casos, los intervalos de confianza al 95 % incluyeron el valor cero, lo que confirma la ausencia de diferencias significativas entre las temperaturas.

En consecuencia, se concluye que la variación de la temperatura entre 60, 80 y 100 °C no tuvo un efecto significativo sobre la resistencia a la tracción del material evaluado, lo que indica un comportamiento mecánico similar bajo las condiciones térmicas analizadas.

Tabla 6*Subconjuntos homogéneos – HSD de Tukey para la Resistencia de Tracción*

TEMPERATURA	N	Subconjunto para alfa = 0.05
		1
100,00	6	,2700
60,00	6	,2817
80,00	6	,2817
Sig.		,974

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 6,000.

El análisis de subconjuntos homogéneos mediante la prueba HSD de Tukey para la resistencia a la tracción, considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$, mostró la conformación de un solo subconjunto homogéneo que incluye a todas las temperaturas evaluadas (60, 80 y 100 °C).

Los resultados indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de resistencia a la tracción correspondientes a las distintas temperaturas, ya que todas se agrupan en el mismo subconjunto y presentan valores de significancia elevados (Sig. = 0,974). Esto confirma que las variaciones de temperatura evaluadas no generaron cambios significativos en la resistencia a la tracción del material.

En consecuencia, se concluye que la resistencia a la tracción se mantiene estadísticamente similar independientemente de la temperatura aplicada, dentro del rango de 60 a 100 °C, evidenciando un comportamiento mecánico homogéneo bajo las condiciones experimentales estudiadas.

b) Elongación

Tabla 7

Prueba de ANOVA para la Elongación

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	1,053	2	,527	,183	,834
Dentro de grupos	43,112	15	2,874		
Total	44,165	17			

La prueba de ANOVA de un factor realizada para evaluar la elongación no evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los grupos analizados. El análisis mostró un valor de $F = 0,183$ con una significancia de $p = 0,834$, valor superior al nivel de significancia establecido ($\alpha = 0,05$).

En consecuencia, no se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que la variable elongación no presenta diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. Estos resultados sugieren que el factor de agrupación considerado no tuvo un efecto significativo sobre la elongación del material bajo las condiciones experimentales del estudio.

Tabla 8

Prueba HSD Tukey para la Elongación

(I) TEMPERATURA	(J) TEMPERATURA	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
60,00	80,00	-,43333	,97879	,898	-2,9757	2,1091
	100,00	,13333	,97879	,990	-2,4091	2,6757
80,00	60,00	,43333	,97879	,898	-2,1091	2,9757
	100,00	,56667	,97879	,833	-1,9757	3,1091
100,00	60,00	-,13333	,97879	,990	-2,6757	2,4091
	80,00	-,56667	,97879	,833	-3,1091	1,9757

La prueba HSD de Tukey se aplicó para identificar posibles diferencias en la elongación entre los tratamientos de temperatura (60, 80 y 100 °C). Los resultados muestran que no se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre ninguna de las comparaciones realizadas ($p > 0,05$).

Las comparaciones entre 60 y 80 °C, 60 y 100 °C, así como entre 80 y 100 °C, registraron valores de significancia elevados (Sig. = 0,898; 0,990; 0,833, respectivamente). Además, en todos los casos, los intervalos de confianza al 95 % incluyeron el valor cero, lo que confirma la ausencia de diferencias significativas entre las medias de elongación.

En consecuencia, se concluye que la variación de la temperatura entre 60, 80 y 100 °C no tuvo un efecto significativo sobre la elongación del material evaluado, evidenciando un comportamiento mecánico similar bajo las condiciones térmicas analizadas.

Tabla 9

Subconjuntos homogéneos – HSD de Tukey para la Elongación

TEMPERATURA	N	Subconjunto para alfa = 0.05
		1
100,00	6	3,5500
60,00	6	3,6833
80,00	6	4,1167
Sig.		,833

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 6,000.

El análisis de subconjuntos homogéneos mediante la prueba HSD de Tukey para la elongación, considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$, mostró la conformación de un solo subconjunto homogéneo que incluye a todas las temperaturas evaluadas (60, 80 y 100 °C).

Los resultados indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de elongación correspondientes a las distintas

temperaturas, ya que todas se agrupan en el mismo subconjunto y presentan un valor de significancia elevado (Sig. = 0,833). Esto confirma que las variaciones de temperatura evaluadas no influyeron de manera significativa en la elongación del material.

En consecuencia, se concluye que la elongación se mantiene estadísticamente similar independientemente de la temperatura aplicada, dentro del rango de 60 a 100 °C, evidenciando un comportamiento homogéneo del material bajo las condiciones experimentales estudiadas.

c) Modulo Elasticidad

Tabla 10

Prueba ANOVA para el Módulo Elasticidad

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	250,781	2	125,391	,219	,806
Dentro de grupos	8588,782	15	572,585		
Total	8839,563	17			

La prueba de ANOVA de un factor realizada para evaluar el módulo de elasticidad no evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los grupos analizados. El análisis arrojó un valor de $F = 0,219$ con una significancia de $p = 0,806$, valor superior al nivel de significancia establecido ($\alpha = 0,05$).

En consecuencia, no se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que el módulo de elasticidad no presenta diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. Estos resultados sugieren que el factor de agrupación considerado no tuvo un efecto significativo sobre el comportamiento elástico del material bajo las condiciones experimentales del estudio.

Tabla 11*Prueba HSD Tukey para Modulo Elasticidad*

(I) TEMPERATURA	(J) TEMPERATURA	Diferencia de medias (I- J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
60,00	80,00	-1,51667	13,81527	,993	- 37,4014	34,3681
	100,00	-8,56667	13,81527	,812	- 44,4514	27,3181
80,00	60,00	1,51667	13,81527	,993	- 34,3681	37,4014
	100,00	-7,05000	13,81527	,868	- 42,9348	28,8348
100,00	60,00	8,56667	13,81527	,812	- 27,3181	44,4514
	80,00	7,05000	13,81527	,868	- 28,8348	42,9348

La prueba post hoc HSD de Tukey aplicada al módulo de elasticidad indicó que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos de temperatura evaluados (60, 80 y 100 °C). En todas las comparaciones pareadas, los valores de significancia fueron mayores a 0,05, lo que evidencia la ausencia de efectos significativos de la temperatura sobre la variable analizada.

Asimismo, las diferencias de medias obtenidas entre los niveles de temperatura fueron reducidas y los intervalos de confianza al 95 % incluyeron el valor cero en todos los casos, reforzando la conclusión de que no se presentan diferencias significativas entre los grupos.

En consecuencia, dentro del rango de temperaturas estudiado, la temperatura no ejerce una influencia estadísticamente significativa sobre el módulo de elasticidad del material analizado.

Tabla 12*Subconjuntos homogéneos – HSD de Tukey para el Módulo Elasticidad*

TEMPERATURA	N	Subconjunto para alfa =
		0.05
		1
60,00	6	89,4000
80,00	6	90,9167
100,00	6	97,9667
Sig.		,812

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 6,000.

El análisis de subconjuntos homogéneos mediante la prueba HSD de Tukey, aplicado al módulo de elasticidad, mostró que los tratamientos de temperatura 60, 80 y 100 °C pertenecen a un único subconjunto homogéneo para un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$.

Las medias del módulo de elasticidad para las temperaturas evaluadas fueron 89,4000 (60 °C), 90,9167 (80 °C) y 97,9867 (100 °C). A pesar de observarse variaciones numéricas entre las medias, estas no son estadísticamente significativas, como lo confirma el valor de significancia (Sig. = 0,812), superior a 0,05.

En consecuencia, los resultados indican que no existen diferencias significativas en el módulo de elasticidad entre los niveles de temperatura estudiados, reafirmando que la temperatura, dentro del rango evaluado, no influye significativamente sobre esta propiedad mecánica del material.

d) Solubilidad en agua

Tabla 13

Prueba de ANOVA de Solubilidad en agua

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	,000	2	,000	,051	,950
Dentro de grupos	,064	15	,004		
Total	,064	17			

La prueba de ANOVA de un factor aplicada a la solubilidad en agua indicó que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos evaluados. El análisis mostró un valor de $F = 0,051$ con una significancia de 0,950, valor ampliamente superior al nivel crítico de $\alpha = 0,05$.

Asimismo, la suma de cuadrados entre grupos fue mínima en comparación con la variabilidad dentro de los grupos, lo que evidencia que las diferencias observadas en la solubilidad no pueden atribuirse al factor en estudio, sino a la variabilidad propia de los datos.

En consecuencia, los resultados permiten concluir que el factor evaluado no ejerce un efecto estadísticamente significativo sobre la solubilidad en agua del material analizado.

Tabla 14*Prueba HSD Tukey para Solubilidad en agua*

(I) TEMPERATURA	(J) TEMPERATURA	Diferencia de medias (I- J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
60,00	80,00	,00333	,03760	,996	-,0943	,1010
	100,00	-,00833	,03760	,973	-,1060	,0893
80,00	60,00	-,00333	,03760	,996	-,1010	,0943
	100,00	-,01167	,03760	,948	-,1093	,0860
100,00	60,00	,00833	,03760	,973	-,0893	,1060
	80,00	,01167	,03760	,948	-,0860	,1093

La prueba post hoc HSD de Tukey aplicada a la solubilidad en agua mostró que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos de temperatura evaluados (60, 80 y 100 °C). En todas las comparaciones pareadas, los valores de significancia fueron superiores a 0,05, lo que indica la ausencia de diferencias significativas entre los grupos.

Las diferencias de medias observadas entre las temperaturas fueron mínimas y los intervalos de confianza al 95 % incluyeron el valor cero en todos los casos, lo cual confirma que las variaciones registradas en la solubilidad no son atribuibles al efecto de la temperatura.

En consecuencia, dentro del rango de temperaturas estudiado, la temperatura no ejerce una influencia estadísticamente significativa sobre la solubilidad en agua del material analizado.

Tabla 15*Subconjuntos homogéneos – HSD de Tukey para Solubilidad en agua*

TEMPERATURA	N	Subconjunto para alfa = 0.05
		1
80,00	6	,2167
60,00	6	,2200
100,00	6	,2283
Sig.		,948

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 6,000.

El análisis de subconjuntos homogéneos mediante la prueba HSD de Tukey, aplicado a la solubilidad en agua, evidenció que los tratamientos de temperatura 60, 80 y 100 °C se agrupan en un único subconjunto homogéneo para un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$.

Las medias de solubilidad obtenidas fueron 0,2167 para 80 °C, 0,2200 para 60 °C y 0,2283 para 100 °C. Si bien se observan ligeras diferencias numéricas entre las medias, estas no resultan estadísticamente significativas, lo cual se confirma con el valor de significancia (Sig. = 0,948), superior a 0,05.

En consecuencia, los resultados indican que la variación de la temperatura en el rango evaluado no genera diferencias significativas en la solubilidad en agua del material analizado.

e) Densidad

Tabla 16

Prueba de ANOVA de Densidad

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	,000	2	,000	,053	,949
Dentro de grupos	,030	15	,002		
Total	,030	17			

La prueba de ANOVA de un factor aplicada a la densidad mostró que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos evaluados. El análisis arrojó un valor de $F = 0,053$ y una significancia de 0,949, valor superior al nivel de significancia establecido ($\alpha = 0,05$).

Asimismo, la variabilidad entre grupos fue mínima en comparación con la variabilidad dentro de los grupos, lo que indica que las diferencias observadas en los valores de densidad no pueden atribuirse al factor en estudio.

En consecuencia, los resultados permiten concluir que el factor evaluado no ejerce un efecto estadísticamente significativo sobre la densidad del material analizado.

Tabla 17*Prueba HSD Tukey para Densidad*

(I) TEMPERATURA	(J) TEMPERATURA	Diferencia		Sig.	Intervalo de	
		de medias (I- J)	Desv. Error		confianza al 95% Límite inferior	Límite superior
60,00	80,00	-,00500	,02583	,980	-,0721	,0621
	100,00	,00333	,02583	,991	-,0638	,0704
80,00	60,00	,00500	,02583	,980	-,0621	,0721
	100,00	,00833	,02583	,944	-,0588	,0754
100,00	60,00	-,00333	,02583	,991	-,0704	,0638
	80,00	-,00833	,02583	,944	-,0754	,0588

La prueba post hoc HSD de Tukey aplicada a la densidad indicó que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos de temperatura evaluados (60, 80 y 100 °C). En todas las comparaciones pareadas, los valores de significancia (Sig.) fueron mayores a 0,05, lo que evidencia la ausencia de diferencias significativas entre los grupos.

Las diferencias de medias obtenidas fueron mínimas y los intervalos de confianza al 95 % incluyeron el valor cero en todos los casos, lo que confirma que las variaciones observadas en la densidad no son atribuibles al efecto de la temperatura.

En consecuencia, dentro del rango de temperaturas estudiado, la temperatura no ejerce una influencia estadísticamente significativa sobre la densidad del material analizado.

Tabla 18*Subconjuntos homogéneos – HSD de Tukey para Densidad*

TEMPERATURA	N	Subconjunto para alfa =
		0.05
		1
100,00	6	1,3000
60,00	6	1,3033
80,00	6	1,3083
Sig.		,944

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 6,000.

El análisis de subconjuntos homogéneos mediante la prueba HSD de Tukey, aplicado a la densidad, mostró que los tratamientos de temperatura 60, 80 y 100 °C se agrupan en un único subconjunto homogéneo para un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$.

Las medias de densidad obtenidas fueron 1,3000 para 100 °C, 1,3033 para 60 °C y 1,3083 para 80 °C. Si bien se observan ligeras variaciones numéricas entre las medias, estas no resultan estadísticamente significativas, lo cual se confirma con el valor de significancia (Sig. = 0,944), superior a 0,05.

En consecuencia, los resultados indican que la variación de la temperatura en el rango evaluado no genera diferencias estadísticamente significativas en la densidad del material analizado.

➤ **Análisis de Regresión Lineal**

– **Regresión lineal entre temperatura y propiedades del bioplástico**

Se aplicó un modelo de regresión lineal simple para analizar la relación entre la temperatura de procesamiento (variable independiente) y las propiedades físico-mecánicas (variables dependientes).

a) Resistencia a la Tracción

Tabla 19

Resumen del modelo para la Resistencia a la Tracción

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,056 ^a	,003	-,059	,08997

a. Predictores: (Constante), TEMPERATURA

b. Variable dependiente: RESISTENCIA_TRACCION

El resumen del modelo de regresión para la resistencia a la tracción, considerando la temperatura como variable predictora, muestra un coeficiente de correlación $R = 0,056$, lo que indica una relación muy débil entre la temperatura y la resistencia a la tracción.

El valor de R cuadrado ($R^2 = 0,003$) señala que el modelo explica únicamente el 0,3 % de la variabilidad de la resistencia a la tracción, mientras que el R cuadrado ajustado (-0,059) confirma que el ajuste del modelo es deficiente, incluso inferior a lo esperado por azar. Asimismo, el error estándar de la estimación (0,08997) sugiere una limitada capacidad predictiva del modelo.

En consecuencia, los resultados indican que la temperatura no constituye un predictor significativo de la resistencia a la tracción, evidenciando que las variaciones observadas en esta propiedad no pueden explicarse mediante el modelo propuesto.

Tabla 20*Prueba de Anova*

	Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
	Regresión	,000	1	,000	,050	,825 ^b
1	Residuo	,130	16	,008		
	Total	,130	17			

a. Variable dependiente: RESISTENCIA_TRACCION

b. Predictores: (Constante), TEMPERATURA

La prueba ANOVA del modelo de regresión aplicada a la resistencia a la tracción, considerando la temperatura como variable predictora, mostró que el modelo no es estadísticamente significativo. El análisis arrojó un valor de $F = 0,050$ con una significancia de $0,825$, valor superior al nivel de significancia establecido ($\alpha = 0,05$).

Asimismo, la suma de cuadrados asociada a la regresión fue mínima en comparación con la del residuo, lo que indica que la variabilidad explicada por el modelo es prácticamente nula.

En consecuencia, los resultados confirman que la temperatura no ejerce un efecto significativo sobre la resistencia a la tracción, y que el modelo de regresión propuesto no presenta capacidad explicativa ni predictiva para esta variable.

Tabla 21*Coeficientes para la Resistencia a la Tracción*

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	95,0% intervalo de confianza de confianza para B		Estadísticas de colinealidad	
	B	Desv. Error	Beta			Límite inferior	Límite superior	Tolerancia	VIF
1	(Constante)	0,301	0,106						
	TEMPERATURA	0,000	0,001	-0,056	-0,225	0,825	-0,003	0,002	1,000

a. Variable dependiente: RESISTENCIA_TRACCION

El análisis de los coeficientes del modelo de regresión para la resistencia a la tracción indicó que la temperatura no presenta un efecto estadísticamente significativo sobre la variable dependiente. El coeficiente no estandarizado asociado a la temperatura fue $B = 0,000$, con un valor de $t = 0,225$ y una significancia de 0,825, superior al nivel crítico de $\alpha = 0,05$.

Asimismo, el coeficiente estandarizado ($\beta = -0,056$) evidencia una relación débil y negativa entre la temperatura y la resistencia a la tracción. El intervalo de confianza al 95 % para el coeficiente de la temperatura incluye el valor cero, lo que confirma la ausencia de un efecto significativo.

Por otro lado, el término constante resultó estadísticamente significativo ($p = 0,012$), indicando un valor promedio de la resistencia a la tracción independiente de la temperatura. Las estadísticas de colinealidad (tolerancia = 1,000; VIF = 1,000) confirman que no existen problemas de colinealidad en el modelo.

En consecuencia, los resultados permiten concluir que la temperatura no influye significativamente en la resistencia a la tracción del material analizado.

Tabla 22*Diagnósticos de Colinealidad para la Resistencia de Tracción*

Modelo	Dimensión	Autovalor	Índice de condición	Proporciones de varianza (Constante) TEMPERATURA	
1	1	1,980	1,000	,01	,01
	2	,020	9,899	,99	,99

a. Variable dependiente: RESISTENCIA_TRACCION

La Tabla 22 muestra los diagnósticos de colinealidad del modelo de regresión para la variable dependiente resistencia de tracción. Los resultados indican que el modelo tiene dos dimensiones, donde la primera dimensión tiene un autovalor de 1,980 y un índice de condición de 1,000; la segunda dimensión tiene un autovalor bajo (0,020) e índice de condición 9,899. Según criterios estadísticos, índices de condición menores a 10 no evidencian problemas severos en colinealidad.

Las proporciones de varianza también indican que en la segunda dimensión tanto la constante como la variable temperatura concentran el 99% de la varianza; sin embargo, dado que el índice de condición no supera los umbrales críticos (≥ 15 o ≥ 30), no se considera que exista colinealidad problemática entre las variables independientes del modelo.

Por lo tanto, se concluye que no hay evidencia de colinealidad significativa entre la variable temperatura y la constante; así los coeficientes estimados del modelo regresión son estables y confiables para explicar resistencia a tracción.

b) Elongación

Tabla 23

Resumen del modelo para la Elongación

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,035 ^a	,001	-,061	1,66042

a. Predictores: (Constante), TEMP

b. Variable dependiente: ENLONGACION

En la Tabla 23 se presenta el resumen del modelo de regresión lineal simple estimado para la elongación en función de la temperatura (TEMP). Los resultados evidencian un ajuste muy bajo del modelo: el coeficiente de correlación fue $R = 0.035$, lo que indica una asociación lineal prácticamente inexistente entre las variables. En concordancia, el coeficiente de determinación fue $R^2 = 0.001$, por lo que la temperatura explica únicamente el 0.1% de la variabilidad observada en la elongación.

Asimismo, el R^2 ajustado resultó negativo (-0.061), lo cual sugiere que, al considerar la penalización por el número de predictores y el tamaño muestral, el modelo no mejora la capacidad predictiva respecto a un modelo nulo (basado solo en la media de la elongación). Finalmente, el error estándar de la estimación fue 1.68042, indicando una magnitud de error promedio en la predicción cercana a ± 1.68 unidades de elongación.

En conjunto, estos indicadores muestran que la temperatura no presenta capacidad explicativa relevante sobre la elongación dentro del modelo evaluado.

Tabla 24*Prueba de ANOVA*

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	,053	1	,053	,019	,891 ^b
	Residuo	44,112	16	2,757		
	Total	44,165	17			

a. Variable dependiente: ENLONGACION

b. Predictores: (Constante), TEMP

En la Tabla 24 se muestra la prueba ANOVA del modelo de regresión lineal simple que evalúa si la temperatura (TEMP) predice la elongación. Los resultados indican que el modelo no es estadísticamente significativo, ya que se obtuvo un valor $F(1,16) = 0.019$ con una significancia de $p = 0.891$.

Esto implica que no hay evidencia suficiente para afirmar que la temperatura explique cambios en la elongación en la muestra analizada. En términos de variabilidad, la suma de cuadrados atribuida a la regresión fue muy pequeña ($SC = 0.053$) en comparación con la variabilidad no explicada (residuo: $SC = 44.112$), lo que confirma que el modelo no mejora de manera relevante la predicción de la elongación.

Tabla 25*Coefficientes para la Elongación*

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	95,0% intervalo de confianza de confianza para B		Estadísticas de colinealidad		
	B	Desv. Error	Beta			Límite inferior	Límite superior	Tolerancia	VIF	
1	(Constante)	3,917	1,035		3,783	0,002	1,722	6,112		
	TEMP	-0,067	0,479	-0,035	-0,139	0,891	-1,083	0,949	1,000	1,000

a. Variable dependiente: ENLONGACION

En la Tabla 25 se presentan los coeficientes del modelo de regresión lineal simple para la elongación en función de la temperatura (TEMP). El intercepto fue estadísticamente significativo ($B = 3.917$, $EE = 1.035$; $t = 3.783$, $p = 0.002$), con un IC 95% entre 1.722 y 6.112, lo que indica que, cuando $TEMP = 0$, el valor esperado de elongación se sitúa alrededor de 3.917 unidades.

En contraste, la temperatura no mostró un efecto significativo sobre la elongación ($B = -0.067$, $EE = 0.479$; $\beta = -0.035$; $t = -0.139$, $p = 0.891$). El IC 95% para el coeficiente de TEMP (-1.083 a 0.949) incluye el valor cero, confirmando la ausencia de evidencia estadística de un efecto. En términos prácticos, el cambio estimado (una disminución de 0.067 unidades de elongación por cada unidad de incremento en TEMP) es muy pequeño y no se diferencia del azar en esta muestra.

Finalmente, las estadísticas de colinealidad (tolerancia = 1.000; VIF = 1.000) indican que no existen problemas de multicolinealidad, lo cual es esperable al tratarse de un modelo con un único predictor.

Tabla 26

Diagnósticos de Colinealidad para la Elongación

Modelo	Dimensión	Autovalor	Índice de condición	Proporciones de varianza	
				(Constante)	TEMP
1	1	1,926	1,000	,04	,04
	2	,074	5,095	,96	,96

a. Variable dependiente: ENLONGACION

En la Tabla 26 se presentan los diagnósticos de colinealidad del modelo para la elongación. Al tratarse de una regresión con un solo predictor (TEMP) y la constante, se obtienen dos dimensiones. El índice de condición fue 1.000 en la primera dimensión y 5.095 en la segunda, valores que se consideran bajos y no sugieren problemas de colinealidad (generalmente se considera preocupación con índices mucho más altos).

Respecto a las proporciones de varianza, en la dimensión 2 se concentra la mayor parte de la varianza tanto de la constante (0.96) como de TEMP (0.96); sin embargo, dado que el índice de condición asociado (5.095) es reducido, esta concentración no representa un indicio de multicolinealidad problemática. En conjunto, los resultados confirman que no existen problemas de colinealidad en el modelo estimado para la elongación.

c) Modulo Elasticidad

Tabla 27

Resumen del modelo para el Módulo Elasticidad

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,158 ^a	,025	-,036	23,21018

a. Predictores: (Constante), TEMP

b. Variable dependiente: MODULO_ELASTICIDAD

En la Tabla 27 se presenta el resumen del modelo de regresión lineal simple estimado para el módulo de elasticidad en función de la temperatura (TEMP). Los resultados muestran una relación lineal débil entre las variables ($R = 0.158$). En consecuencia, el coeficiente de determinación fue bajo ($R^2 = 0.025$), lo que indica que la temperatura explica aproximadamente el 2.5% de la variabilidad del módulo de elasticidad.

Adicionalmente, el R^2 ajustado fue negativo (-0.038), lo cual sugiere que, al considerar el tamaño muestral, el modelo no mejora el ajuste respecto a un modelo nulo (basado únicamente en la media del módulo de elasticidad). Finalmente, el error estándar de la estimación fue 23.21018, reflejando una desviación promedio cercana a ± 23.21 unidades entre los valores observados y los valores predichos por el modelo. En conjunto, estos indicadores evidencian que Temperatura tiene una capacidad explicativa limitada sobre el módulo de elasticidad en el modelo evaluado.

Tabla 28*Prueba de ANOVA*

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	220,163	1	220,163	,409	,532 ^b
	Residuo	8619,399	16	538,712		
	Total	8839,563	17			

a. Variable dependiente: MODULO_ELASTICIDAD

b. Predictores: (Constante), TEMP

En la Tabla 28 se presenta la prueba ANOVA del modelo de regresión lineal simple que evalúa el efecto de Temperatura sobre el módulo de elasticidad. Los resultados muestran que el modelo no es estadísticamente significativo, con $F(1,16) = 0.409$ y $p = 0.532$.

Esto indica que no existe evidencia suficiente para afirmar que la temperatura prediga el módulo de elasticidad en la muestra analizada. En términos de variabilidad, la suma de cuadrados explicada por el modelo (SC regresión = 220.163) es reducida frente a la variabilidad no explicada (SC residuo = 8619.399), confirmando que el modelo aporta una mejora mínima en la explicación del módulo de elasticidad.

Tabla 29*Coefficientes para el Módulo Elasticidad*

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		t	Sig.	95,0% intervalo de confianza para B		Estadísticas de colinealidad	
	B	Desv. Error	Beta				Límite inferior	Límite superior	Tolerancia	VIF
1	(Constante)	84,194	14,474		5,817	0,000	53,511	114,878		
	TEMP	4,283	6,700	0,158	0,639	0,532	-9,920	18,487	1,000	1,000

a. Variable dependiente: MODULO_ELASTICIDAD

En la Tabla 29 se presentan los coeficientes del modelo de regresión lineal simple para el módulo de elasticidad en función de la temperatura (TEMP). El intercepto fue estadísticamente significativo ($B = 84.194$, $EE = 14.474$; $t = 5.817$, $p < 0.001$), con un IC 95% entre 53.511 y 114.878, lo que indica que, cuando $TEMP = 0$, el módulo de elasticidad esperado se ubica alrededor de 84.194 unidades.

Por el contrario, la temperatura no mostró un efecto estadísticamente significativo sobre el módulo de elasticidad ($B = 4.283$, $EE = 6.700$; $\beta = 0.158$; $t = 0.639$, $p = 0.532$). El IC 95% del coeficiente de TEMP (-9.920 a 18.487) incluye el valor cero, confirmando que el efecto estimado es compatible tanto con incrementos como con disminuciones del módulo de elasticidad. En términos prácticos, aunque el coeficiente sugiere un aumento promedio de 4.283 unidades del módulo por cada unidad de TEMP, esta variación no es concluyente dentro de la muestra analizada.

Finalmente, las estadísticas de colinealidad (tolerancia = 1.000; VIF = 1.000) evidencian ausencia de multicolinealidad, lo cual es esperable dado que el modelo incluye un único predictor.

Tabla 30*Diagnósticos de Colinealidad para el Módulo Elasticidad*

Modelo	Dimensión	Autovalor	Índice de condición	Proporciones de varianza (Constante)	TEMP
1	1	1,926	1,000	,04	,04
	2	,074	5,095	,96	,96

a. Variable dependiente: MODULO_ELASTICIDAD

En la Tabla 30 se presentan los diagnósticos de colinealidad del modelo de regresión para el módulo de elasticidad. Al incluir únicamente la constante y el predictor TEMP, se obtienen dos dimensiones. El índice de condición fue 1.000 en la dimensión 1 y 5.095 en la dimensión 2, valores bajos que no sugieren problemas de colinealidad.

En cuanto a las proporciones de varianza, se observa que en la dimensión 2 se concentra gran parte de la varianza tanto de la constante (0.96) como de TEMP (0.96); no obstante, debido a que el índice de condición asociado es reducido (5.095), esta concentración no representa evidencia de multicolinealidad problemática. En conjunto, los resultados indican que no existen problemas de colinealidad en el modelo estimado para el módulo de elasticidad.

d) Solubilidad en agua**Tabla 31***Resumen del modelo para la Solubilidad en Agua*

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,057 ^a	,003	-,059	,06317

a. Predictores: (Constante), TEMP

b. Variable dependiente: SOLUDIBILIDAD_AGUA

En la Tabla 31 se presenta el resumen del modelo de regresión lineal simple estimado para la solubilidad en agua en función de la temperatura (TEMP). Los

resultados muestran una asociación lineal prácticamente nula ($R = 0.057$). En consecuencia, el coeficiente de determinación fue muy bajo ($R^2 = 0.003$), lo que indica que la temperatura explica únicamente el 0.3% de la variabilidad observada en la solubilidad en agua.

Adicionalmente, el R^2 ajustado fue negativo (-0.059), lo cual sugiere que, al considerar el tamaño muestral, el modelo no mejora el ajuste respecto a un modelo nulo (basado solo en la media de la solubilidad). Finalmente, el error estándar de la estimación fue 0.06317, reflejando una desviación promedio cercana a ± 0.063 unidades entre los valores observados y los predichos por el modelo. En conjunto, estos indicadores evidencian que TEMP tiene una capacidad explicativa mínima sobre la solubilidad en agua en el modelo evaluado.

Tabla 32

Prueba de ANOVA

		Suma de		Media		
Modelo		cuadrados	gl	cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	,000	1	,000	,052	,822 ^b
	Residuo	,064	16	,004		
	Total	,064	17			

a. Variable dependiente: SOLUDIBILIDAD_AGUA

b. Predictores: (Constante), TEMP

En la Tabla 32 se presenta la prueba ANOVA del modelo de regresión lineal simple que evalúa el efecto de TEMP sobre la solubilidad en agua. Los resultados indican que el modelo no es estadísticamente significativo, con $F(1,16) = 0.052$ y $p = 0.822$.

Esto significa que no se cuenta con evidencia suficiente para afirmar que la temperatura prediga la solubilidad en agua en la muestra analizada. Además, la variabilidad explicada por la regresión es prácticamente nula (SC regresión ≈ 0.000) en comparación con la variabilidad no explicada (SC residuo = 0.064), lo cual confirma que el modelo aporta una mejora mínima en la explicación de la solubilidad en agua.

Tabla 33*Coefficientes para la Solubilidad en Agua*

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	95,0% intervalo de confianza para B		Estadísticas de colinealidad	
	B	Desv. Error	Beta			Límite inferior	Límite superior	Tolerancia	VIF
1 (Constante)	0,213	0,039		5,416	0,000	0,130	0,297		
TEMP	0,004	0,018	0,057	0,229	0,822	-0,034	0,043	1,000	1,000

a. Variable dependiente: SOLUDIBILIDAD_AGUA

En la Tabla 33 se presentan los coeficientes del modelo de regresión lineal simple para la solubilidad en agua en función de la temperatura (TEMP). El intercepto fue estadísticamente significativo ($B = 0.213$, $EE = 0.039$; $t = 5.416$, $p < 0.001$), con un IC 95% entre 0.130 y 0.297, lo que indica que, cuando $TEMP = 0$, la solubilidad esperada se sitúa alrededor de 0.213 unidades.

En contraste, la temperatura no mostró un efecto estadísticamente significativo sobre la solubilidad en agua ($B = 0.004$, $EE = 0.018$; $\beta = 0.057$; $t = 0.229$, $p = 0.822$). El IC 95% del coeficiente de TEMP (-0.034 a 0.043) incluye el valor cero, lo que confirma que el efecto estimado es compatible con aumentos, disminuciones o ausencia de cambio en la solubilidad al variar la temperatura. Por tanto, el cambio estimado ($\approx +0.004$ unidades por cada unidad de TEMP) resulta pequeño y no concluyente.

Finalmente, las estadísticas de colinealidad (tolerancia = 1.000; VIF = 1.000) indican ausencia de multicolinealidad, lo cual es esperable dado que el modelo incluye un único predictor.

Tabla 34*Diagnósticos de Colinealidad para la Solubilidad en Agua*

Modelo	Dimensión	Autovalor	Índice de condición	Proporciones de varianza (Constante)	TEMP
1	1	1,926	1,000	,04	,04
	2	,074	5,095	,96	,96

a. Variable dependiente: SOLUDIBILIDAD_AGUA

En la Tabla 34 se presentan los diagnósticos de colinealidad del modelo de regresión para la solubilidad en agua. Dado que el modelo incluye únicamente la constante y el predictor Temperatura, se obtienen dos dimensiones. El índice de condición fue 1.000 en la dimensión 1 y 5.095 en la dimensión 2, valores bajos que no sugieren presencia de colinealidad.

Respecto a las proporciones de varianza, en la dimensión 2 se concentra la mayor parte de la varianza tanto de la constante (0.96) como de TEMP (0.96); sin embargo, al estar asociada a un índice de condición reducido (5.095), esta concentración no constituye evidencia de multicolinealidad problemática. En conjunto, los resultados confirman que no existen problemas de colinealidad en el modelo estimado para la solubilidad en agua.

e) Densidad**Tabla 35***Resumen del modelo para la Densidad*

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,033 ^a	,001	-,061	,04344

a. Predictores: (Constante), TEMP

b. Variable dependiente: DENSIDAD

La Tabla 35 presenta el resumen del modelo de regresión lineal simple donde la densidad es la variable dependiente y la temperatura (TEMP) es el

predictor. El modelo muestra una correlación muy baja entre temperatura y densidad ($R = 0.033$), lo que indica una relación prácticamente nula.

Asimismo, el coeficiente de determinación es $R^2 = 0.001$, lo que significa que la temperatura explica aproximadamente 0.1% de la variación observada en la densidad. Además, el R^2 ajustado es -0.081 , lo que sugiere que el modelo no mejora la predicción respecto a un modelo sin predictor (solo con la constante), evidenciando que la temperatura no aporta capacidad explicativa real.

Finalmente, el error estándar de la estimación fue 0.04344, reflejando la dispersión de los valores de densidad alrededor de la recta estimada. En conjunto, estos resultados indican que la temperatura no es un predictor útil de la densidad del bioplástico dentro del rango evaluado.

Tabla 36

Prueba de ANOVA

		Suma de		Media		
Modelo		cuadrados	gl	cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	,000	1	,000	,018	,896 ^b
	Residuo	,030	16	,002		
	Total	,030	17			

a. Variable dependiente: DENSIDAD

b. Predictores: (Constante), TEMP

La Tabla 36 muestra la prueba ANOVA del modelo de regresión lineal simple que evalúa si la temperatura (TEMP) predice de manera significativa la densidad del bioplástico.

Los resultados indican que el modelo no es estadísticamente significativo ($F = 0.018$; $p = 0.896$). Esto significa que, con el nivel de significancia usual ($\alpha = 0.05$), no existe evidencia suficiente para afirmar que la temperatura explique cambios en la densidad.

Además, se observa que la suma de cuadrados de regresión es prácticamente 0.000, mientras que la mayor parte de la variabilidad corresponde

al residuo (0.030), lo que refuerza que la variación en densidad se debe principalmente a factores no incluidos en este modelo (o a variabilidad experimental) y no a la temperatura.

En conclusión, la prueba ANOVA confirma que la temperatura no tiene un efecto significativo sobre la densidad en las condiciones evaluadas.

Tabla 37

Coefficientes para la Densidad

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		t	Sig.	95,0% intervalo de confianza para B		Estadísticas de colinealidad	
	B	Desv. Error	Beta				Límite inferior	Límite superior	Tolerancia	VIF
1 (Constante)	1,307	0,027			48,254	0,000	1,250	1,365		
TEMP	-0,002	0,013	-0,033		-0,133	0,896	-0,028	0,025	1,000	1,000

a. Variable dependiente: DENSIDAD

La Tabla 37 presenta los coeficientes del modelo de regresión lineal simple donde la densidad es la variable dependiente y la temperatura (TEMP) el predictor.

Se observa que el intercepto (constante) es $B = 1.307$ ($EE = 0.027$), lo que representa el valor estimado de densidad cuando la temperatura se considera en cero unidades dentro del modelo (valor de referencia matemático).

Para la temperatura, el coeficiente no estandarizado es $B = -0.002$ ($EE = 0.013$), indicando que, por cada aumento de 1 unidad en temperatura, la densidad disminuiría en promedio 0.002 unidades; sin embargo, este efecto es mínimo y no significativo ($t = -0.133$; $p = 0.896$). El coeficiente estandarizado también es casi nulo ($\beta = -0.033$), confirmando una relación extremadamente débil.

El intervalo de confianza al 95% para el efecto de la temperatura va de -0.028 a 0.025 , lo cual incluye el cero, reforzando que no puede afirmarse un efecto real de la temperatura sobre la densidad.

Finalmente, las estadísticas de colinealidad muestran tolerancia = 1.000 y VIF = 1.000, lo cual indica ausencia de multicolinealidad (esperable al haber un solo predictor).

En conclusión, los coeficientes del modelo confirman que la temperatura no predice de manera significativa la densidad del bioplástico en las condiciones evaluadas.

Tabla 38

Diagnósticos de Colinealidad para la Densidad

Modelo	Dimensión	Autovalor	Índice de condición	Proporciones de varianza	
				(Constante)	TEMP
1	1	1,926	1,000	,04	,04
	2	,074	5,095	,96	,96

a. Variable dependiente: DENSIDAD

La Tabla 38 muestra los diagnósticos de colinealidad del modelo de regresión para la densidad, considerando como predictor a la temperatura (TEMP).

Los resultados presentan dos dimensiones con autovalores de 1.928 y 0.074. El índice de condición es 1.000 para la primera dimensión y 5.095 para la segunda. En términos de interpretación, valores del índice de condición por debajo de 10 suelen considerarse bajos, lo que indica que no existe un problema relevante de colinealidad en el modelo.

Además, las proporciones de varianza muestran que en la dimensión 2 se concentra gran parte de la varianza tanto para la constante (0.96) como para TEMP (0.96); sin embargo, al tratarse de un modelo con un solo predictor, este patrón no implica multicolinealidad problemática, ya que la multicolinealidad se vuelve crítica cuando existen múltiples predictores correlacionados entre sí.

En conclusión, los diagnósticos confirman que el modelo para densidad no presenta colinealidad significativa, por lo que la falta de significancia del efecto de

la temperatura se debe a que realmente no explica la densidad, y no a un problema estadístico de colinealidad.

Interpretación General del Objetivo Especifico 2

En el análisis inferencial, la temperatura de procesamiento (60, 80 y 100 °C) no mostró ser un factor que diferencie estadísticamente las propiedades evaluadas del bioplástico. En resistencia a la tracción, el ANOVA indicó ausencia de diferencias significativas ($p = 0,969$), y el post hoc de Tukey confirmó que las comparaciones por pares no fueron significativas ($p > 0,05$), por lo que el material mantuvo un comportamiento mecánico similar en todo el rango térmico. Lo mismo ocurrió con la elongación, donde el ANOVA tampoco evidenció diferencias ($p = 0,834$), y con el módulo de elasticidad ($p = 0,806$).

En propiedades físico-químicas, la solubilidad en agua tampoco varió significativamente con la temperatura ($p = 0,950$) y la densidad se mantuvo estadísticamente estable ($p = 0,949$). La síntesis del objetivo específico resume este patrón: en el rango 60–100 °C, la temperatura no fue un factor diferenciador para resistencia, elongación, módulo, solubilidad ni densidad.

3.3. Objetivo Especifico 3: Determinar la influencia del tipo de aditivo en las propiedades físico-mecánicas y biodegradables del bioplástico.

a) Resistencia a la Tracción

Tabla 39

Prueba de ANOVA para la Resistencia a la Tracción

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	,417	2	,209	28,679	,000
Dentro de grupos	,109	15	,007		
Total	,526	17			

Se aplicó un ANOVA de un factor para evaluar si existían diferencias en la resistencia a la tracción entre los grupos analizados (tres niveles). Los resultados muestran que el efecto del grupo fue estadísticamente significativo, $F(2, 15) = 28.679$, $p < .001$, por lo que se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias. Esto indica que al menos un grupo presenta una media de resistencia a la tracción diferente respecto a los demás.

Además, el tamaño del efecto fue alto, con $\eta^2 = 0.79$ (calculado como $SS_{\text{entre}} / SS_{\text{total}} = 0.417 / 0.526$), lo que sugiere que el factor “grupo” explica aproximadamente el 79% de la variabilidad observada en la resistencia a la tracción.

Tabla 40*Prueba HSD Tukey para Resistencia a la Tracción*

(I) TIPO DE ADITIVO	(J) TIPO DE ADITIVO	Diferencia		Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
		de medias (I-J)	Desv. Error		Límite inferior	Límite superior
1,00	2,00	,15556*	,04495	,009	,0388	,2723
	3,00	,42556*	,05685	,000	,2779	,5732
2,00	1,00	-,15556*	,04495	,009	-,2723	-,0388
	3,00	,27000*	,06030	,001	,1134	,4266
3,00	1,00	-,42556*	,05685	,000	-,5732	-,2779
	2,00	-,27000*	,06030	,001	-,4266	-,1134

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Debido a que el ANOVA mostró diferencias significativas en la resistencia a la tracción, se aplicó la prueba HSD de Tukey ($\alpha = .05$) para identificar entre qué tipos de aditivo se presentaban dichas diferencias. Los resultados indican que todas las comparaciones por pares fueron estadísticamente significativas, lo cual confirma que los tres tipos de aditivo difieren entre sí en resistencia a la tracción.

En particular, el Tipo 1 presentó una resistencia significativamente mayor que el Tipo 2 (diferencia de medias = 0.15558, $p = .009$, IC95% [0.0388, 0.2723]) y que el Tipo 3 (diferencia de medias = 0.42558, $p < .001$, IC95% [0.2779, 0.5732]). Asimismo, el Tipo 2 mostró una resistencia significativamente mayor que el Tipo 3 (diferencia de medias = 0.27000, $p = .001$, IC95% [0.1134, 0.4266]).

En conjunto, los resultados del Tukey evidencian un patrón consistente en el rendimiento de los aditivos sobre la resistencia a la tracción, con el siguiente orden: Tipo 1 > Tipo 2 > Tipo 3. Por lo tanto, el Tipo 1 se asocia con los valores más altos de resistencia a la tracción, mientras que el Tipo 3 presenta los valores más bajos.

Tabla 41*Subconjuntos homogéneos – HSD de Tukey para Resistencia a la Tracción*

TIPO DE ADITIVO	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
3,00	3	,2533		
2,00	6		,5233	
1,00	9			,6789
Sig.		1,000	1,000	1,000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

- Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 4,909.
- Los tamaños de grupo no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de grupo. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

La Tabla 41 presenta los subconjuntos homogéneos obtenidos mediante la prueba HSD de Tukey ($\alpha = 0.05$) para la resistencia a la tracción, agrupando aquellos tipos de aditivo cuyas medias no difieren significativamente entre sí.

Los resultados muestran que cada tipo de aditivo aparece en un subconjunto distinto, sin solapamiento entre grupos:

Tipo 3 (N = 3) se ubica solo en el Subconjunto 1, con media 0.2533.

Tipo 2 (N = 6) se ubica solo en el Subconjunto 2, con media 0.5233.

Tipo 1 (N = 9) se ubica solo en el Subconjunto 3, con media 0.6789.

El hecho de que no existan subconjuntos compartidos indica que los tres tipos de aditivo difieren significativamente entre sí en resistencia a la tracción (es decir, no hay pares “estadísticamente iguales” al 5%). En consecuencia, se confirma el patrón de medias:

Tipo 1 > Tipo 2 > Tipo 3.

Finalmente, debido a que los tamaños muestrales son diferentes, el procedimiento utiliza la media armónica; por ello, los resultados deben interpretarse considerando que el control estricto del error tipo I puede no estar

plenamente garantizado bajo tamaños de grupo desiguales (tal como advierte la nota de la tabla).

b) Elongación

Tabla 42

Prueba de ANOVA para Elongación

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	1141,365	2	570,682	31,652	,000
Dentro de grupos	270,451	15	18,030		
Total	1411,816	17			

Se realizó un ANOVA de un factor con el fin de comparar la elongación entre los grupos evaluados. El análisis evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los grupos, $F(2, 15) = 31.652$, $p < .001$ (en la salida aparece .000, por convención se reporta como $p < .001$). En consecuencia, se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias, indicando que al menos un grupo presenta una media de elongación diferente respecto a los demás.

Además, el tamaño del efecto fue alto, con $\eta^2 = 0.81$ ($SS_{\text{entre}} = 1141.365$; $SS_{\text{total}} = 1411.816$), lo que indica que aproximadamente el 81% de la variabilidad observada en la elongación se explica por el factor de agrupación.

Tabla 43*Prueba HSD Tukey para la Elongación*

(I) TIPO DE ADITIVO	(J) TIPO DE ADITIVO	Diferencia de medias (I-J)		Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
1,00	2,00	9,78167*	2,23793	,001		3,9687	15,5946
	3,00	21,76667*	2,83079	,000		14,4138	29,1196
2,00	1,00	-9,78167*	2,23793	,001		-15,5946	-3,9687
	3,00	11,98500*	3,00250	,003		4,1861	19,7839
3,00	1,00	-21,76667*	2,83079	,000		-29,1196	-14,4138
	2,00	-11,98500*	3,00250	,003		-19,7839	-4,1861

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Como el ANOVA indicó diferencias significativas en la elongación, se aplicó la prueba post hoc HSD de Tukey ($\alpha = 0.05$) para identificar entre qué tipos de aditivo se encontraban dichas diferencias. Los resultados muestran que todas las comparaciones por pares fueron estadísticamente significativas, por lo que los tres tipos de aditivo difieren entre sí en elongación.

En particular:

Tipo 1 vs. Tipo 2: el Tipo 1 presentó mayor elongación que el Tipo 2 ($\Delta M = 9,78167$, $p = .001$, IC95% [3,9687; 15,5946]).

Tipo 1 vs. Tipo 3: el Tipo 1 presentó mayor elongación que el Tipo 3 ($\Delta M = 21,78667$, $p < .001$, IC95% [14,4138; 29,1198]).

Tipo 2 vs. Tipo 3: el Tipo 2 presentó mayor elongación que el Tipo 3 ($\Delta M = 11,98500$, $p = .003$, IC95% [4,1881; 19,7839]).

En conjunto, el análisis post hoc confirma un orden consistente en la elongación según el tipo de aditivo: Tipo 1 > Tipo 2 > Tipo 3, siendo el Tipo 1 el de mayor elongación y el Tipo 3 el de menor.

Tabla 44*Subconjuntos homogéneos – HSD de Tukey para Elongación*

TIPO DE ADITIVO	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
3,00	3	7,4733		
2,00	6		19,4583	
1,00	9			29,2400
Sig.		1,000	1,000	1,000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

- Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 4,909.
- Los tamaños de grupo no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de grupo. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

La Tabla 44 muestra los subconjuntos homogéneos obtenidos mediante la prueba HSD de Tukey ($\alpha = 0.05$) para la variable elongación, agrupando aquellos tipos de aditivo cuyas medias no presentan diferencias significativas entre sí.

Los resultados indican que cada tipo de aditivo se ubica en un subconjunto diferente, sin solapamiento entre ellos, lo que confirma que los tres grupos difieren significativamente en elongación:

Tipo 3 (N = 3) aparece únicamente en el Subconjunto 1, con media de elongación 7.4733.

Tipo 2 (N = 6) aparece únicamente en el Subconjunto 2, con media 19.4583.

Tipo 1 (N = 9) aparece únicamente en el Subconjunto 3, con media 29.2400.

En consecuencia, se evidencia un patrón claro en la elongación según el tipo de aditivo, con el siguiente orden de medias:

Tipo 1 > Tipo 2 > Tipo 3.

Finalmente, debido a que los tamaños muestrales son distintos, el procedimiento utiliza la media armónica para las comparaciones; por ello, los

resultados deben interpretarse considerando la advertencia del output respecto a que el control del error tipo I puede verse afectado bajo tamaños de grupo desiguales.

c) Modulo Elasticidad

Tabla 45

Prueba de ANOVA para Modulo de Elasticidad

	Suma de		Media		
	cuadrados	gl	cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	385,755	2	192,877	2,729	,098
Dentro de grupos	1060,210	15	70,681		
Total	1445,965	17			

Se realizó un ANOVA de un factor para comparar el módulo de elasticidad entre los grupos evaluados (tres niveles). Los resultados indican que no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en el módulo de elasticidad entre los grupos, $F(2, 15) = 2.729$, $p = .098$. En consecuencia, no se rechaza la hipótesis nula al nivel de significancia $\alpha = .05$, por lo que no hay evidencia suficiente para afirmar que las medias difieren entre sí.

En cuanto al tamaño del efecto, se obtuvo un valor moderado, $\eta^2 = .267$ (aprox. 26.7% de la variabilidad explicada por el factor), lo cual sugiere que el tipo de aditivo podría influir en el módulo de elasticidad, aunque en esta muestra dicha diferencia no alcanzó significancia estadística. Dado que el resultado no fue significativo, no corresponde aplicar pruebas post hoc bajo $\alpha = 0.05$.

Tabla 46*Prueba HSD Tukey para Modulo de Elasticidad*

(I) TIPO DE ADITIVO	(J) TIPO DE ADITIVO	Diferencia		Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
		de medias (I-J)	Desv. Error		Límite inferior	Límite superior
1,00	2,00	-9,60000	4,43097	,110	-21,1093	1,9093
	3,00	,80667	5,60479	,989	-13,7516	15,3649
2,00	1,00	9,60000	4,43097	,110	-1,9093	21,1093
	3,00	10,40667	5,94477	,220	-5,0347	25,8480
3,00	1,00	-,80667	5,60479	,989	-15,3649	13,7516
	2,00	-10,40667	5,94477	,220	-25,8480	5,0347

Con el fin de explorar diferencias específicas entre los tipos de aditivo en el módulo de elasticidad, se revisó la prueba post hoc HSD de Tukey ($\alpha = .05$). Los resultados indican que ninguna comparación por pares fue estadísticamente significativa ($p > .05$ en todos los casos), por lo que no se identifican diferencias en el módulo de elasticidad entre los tipos de aditivo.

En particular:

Tipo 1 vs. Tipo 2: $\Delta M = -9.8000$, $p = .110$, IC95% [-21.1093, 1.9093]

Tipo 1 vs. Tipo 3: $\Delta M = 0.8067$, $p = .989$, IC95% [-13.7516, 15.3849]

Tipo 2 vs. Tipo 3: $\Delta M = 10.4067$, $p = .220$, IC95% [-5.0347, 25.8480]

Dado que los intervalos de confianza incluyen el cero en todas las comparaciones y los valores de significancia son mayores a .05, se concluye que las medias de módulo de elasticidad son estadísticamente similares entre los tres tipos de aditivo. Esto es coherente con el resultado del ANOVA, donde tampoco se observaron diferencias significativas globales.

Tabla 47*Subconjuntos homogéneos – HSD de Tukey para Modulo de Elasticidad*

TIPO DE ADITIVO	N	Subconjunto para alfa =
		0.05
		1
3,00	3	12,4067
1,00	9	13,2133
2,00	6	22,8133
Sig.		,162

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

- a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 4,909.
- b. Los tamaños de grupo no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de grupo. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

La Tabla 47 presenta los subconjuntos homogéneos obtenidos mediante la prueba HSD de Tukey ($\alpha = 0.05$) para el módulo de elasticidad. Los resultados muestran que los tres tipos de aditivo se agrupan dentro de un único subconjunto homogéneo, lo que indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre sus medias.

Las medias observadas fueron:

Tipo 3 (N = 3): 12.4087

Tipo 1 (N = 9): 13.2133

Tipo 2 (N = 6): 22.8133

Dado que todos los grupos aparecen en el mismo subconjunto y la significancia asociada al conjunto es $p = .162$ ($> .05$), se concluye que las diferencias en el módulo de elasticidad no son suficientes para considerarse significativas al nivel de confianza del 95%. Este resultado es consistente con el ANOVA y con las comparaciones por pares del Tukey, donde tampoco se detectaron diferencias significativas.

Finalmente, debido a que los tamaños muestrales son desiguales, el procedimiento utiliza la media armónica; por ello, la interpretación debe considerar la advertencia del output respecto a que el control del error tipo I puede no estar plenamente garantizado bajo tamaños de grupo diferentes.

d) Solubilidad en agua

Tabla 48

Prueba de ANOVA para Solubilidad en agua

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	,099	2	,050	8,949	,003
Dentro de grupos	,083	15	,006		
Total	,183	17			

Se realizó un ANOVA de un factor para comparar la solubilidad en agua entre los grupos evaluados. Los resultados mostraron un efecto estadísticamente significativo del grupo sobre la solubilidad en agua, $F(2, 15) = 8.949$, $p = .003$, por lo que se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias. Esto indica que al menos un grupo presenta una media de solubilidad diferente respecto a los demás.

En cuanto al tamaño del efecto, se obtuvo un valor alto, $\eta^2 = .54$ ($SS_{\text{entre}} = 0.099$; $SS_{\text{total}} = 0.183$), lo que sugiere que el factor de agrupación explica aproximadamente el 54% de la variabilidad observada en la solubilidad en agua.

Tabla 49*Prueba HSD Tukey para Solubilidad en agua*

(I) TIPO DE ADITIVO	(J) TIPO DE ADITIVO	Diferencia de medias (I-J)		Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
			Desv. Error		Límite inferior	Límite superior
1,00	2,00	-,11722*	,03928	,024	-,2192	-,0152
	3,00	,09444	,04968	,173	-,0346	,2235
2,00	1,00	,11722*	,03928	,024	,0152	,2192
	3,00	,21167*	,05270	,003	,0748	,3485
3,00	1,00	-,09444	,04968	,173	-,2235	,0346
	2,00	-,21167*	,05270	,003	-,3485	-,0748

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Con el fin de identificar entre qué tipos de aditivo se presentan las diferencias en la solubilidad en agua, se aplicó la prueba HSD de Tukey ($\alpha = 0.05$). Los resultados indican que sí existen diferencias significativas en algunas comparaciones:

Tipo 1 vs. Tipo 2: diferencia de medias = -0,11722, $p = 0,024$, IC95% [-0,2192; -0,0152].

⇒ El Tipo 1 presenta menor solubilidad que el Tipo 2.

Tipo 1 vs. Tipo 3: diferencia de medias = 0,09444, $p = 0,173$, IC95% [-0,0346; 0,2235].

⇒ No se encontraron diferencias significativas entre Tipo 1 y Tipo 3.

Tipo 2 vs. Tipo 3: diferencia de medias = 0,21167, $p = 0,003$, IC95% [0,0748; 0,3485].

⇒ El Tipo 2 presenta mayor solubilidad que el Tipo 3.

El Tipo 2 muestra la mayor solubilidad, el Tipo 3 la menor, y el Tipo 1 se ubica en un nivel intermedio (sin diferencia significativa frente al Tipo 3, pero sí menor que el Tipo 2).

Tabla 50*Subconjuntos homogéneos – HSD de Tukey para Solubilidad en agua*

TIPO DE ADITIVO	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
		1	2
3,00	3	,2900	
1,00	9	,3844	,3844
2,00	6		,5017
Sig.		,150	,064

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

- a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 4,909.
- b. Los tamaños de grupo no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de grupo. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

La Tabla 50 organiza las medias en subconjuntos homogéneos, es decir, grupos cuyas medias no difieren significativamente dentro del subconjunto ($\alpha = 0.05$). Se observan dos subconjuntos:

Subconjunto 1:

Tipo 3 (N = 3): 0,2900

Tipo 1 (N = 9): 0,3844

Subconjunto 2:

Tipo 1 (N = 9): 0,3844

Tipo 2 (N = 6): 0,5017

El hecho de que el Tipo 1 aparezca en ambos subconjuntos indica que su media es intermedia y se aproxima a ambos extremos. En términos prácticos, la tabla “dibuja” el patrón: Tipo 3 < Tipo 1 < Tipo 2. No obstante, las comparaciones por pares (Tabla 49) confirman específicamente que la diferencia es significativa entre Tipo 1–Tipo 2 ($p = 0,024$) y Tipo 2–Tipo 3 ($p = 0,003$), mientras que Tipo 1–Tipo 3 no es significativa.

e) Densidad

Tabla 51

Prueba de ANOVA para Densidad

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	,019	2	,010	6,688	,008
Dentro de grupos	,021	15	,001		
Total	,040	17			

Se realizó un ANOVA de un factor para comparar la densidad entre los tipos de aditivo. Los resultados evidenciaron un efecto estadísticamente significativo del tipo de aditivo sobre la densidad, $F(2, 15) = 6,688$, $p = ,008$, por lo que se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias. Esto indica que al menos un tipo de aditivo presenta una densidad promedio distinta respecto a los demás.

En términos de magnitud, el tamaño del efecto fue moderado-alto, con $\eta^2 \approx ,48$ ($0,019 / 0,040$), lo que sugiere que aproximadamente el 48% de la variabilidad de la densidad se explica por el tipo de aditivo.

Tabla 52

Prueba HSD Tukey para Densidad

(I) TIPO DE ADITIVO	(J) TIPO DE ADITIVO	Diferencia de medias (I- J)		Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
1,00	2,00	-,04111	,01989	,131		-,0928	,0105
	3,00	,05556	,02515	,102		-,0098	,1209
2,00	1,00	,04111	,01989	,131		-,0105	,0928
	3,00	,09667*	,02668	,007		,0274	,1660
3,00	1,00	-,05556	,02515	,102		-,1209	,0098
	2,00	-,09667*	,02668	,007		-,1660	-,0274

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Para identificar entre qué tipos de aditivo se encuentran las diferencias, se aplicó la prueba post hoc HSD de Tukey ($\alpha = 0,05$). Los resultados muestran que:

Tipo 2 vs. Tipo 3: se encontró una diferencia significativa ($\Delta M = 0,09867$, $p = ,007$, IC95% [0,0274; 0,1680]), indicando que el Tipo 2 presenta mayor densidad que el Tipo 3.

Tipo 1 vs. Tipo 2: no se observaron diferencias significativas ($\Delta M = -0,04111$, $p = ,131$, IC95% [-0,0928; 0,0105]).

Tipo 1 vs. Tipo 3: tampoco se observaron diferencias significativas ($\Delta M = 0,05556$, $p = ,102$, IC95% [-0,0098; 0,1209]).

Las diferencias en densidad se concentran específicamente entre Tipo 2 y Tipo 3 (Tipo 2 > Tipo 3). El Tipo 1 se comporta como un grupo intermedio, sin diferir estadísticamente de los otros dos al 5%.

Tabla 53

Subconjuntos homogéneos – HSD de Tukey para Densidad

TIPO DE ADITIVO	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
		1	2
3,00	3	1,2100	
1,00	9	1,2656	1,2656
2,00	6		1,3067
Sig.		,086	,235

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

- Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 4,909.
- Los tamaños de grupo no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de grupo. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

La Tabla 53 muestra los subconjuntos homogéneos de la prueba HSD de Tukey ($\alpha = 0.05$) para la variable densidad, agrupando aquellos tipos de aditivo cuyas medias no difieren significativamente entre sí.

Se identifican dos subconjuntos:

Subconjunto 1:

Tipo 3 (N = 3): 1.2100

Tipo 1 (N = 9): 1.2856

Subconjunto 2:

Tipo 1 (N = 9): 1.2856

Tipo 2 (N = 6): 1.3087

El hecho de que el Tipo 1 aparezca en ambos subconjuntos indica que presenta una media intermedia, estadísticamente similar tanto al Tipo 3 como al Tipo 2. En cambio, Tipo 2 y Tipo 3 no comparten subconjunto, lo cual respalda que difieren significativamente entre sí, siendo la densidad del Tipo 2 mayor que la del Tipo 3.

f) Biodegradable

Tabla 54

Prueba de ANOVA para la Propiedad Biodegradable

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	,009	2	,004	26,990	,000
Dentro de grupos	,002	15	,000		
Total	,011	17			

Se realizó un ANOVA de un factor para comparar la propiedad biodegradable entre los tipos de aditivo. Los resultados mostraron diferencias estadísticamente significativas entre los grupos, $F(2, 15) = 26,990$, $p < ,001$ (en la salida aparece ,000). Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias, indicando que al menos un tipo de aditivo presenta un valor promedio diferente en la propiedad biodegradable.

Adicionalmente, el tamaño del efecto fue muy alto ($\eta \approx 0,82$; $SS_{\text{entre}} = ,009$ / $SS_{\text{total}} = ,011$), lo que sugiere que aproximadamente el 82% de la variabilidad en la propiedad biodegradable se explica por el tipo de aditivo.

Tabla 55

Prueba HSD Tukey para la propiedad Biodegradable

(I) TIPO DE ADITIVO	(J) TIPO DE ADITIVO	Diferencia de medias (I-J)		Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
1,00	2,00	,03467*	,00669	,000		,0173	,0520
	3,00	,05567*	,00846	,000		,0337	,0776
2,00	1,00	-,03467*	,00669	,000		-,0520	-,0173
	3,00	,02100	,00897	,081		-,0023	,0443
3,00	1,00	-,05567*	,00846	,000		-,0776	-,0337
	2,00	-,02100	,00897	,081		-,0443	,0023

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Para identificar entre qué tipos de aditivo se encuentran las diferencias, se aplicó la prueba post hoc HSD de Tukey ($\alpha = 0,05$). Los resultados indican que:

Tipo 1 vs. Tipo 2: diferencia de medias = 0,03467, $p < ,001$, IC95% [0,0173; 0,0520].

⇒ El Tipo 1 presenta una media significativamente mayor que el Tipo 2.

Tipo 1 vs. Tipo 3: diferencia de medias = 0,05567, $p < ,001$, IC95% [0,0337; 0,0776].

⇒ El Tipo 1 presenta una media significativamente mayor que el Tipo 3.

Tipo 2 vs. Tipo 3: diferencia de medias = 0,02100, $p = ,081$, IC95% [-0,0023; 0,0443].

⇒ No se encontraron diferencias significativas entre Tipo 2 y Tipo 3 (el intervalo incluye el cero).

La prueba de Tukey confirma que el Tipo 1 difiere significativamente de los otros dos (mayor valor promedio), mientras que Tipo 2 y Tipo 3 son estadísticamente similares para la propiedad biodegradable al nivel de 0,05.

Tabla 56

Subconjuntos homogéneos – HSD de Tukey para la propiedad Biodegradable

TIPO DE ADITIVO	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
		1	2
3,00	3	,1197	
2,00	6	,1407	
1,00	9		,1753
Sig.		,050	1,000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

- Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 4,909.
- Los tamaños de grupo no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de grupo. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

La Tabla 56 presenta los subconjuntos homogéneos obtenidos mediante la prueba HSD de Tukey ($\alpha = 0,05$) para la propiedad biodegradable, agrupando los tipos de aditivo cuyas medias no difieren significativamente entre sí.

Se identifican dos subconjuntos:

Subconjunto 1:

Tipo 3 (N = 3): 0,1197

Tipo 2 (N = 6): 0,1407

Subconjunto 2:

Tipo 1 (N = 9): 0,1753

El hecho de que Tipos 2 y 3 estén en el mismo subconjunto indica que no presentan diferencias significativas entre sí. En cambio, el Tipo 1 aparece en un subconjunto separado, lo que evidencia que su media es significativamente distinta (y mayor) en comparación con los otros dos tipos de aditivo.

La propiedad biodegradable sigue el patrón Tipo 1 > Tipo 2 $\approx$ Tipo 3, confirmando que el Tipo 1 presenta el valor promedio más alto, mientras que Tipo 2 y Tipo 3 muestran valores estadísticamente similares.

Interpretación General del Objetivo Especifico 3

A diferencia de la temperatura, el tipo de aditivo sí mostró un impacto claro en el desempeño del bioplástico (según la codificación del estudio: Tipo 1 = Glicerina, Tipo 2 = glicerina + sorbitol, Tipo 3 = ácido cítrico). En general, el ANOVA evidenció que el aditivo generó diferencias significativas en resistencia a la tracción, elongación, solubilidad, densidad y biodegradabilidad, mientras que en módulo de elasticidad no se alcanzó significancia al 5%.

Resistencia a la tracción. El ANOVA fue significativo ($p < 0,001$) y el patrón fue consistente: Tipo 1 > Tipo 2 > Tipo 3; además, el tamaño del efecto fue alto ($\eta^2 \approx 0,79$), indicando que el aditivo explica gran parte de la variabilidad observada. Tukey confirmó diferencias entre todos los pares.

Elongación. También se observaron diferencias significativas ($p < 0,001$), con un patrón análogo: Tipo 1 > Tipo 2 > Tipo 3, y tamaño del efecto alto ($\eta^2 \approx 0,81$). Esto indica que el aditivo no solo cambia “cuánto aguanta” el material, sino también “cuánto se deja estirar” antes de fallar (lo cual es clave para decidir usos tipo empaque flexible vs. lámina rígida).

Módulo de elasticidad. Aunque se observaron diferencias numéricas, el ANOVA no fue significativo ($p = 0,098$). Se reportó un tamaño de efecto moderado ($\eta^2 \approx 0,267$), sugiriendo que podría existir una tendencia, pero sin evidencia estadística suficiente con esta muestra.

Solubilidad en agua. El aditivo sí influyó significativamente ($p = 0,003$). Tukey mostró que Tipo 2 presentó la mayor solubilidad y Tipo 3 la menor; el Tipo

1 se comportó como intermedio (difiere de Tipo 2, pero no necesariamente de Tipo 3). En la práctica, esto sirve para “tunear” el material: si se quiere más resistencia al agua, conviene el comportamiento asociado al menor nivel de solubilidad.

Densidad. Se encontraron diferencias significativas ($p = 0,008$), concentradas principalmente entre Tipo 2 y Tipo 3 (Tipo 2 con mayor densidad). El Tipo 1 fue intermedio y no difirió significativamente de ambos. Esto puede interpretarse como cambios en el empaquetamiento/compactación de la matriz dependiendo del aditivo.

Biodegradabilidad. El ANOVA fue significativo ($p < 0,001$). Los subconjuntos homogéneos mostraron el patrón Tipo 1 > Tipo 2 $\approx$ Tipo 3, es decir, el Tipo 1 presentó el promedio más alto de biodegradabilidad, mientras que Tipos 2 y 3 no se diferenciaron estadísticamente entre sí.

En síntesis, resume que la temperatura (60–100 °C) no distinguió el desempeño, pero el tipo de aditivo sí determinó cambios estadísticamente significativos en casi todas las propiedades clave. Así, el capítulo de resultados respalda que, para optimizar el bioplástico, el “botón grande” de ajuste no fue la temperatura dentro del rango estudiado, sino la selección del aditivo, ya que esta decisión impacta directamente resistencia, flexibilidad, interacción con el agua, densidad y biodegradabilidad.

3.4. Objetivo General: Evaluar la influencia de la proporción de almidón de maíz y residuo de yuca, la temperatura y el tipo de aditivo en la obtención de bioplástico

Tabla 57

Síntesis del objetivo general: influencia de proporción, temperatura y aditivo sobre propiedades del bioplástico.

Factor	Propiedad evaluada	Prueba / p-valor	Resultado	Interpretación
Proporción (almidón/residuo)	Desempeño integral	Comparación entre formulaciones (criterio de optimización)	Se seleccionó M3 como óptima	Balance matriz (almidón) + refuerzo (residuo) con mayor homogeneidad.
Temperatura (60-100 °C)	Resistencia a tracción	ANOVA, p=0,969	No significativo	Efecto térmico no detectable en este rango.
Temperatura (60-100 °C)	Elongación	ANOVA, p=0,834	No significativo	Comportamiento mecánico similar entre temperaturas.
Temperatura (60-100 °C)	Módulo elasticidad	ANOVA, p=0,806	No significativo	Cambios elásticos no atribuibles a temperatura.
Temperatura (60-100 °C)	Solubilidad en agua	ANOVA, p=0,950	No significativo	Solubilidad estable en el rango térmico.
Temperatura (60-100 °C)	Densidad	ANOVA, p=0,949	No significativo	Densidad estable en el rango térmico.

Tipo de aditivo	Resistencia a tracción	ANOVA, $p < 0,001$	Significativo	Tipo 1 > tipo 2 > tipo 3 (medias).
Tipo de aditivo	Elongación	ANOVA, $p < 0,001$	Significativo	Tipo 1 > tipo 2 > tipo 3 (medias).
Tipo de aditivo	Solubilidad en agua	ANOVA, $p = 0,003$	Significativo	Tipo 2 mayor solubilidad; tipo 3 menor.
Tipo de aditivo	Densidad	ANOVA, $p = 0,008$	Significativo	Tipo 2 mayor densidad; tipo 3 menor.
Tipo de aditivo	Biodegradabilidad	ANOVA, $p < 0,001$	Significativo	Tipo 1 mayor biodegradabilidad promedio.
Tipo de aditivo	Módulo de elasticidad	ANOVA, $p = 0,098$	No significativo	Variación numérica sin evidencia estadística.

Los resultados muestran que la temperatura (60, 80 y 100 °C) no fue un factor diferenciador, mientras que el tipo de aditivo sí determinó cambios estadísticamente significativos en resistencia, elongación, solubilidad, densidad y biodegradabilidad. Además, el análisis comparativo de formulaciones permitió identificar M3 como la formulación óptima.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La comparación de las formulaciones evaluadas permitió identificar a la muestra M3 (3,5 g de almidón de maíz y 1,5 g de residuo de yuca, con glicerina y procesada a 80 °C) como la más favorable en términos de desempeño mecánico, flexibilidad y estabilidad frente a la humedad. Este resultado es coherente con lo reportado por Lestari et al. (2019), quienes señalan que formulaciones con predominio de almidón en la matriz generan biopelículas más homogéneas y con menor incidencia de fallas mecánicas. En comparación con estudios donde se incrementa la fracción fibrosa o residual, como los de Bernedo y Palomino (2020), el presente trabajo muestra un

comportamiento más estable, lo que confirma que un exceso de residuo puede actuar como punto de discontinuidad estructural si no se optimiza su dispersión.

Desde la literatura, Hendrawan et al. (2020) demostraron que la optimización de proporciones mediante diseño de superficie de respuesta permite maximizar resistencia y elongación cuando la matriz polimérica es continua y compacta. En ese sentido, la formulación M3 se ubica dentro del patrón esperado, aunque con valores absolutos inferiores a los alcanzados en sistemas reforzados con quitosano u otros biopolímeros estructurantes, lo cual se explica por la simplicidad composicional del sistema evaluado en este estudio.

Respecto al efecto de la temperatura, los resultados mostraron que no existieron diferencias estadísticamente significativas en ninguna de las propiedades evaluadas dentro del rango de 60 a 100 °C. Este comportamiento difiere parcialmente de lo reportado por Vélez et al. (2021), quienes observaron cambios relevantes en propiedades mecánicas al variar la temperatura en bioplásticos de almidón de yuca y papa. Sin embargo, dicha discrepancia puede explicarse porque, en el presente estudio, todas las temperaturas evaluadas se ubicaron dentro de un intervalo donde la gelatinización del almidón ya se encuentra funcionalmente establecida. En consecuencia, los resultados aquí obtenidos son consistentes con la idea de un efecto de meseta térmica, donde incrementos adicionales de temperatura no generan modificaciones sustanciales en la red polimérica formada.

En términos prácticos, este hallazgo es relevante, ya que indica que, para esta formulación específica, la temperatura puede seleccionarse en función de criterios de eficiencia energética sin afectar significativamente la calidad del bioplástico, lo cual coincide con observaciones metodológicas planteadas en estudios de biopolímeros con matrices ricas en almidón (Vélez et al., 2021).

En contraste con la temperatura, el tipo de aditivo mostró un impacto estadísticamente significativo sobre la mayoría de las propiedades evaluadas. En resistencia a la tracción, el ANOVA evidenció diferencias claras entre tratamientos ($F=28,679$; $p<0,001$), con un tamaño de efecto elevado ($\eta^2\approx 0,79$). El orden observado fue Tipo 1 (Glicerina) > Tipo 2 (glicerina + Sorbitol) > Tipo 3 (ácido cítrico). Este patrón es parcialmente consistente con lo reportado por Lestari et al. (2019), quienes demostraron que la resistencia puede incrementarse o disminuir dependiendo de la

naturaleza y proporción del plastificante. No obstante, los valores obtenidos en el presente estudio fueron menores a los reportados por Hendrawan et al. (2020), quienes incorporaron quitosano como refuerzo estructural, evidenciando que la ausencia de agentes reforzantes limita el incremento de resistencia.

En relación con la elongación, también se encontraron diferencias significativas ($F=31,652$; $p<0,001$), manteniéndose el mismo orden jerárquico entre aditivos. Este resultado es similar a lo reportado por Machaca (2022), quien obtuvo elongaciones cercanas al 13 % en bioplásticos plastificados con glicerina y ácidos orgánicos. Sin embargo, en el presente estudio, el ácido cítrico presentó los valores más bajos de elongación, lo que sugiere un comportamiento más frágil de la matriz, posiblemente asociado a interacciones químicas que restringen la movilidad de las cadenas poliméricas. Esta diferencia con Machaca (2022) es explicable por el uso de diferentes fuentes de almidón, tipos de ácido y condiciones de procesamiento.

El módulo de elasticidad no presentó diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p\approx 0,098$), lo que indica que la rigidez inicial del material no fue fuertemente afectada por el tipo de aditivo. Este comportamiento es consistente con lo observado por Chuquista y Uriarte (2020), quienes reportaron valores similares de rigidez en bioplásticos de almidón con diferentes aditivos, señalando que estos influyen más en la resistencia última y la deformación que en la pendiente elástica inicial.

En cuanto a la solubilidad en agua, se evidenció un efecto significativo del aditivo ($F=8,949$; $p=0,003$), siendo la glicerina el tratamiento con mayor solubilidad y el ácido cítrico el de menor. Estos resultados son coherentes con lo reportado por Bernedo y Palomino (2020), quienes observaron una alta sensibilidad al agua en biopelículas plastificadas. En comparación con dichos estudios, los valores de solubilidad obtenidos en esta investigación fueron moderados, lo que sugiere que la combinación de almidón de maíz con residuo de yuca contribuye a limitar parcialmente la afinidad con el agua.

Respecto a la densidad, se encontraron diferencias significativas ($F=6,688$; $p=0,008$), destacando el Tipo 2 como el de mayor densidad. Montoya et al. (2022) reportaron valores considerablemente más altos en bandejas biodegradables, lo que indica que la densidad depende no solo del aditivo, sino también de la geometría del producto,

el espesor y el método de fabricación. En ese sentido, los valores obtenidos en el presente estudio se ubican por debajo de los reportados en productos rígidos, pero son consistentes con biopelículas delgadas.

Finalmente, la biodegradabilidad mostró diferencias significativas ($F=26,990$; $p<0,001$), siendo el Tipo 1 el de mayor promedio de degradación. Este resultado es similar a lo reportado por Chuquista y Uriarte (2020), quienes observaron degradaciones aceleradas en bioplásticos con menor cantidad de aditivos. En comparación, Hendrawan et al. (2020) alcanzaron mayores porcentajes de degradación en menor tiempo, mientras que Kunarbekova et al. (2023) reportaron degradaciones más lentas en sistemas con ácido cítrico y nanopartículas. Estas diferencias confirman que la biodegradabilidad está fuertemente condicionada por la composición química y el tipo de aditivo empleado.

En conjunto, los resultados indican que, dentro del rango evaluado, la temperatura no constituye un factor determinante del desempeño del bioplástico, mientras que el tipo de aditivo actúa como el principal factor de control de las propiedades mecánicas, fisicoquímicas y biodegradables. Este comportamiento coincide con la evidencia previa y respalda la validez experimental del enfoque adoptado.

5. PROPUESTA DE INTERVENCIÓN

Nombre de la propuesta: “BioYuca-Maíz: valorización de residuos de yuca para bioplásticos de uso local”.

Propósito: implementar un piloto de producción y validación de bioplástico a partir de almidón de maíz y residuo de yuca, optimizando formulación y aditivo, y transfiriendo el protocolo a un entorno educativo o comunitario (laboratorio escolar/universitario o microemprendimiento).

Justificación

El residuo de yuca es un subproducto con potencial de valorización, mientras que el almidón de maíz ofrece una matriz filmógena disponible y económica. Los resultados del estudio muestran que la selección de proporción (M3) y del tipo de aditivo tiene impacto directo sobre propiedades mecánicas y biodegradables, lo que habilita una intervención enfocada en economía circular y reducción de residuos plásticos.

Población objetivo y alcance

- Público objetivo: estudiantes y docentes (si es piloto educativo) y/o asociaciones de productores, pequeñas panaderías/mercados o emprendimientos que generan y/o aprovechan residuo orgánico.
- Alcance: producción piloto de biopelículas y prototipos (envoltorios, bolsas pequeñas, láminas) y validación básica de calidad.

Estrategia de implementación

Fase 1: Diagnóstico y acondicionamiento (2 semanas)

- Identificación de fuentes de residuo de yuca, cantidad disponible y logística de recolección.
- Acondicionamiento del residuo: lavado, secado controlado, molienda y tamizado.

Fase 2: Producción piloto (4 semanas)

- Preparación de lotes siguiendo formulación base similar a M3.

- Evaluación comparativa rápida de aditivos (niveles 1, 2 y 3) según el objetivo del producto.
- Moldeo y secado estandarizado.

Fase 3: Control de calidad y validación (4 semanas)

- Ensayos: resistencia a la tracción, elongación, solubilidad, densidad y prueba de biodegradación en suelo/compost.
- Registro de resultados, trazabilidad por lote y análisis estadístico básico.

Fase 4: Transferencia y difusión (2 semanas)

- Elaboración de manual operativo (SOP), ficha técnica del producto y guía de seguridad.
- Taller de capacitación y demostración de prototipos.

Indicadores de éxito

- Reducción/valorización de residuo: kg de residuo de yuca utilizado por mes.
- Productividad: número de láminas/prototipos producidos por semana.
- Calidad mínima: rangos aceptables de resistencia y elongación definidos por el uso final.
- Biodegradación: evidencia de degradación en suelo/compost en periodos definidos (por ejemplo, 14-30 días como evaluación preliminar).
- Sostenibilidad: estimación de sustitución de plásticos convencionales (unidades reemplazadas).

Riesgos y mitigación

- Variabilidad del residuo (humedad, granulometría): mitigar con secado y tamizado estandarizados.
- Reproducibilidad del proceso: mitigar con SOP, control de tiempo/temperatura y registro por lote.
- Sensibilidad al agua: mitigar con selección de aditivo según uso final y recubrimientos naturales (cera vegetal) si se requiere

6. CONCLUSIONES

- En la obtención de bioplástico a partir de almidón de maíz y residuo de yuca, se determinó que el tipo de aditivo constituye el factor con mayor influencia sobre las propiedades físicas, mecánicas y biodegradables del material, mientras que la temperatura de procesamiento (60, 80 y 100 °C) no evidenció un efecto estadísticamente significativo dentro del rango evaluado, confirmando que la optimización del bioplástico depende principalmente de la formulación y del aditivo empleado.
- La formulación M3 (3,5 g de almidón de maíz y 1,5 g de residuo de yuca, con 1 mL de glicerina y procesada a 80 °C) fue identificada como la más óptima, al presentar el mejor equilibrio entre resistencia a la tracción, elongación y estabilidad frente a la humedad, lo que la posiciona como la alternativa con mayor desempeño integral entre las formulaciones evaluadas.
- La temperatura de gelatinización, dentro del intervalo de 60 a 100 °C, no generó diferencias estadísticamente significativas en la resistencia a la tracción, elongación, módulo de elasticidad, solubilidad en agua ni densidad del bioplástico, lo que indica que, una vez alcanzada la gelatinización funcional del almidón, la variación térmica no modifica sustancialmente la estructura final del material.
- El tipo de aditivo influyó de manera significativa en la resistencia a la tracción, elongación, solubilidad, densidad y biodegradabilidad del bioplástico, registrándose tamaños de efecto elevados en varias de estas propiedades; sin embargo, el módulo de elasticidad no presentó diferencias significativas al nivel del 5%, lo que sugiere que el aditivo afecta principalmente la resistencia y la deformación del material, mas no su rigidez elástica inicial.

7. RECOMENDACIONES

- Optimización operativa: se debe priorizar una temperatura cercana a 80 °C por eficiencia energética, dado que no hubo diferencias estadísticas en el rango estudiado y seleccionar el aditivo según el objetivo del producto:
- Si se prioriza desempeño: mecánico y mayor biodegradabilidad promedio, favorecer el comportamiento del Tipo 1 (según codificación del estudio). Si se requiere menor interacción con agua, considerar el comportamiento de menor solubilidad observado en Tipo 3
- Soporte mecánico: se debe incorporar caracterización microestructural (SEM/FTIR) y ensayos de absorción de agua, para explicar por qué ciertos aditivos incrementan/disminuyen resistencia, solubilidad y biodegradación
- Validación aplicada: desarrollar prototipos (láminas, envoltorios, sobres) y probar desempeño en condiciones reales de humedad y manipulación, como ya se plantea en la línea de recomendaciones del documento

8. REFERENCIAS

- Avellán, A., Díaz, D., Mendoza, A., Zambrano, M., Zamora, Y., & Riera, M. (2020). Obtención de bioplástico a partir de almidón de maíz (*Zea mays* L.). *Revista Colón Ciencias, Tecnología y Negocios*, 7(1), 1-11. doi: <https://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/215/215974004/215974004.pdf>
- Bernedo, K., & Palomino, N. (2020). *Aprovechamiento de Macrocystis pyrifera para la elaboración de bioplástico, Lima, 2020*. [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Digital Institucional. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/59755>
- Briones, S., & Riera, M. (2020). Residuos de la cáscara de yuca y cera de abejas como potenciales materiales de partida para la producción de bioplásticos. *Avances en Química*, 15(1), 3-11. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7452718>
- Chauhan, K., Kaur, R., & Chauhan, I. (2023). Sustainable bioplastic: a comprehensive review on sources, methods, advantages, and applications of bioplastics. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 63(8), 913-938. doi: <https://doi.org/10.1080/25740881.2024.2307369>
- Chuquista, J., & Uriarte, E. (2020). *Elaboración de bioplástico usando la cáscara de Musa × paradisiaca (plátano) recolectada del mercado Modelo, Chiclayo*. [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Digital Institucional. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/50267>
- Contreras, D. (18 de agosto de 2023). *El plástico invade al mar peruano, amenazando un ecosistema entero*. Obtenido de https://inte.pucp.edu.pe/noticias-y-eventos/noticias/el-plastico-invade-al-mar-peruano-amenazando-un-ecosistema-entero/?utm_source=chatgpt.com
- Cuyubamba, L., & Quispe, M. (2024). *Efecto de los plastificantes sobre la biodegradabilidad y propiedades mecánicas del bioplástico a partir de almidón de cáscara de Musa Sp.* [Tesis de grado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Digital Institucional. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/11743>

- De Gracia, R., González, E., Vega, K., Montenegro, V., & Marín, N. (2024). Elaboración de bioplástico a partir de almidón de granos. *Revista de Iniciación Científica*, 10(1), 16-20. doi: <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v10.1.3998>
- Duarte, L. (2022). *Bioplásticos: contexto actual, aplicaciones y sostenibilidad*. [Tesis de grado, Universidad de Córdoba]. Repositorio Institucional UNICORDOBA. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/entities/publication/ddf402bf-2050-4e03-863f-30feb27ae28c>
- ECODES. (2019). *Contaminación por plásticos. Uno de los mayores desafíos ambientales del siglo XXI*. Obtenido de https://ecodes.org/hacemos/cultura-para-la-sostenibilidad/salud-y-medioambiente/observatorio-de-salud-y-medioambiente/contaminacion-por-plasticos-uno-de-los-mayores-desafios-ambientales-del-siglo-xxi?utm_.com
- Gonzalez, P. (2022). *Uso de bioplásticos para el envasado y la conservación de alimentos*. [Tesis de pregrado, Universidad Rey Juan Carlos]. Repositorio Institucional URJC. <https://burjcdigital.urjc.es/items/e966c400-6eaa-4fcc-b516-cb1c523a1de3>
- Hendrawan, Y., Putranto, A., Fauziah, T., & Argo, B. (2020). Modeling and Optimization of Tensile Strength of Arrowroot Bioplastic Using Response Surface Method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (515), 1-7. doi:10.1088/1755-1315/515/1/012079
- Huilcarema, K., Amaguay, R., & Sevilla, J. (2024). Bioplásticos a Partir de Residuos Agrícolas: Una Revisión Sistemática, Tendencias Y Oportunidades Actuales. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(5), 8997-9012. doi: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.14294
- Jacome, C., García, S., Chela, J., & Altuna, J. (2024). Avances recientes para la obtención sostenible de biopolímeros a partir de almidones: una revisión. *Studies in engineering and exact sciences*, 5(2), 1-28. doi: <https://doi.org/10.54021/seesv5n2-330>
- Jasso, S., Aguilera, Á., & Amaya, N. (2024). Bioplásticos: Una Mirada Integral a su Viabilidad y Aceptación en el Mercado de Consumo. *Emergentes - Revista Científica*, 4(2), 230-246. doi:<https://doi.org/10.60112/erc.v4i2.142>

- Kunarbekova, M., Shynzhyrbai, K., Mataev, M., Bexeitova, K., Kudaibergenov, K., Sailaukhanuly, Y., . . . Ybyraiymkul, D. (2023). Biopolymers synthesis and application. *Materials Today: Proceedings*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.367>
- Lestari, R., Kasmiyatun, M., Dermawan, K., Aini, A., Riyati, N., & Putri, F. (2019). Bioplastic from Jackfruit Seeds and Rice. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (835), 1-10. doi:10.1088/1757-899X/835/1/012035
- Machaca, C. (2022). *Obtención de bioplástico a partir de almidón de la semilla de palta (Persea americana) variedad Hass y determinación de la biodegradabilidad*. [Tesis de grado, Universidad Nacional de Moquegua]. Repositorio Institucional UNAM. <https://repositorio.unam.edu.pe/bitstreams/a5926174-6dfd-4141-b155-dd674531feb6/download>
- Ministerio del Ambiente - MINAM. (2021). *Cifras del mundo y el Perú*. Obtenido de https://www.minam.gob.pe/menos-plastico-mas-vida/cifras-del-mundo-y-el-peru/?utm_.com
- Montenegro, J., & Gomajoa, H. (2024). Importancia del uso de residuos orgánicos para obtener bioplásticos. Estudio experimental en Ingeniería de Procesos. *Boletín Informativo CEI*, 11(3), 223-226. Obtenido de <https://revistas.umariana.edu.co/index.php/BoletinInformativoCEI/article/view/4381>
- Montoya, M., Espinal, M., Bello, I., López, C., Mendoza, E., Bravo, C., & López, P. (2022). Elaboración de bioplásticos a base de cáscara de plátano (musa paradisiaca) y almidón de maíz (zea mays). *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(4), 2385-2401. doi: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i4.2763
- Noriega, Y. (2023). *Obtención de bioplásticos a partir de desechos agrícolas: una revisión de su adopción en la economía circular en Colombia*. [Tesis de pregrado, Unidades Tecnológicas de Santander]. Repositorios Institucional UTS. <http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/14313>

- Organización de las Naciones Unidas - ONU. (25 de abril de 2023). *Todo lo que necesitas saber sobre la contaminación por plásticos*. Obtenido de https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/todo-lo-que-necesitas-saber-sobre-la-contaminacion-por-plasticos?utm_.com
- Pérez, H. (2022). *Comparación de los bioplásticos obtenidos a partir de banana baby (Musa sp.) y banana roja (Musa acuminata "Red Dacca") en el uso para embalaje de alimentos*. [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio Institucional. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/21824>
- Quintanilla, M., Rosado, G., & Arias, M. (2024). Producción de bioplásticos sostenibles a partir de harina de cáscara y pulpa de yuca (Manihot esculenta). *Reincisol*, 3(6), 819-836. doi: [https://doi.org/10.59282/reincisol.V3\(6\)819-836](https://doi.org/10.59282/reincisol.V3(6)819-836)
- Quintanilla, M., Rosado, G., & Arias, M. (2024). Producción de bioplásticos sostenibles a partir de harina de cáscara y pulpa de yuca (Manihot esculenta). *Ciencia y Desarrollo Social*, 3(4), 819–836. doi: [https://doi.org/10.59282/reincisol.V3\(6\)819-836](https://doi.org/10.59282/reincisol.V3(6)819-836)
- Quispe, R. (2022). *Reaprovechamiento de las cáscaras de plátano musa paradisiaca para la elaboración de bioplástico en El Collao - Ilave, 2021*. [Tesis de pregrado, Universidad Privada San Carlos]. Repositorio Institucional UPSC. <http://repositorio.upsc.edu.pe/handle/UPSC/478>
- Rivera, Y., & Vilchez, V. (2020). *Revisión sistemática: análisis de las propiedades de los bioplásticos a base de almidón*. [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Digital Institucional. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/62559>
- Sierra, L. (2022). *Bioplásticos activos biodegradables en suelo para aplicaciones agronómicas*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de la Plata]. Repositorio Institucional de la UNLP. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/145797>
- Torres, E. (2021). *Elaboración de bioplásticos a partir del almidón de la cáscara de la papa (Solanum tuberosum) y la cáscara de la papaya hawaina (Carica papaya L.) como alternativa para uso de envolturas biodegradables de alimentos*. [Tesis

de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio Institucional. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/14978>

Vargas, Y., Pazmiño, J., & Dávila, J. (2021). Potencial de Biomasa en América del Sur para la Producción de Bioplásticos. Una Revisión. *Revista Politécnica*, 48(2), 7-20. doi: <https://doi.org/10.33333/rp.vol48n2.01>

Vargas, Y., Pazmiño, J., & Dávila, J. (2021). Potencial de Biomasa en América del Sur para la Producción de Bioplásticos. Una Revisión. *Revista Politécnica*, 48(2), 7-20. Obtenido de <https://doi.org/10.33333/rp.vol48n2.01>

Vásquez, K. (2020). *Revisión sistemática de los métodos de modificación estructural del almidón para la producción del bioplástico*. [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Digital Institucional. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/58692>

Vélez, C., Zambrano, X., Delgado, M., Burgos, G., & Cedeño, C. (2021). Almidones de Cáscara de Yuca (*Manihot Esculenta*) y Papa (*Solanum Tuberosum*) para Producción de Bioplásticos: Propiedades Mecánicas y Efecto Gelatinizante. *Revista Bases de la Ciencia*, 6(2), 137-152. doi: https://doi.org/10.33936/rev_bas_de_la_ciencia.v6i2.3293

9. ANEXOS

Anexo 1: Matriz de operacionalización de variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensión	Indicadores	Índice
Independiente: Composición del bioplástico	La proporción de almidón de maíz y yuca se refiere a la relación cuantitativa en la mezcla de estos dos polisacáridos naturales que sirven como materia prima para la elaboración del bioplástico, donde el almidón actúa como base estructural que determina propiedades físicas y mecánicas del material final	Se mide controlando y variando la cantidad en peso de almidón de maíz y almidón de yuca en la formulación, manteniendo constante la masa total de almidón usada para la producción del bioplástico	Proporción almidón de maíz (AM)	% de almidón de maíz % de almidón de yuca	70% AM / 30% RY 50% AM / 50% RY 30% AM / 70% RY
			Residuo de yuca (RY)		
			Tipo de aditivo	Presencia y tipo de aditivo	Sin aditivo Con glicerina Con Ácido cítrico
			Temperatura de gelatinización	Grados Celsius (°C)	60°C 80°C 100°C
Dependiente: Propiedades del bioplástico	Comprende el conjunto de propiedades físicas, mecánicas, térmicas, de biodegradabilidad y de barrera que determinan su desempeño funcional y aplicación práctica,	La calidad se evalúa mediante pruebas estandarizadas que miden resistencia mecánica (tracción, elongación), propiedades ópticas	Propiedades mecánicas	Resistencia a la tracción (MPa) Elongación (%) Módulo de elasticidad (MPa)	1 - 100 MPa 1 - 20% 1 - 200 MPa

incluyendo resistencia a (opacidad, color), la tracción, opacidad, térmicas (DSC, TGA), solubilidad, espesor y biodegradabilidad capacidad antioxidante. (porcentaje de degradación en condiciones controladas) y otras características relevantes para el uso final del bioplástico	Propiedades Fisicoquímicas	Solubilidad en agua (%)	0-100%
		Densidad (g/cm ³)	0.5 – 2.0 g/cm ³
		Porcentaje de degradación en compost	% degradación en compost
	Biodegradabilidad	Tiempo de descomposición	Días (1-30 días)

Anexo 2

Maíz, antes de la obtención del almidón



Anexo 3

Yuca, antes de la obtención del almidón



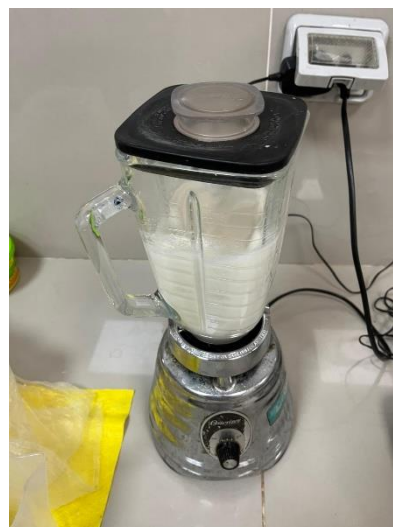
Anexo 4

Filtrado de la molienda, para eliminar el bagazo en tela tocuyo



Anexo 5

Molienda del maíz y yuca



Anexo 6

Sedimentación del almidón de maíz



Anexo 7

Sedimentación del almidón de yuca



Anexo 8

Almidón de maíz, deshidratado



Anexo 9

Almidón de yuca, deshidratado



Anexo 10

Muestras de bioplásticos

