

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

**Obtención de bioplástico a partir de almidón de semilla
de *Persea americana* y residuos de *Coffea Arabica L.***

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Agroindustrial

Autores:

Bach. Olivo Zavaleta, Darling Juleisy
Código ORCID: 0009-0006-7877-0883
Bach. Castillo Flores, Rossy Olinda
Código ORCID: 0009-0001-8436-2230

Asesora:

Dra. Aguirre Vargas, Elza Berta
DNI N° 19096335
Código ORCID: 0000-0003-1659-9874

Coasesora:

Mg. Arévalo Oliva, María de Fátima
DNI N° 70917248
Código ORCID: 0000-0003-3432-9843

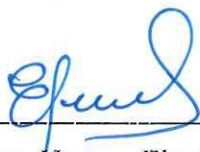
Nuevo Chimbote - PERÚ
2026

CONSTANCIA DE ASESORAMIENTO

Yo, Aguirre Vargas, Elza Berta, mediante la presente doy conformidad de mi asesoramiento de la tesis titulada: "Obtención de bioplastico a partir de almidón de semilla de *Persea Americana* y residuos de *Coffea Arabica L.*" que tiene como autores a las bachilleres: Castillo Flores Rossy Olinda y Olivo Zavaleta Darling Juleisy, que ha sido elaborado de acuerdo con el reglamento general, para obtener el Título Profesional en la Universidad Nacional del Santa de acuerdo a la denominación siguiente:

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Agroindustrial

Nuevo Chimbote, septiembre de 2026

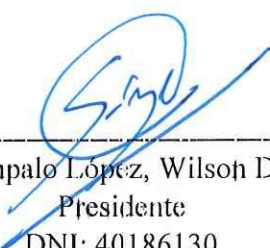


Dra. Aguirre Vargas, Elza Berta
Código ORCID: 0000-0003-1659-9874
DNI. N° 19096335

AVAL DE CONFORMIDAD DEL JURADO

Tesis titulada: "Obtención de bioplastico a partir de almidón de semilla de *Persea Americana* y residuos de *Coffea Arabica L.*" que tiene como autores a las bachilleres: Olivo Zavaleta Darling Juleisy Y Castillo Flores Rossy Olinda.

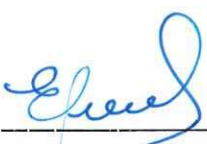
Revisado y Aprobado por el Jurado Evaluador:



Dr. Símpalo López, Wilson Daniel
Presidente
DNI: 40186130
Código ORCID: 0000-0002-8397-7145



Ms. Vásquez Guzmán, Juan Carlos
Secretario
DNI. N° 40787083
Código ORCID: 0000-0002-7112-4006



Dra. Aguirre Vargas, Elza Berta
Integrante
DNI. N° 19096335
Código ORCID: 0000-0003-1659-9874



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL
INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las once horas del día ocho de septiembre del año dos mil veintiseis, se instalaron en el aula multimedia de la EPIA – 1er piso; el Jurado Evaluador, designado mediante T/Resolución N° 496-2026-UNS-CFI integrado por los docentes:

- Dr. Wilson Simpalo López (Presidente)
- Ms. Juan Carlos Vásquez Guzmán (Secretario)
- Dra. Elza Berta Aguirre Vargas (Integrante)

para dar inicio a la Sustentación del Informe Final de Tesis titulado: “**OBTENCIÓN DE BIOPLÁSTICO A PARTIR DE ALMIDÓN DE SEMILLA DE *Persea americana* Y RESIDUOS DE *Coffea Arabica* L.**”, elaborado por las Bachilleres en Ingeniería Agroindustrial:

- OLIVO ZA VALETA, DARLING JULEISY
- CASTILLO FLORES, ROSSY OLINDA

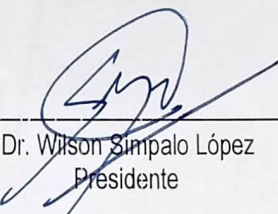
Asimismo, tienen como Asesor al docente: **Dra. Elza Berta Aguirre Vargas**

Finalizada la sustentación, las Tesisistas respondieron las preguntas formuladas por los miembros del Jurado Evaluador. Acto seguido el Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo, y con las sugerencias pertinentes en concordancia con el Artículo 107° del Reglamento de Grados y títulos de la Universidad Nacional del Santa, declaran:

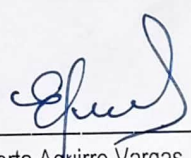
NOMBRES Y APELLIDOS	NOTA VIGESIMAL	CONDICIÓN
CASTILLO FLORES, ROSSY OLINDA	18	BUENO

Siendo las 12:00 horas del mismo día, se dio por terminada dicha sustentación, firmando en señal de conformidad el Jurado Evaluador.

Nuevo Chimbote, 08 de setiembre del 2026


Dr. Wilson Simpalo López
Presidente


Ms. Juan Carlos Vásquez Guzmán
Secretario


Dra. Elza Berta Aguirre Vargas
Integrante



CONSOLIDADO DE NOTAS DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

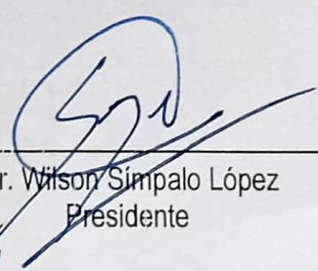
NOMBRES Y APELLIDOS: **ROSSY OLINDA CASTILLO FLORES**

NOTA FINAL DE LA SUSTENTACIÓN

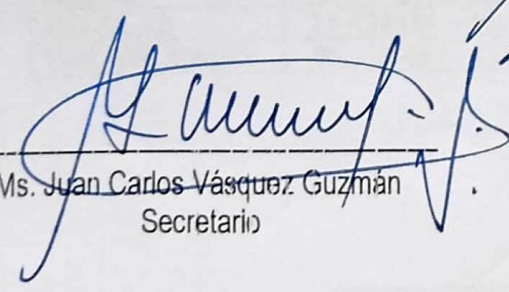
Nº	JURADO EVALUADOR	NOTA
01	Dr. Wilson Símpalo López	18
02	Dr. Ms. Juan Carlos Vásquez Guzmán	18
03	Dra. Elza Berta Aguirre Vargas	18
PROMEDIO		18

CALIFICATIVO: **BUENO** (18)

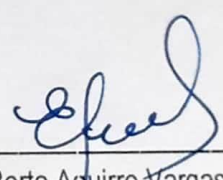
Nuevo Chimbote, 08 de setiembre del 2026



Dr. Wilson Símpalo López
Presidente



Ms. Juan Carlos Vásquez Guzmán
Secretario



Dra. Elza Berta Aguirre Vargas
Integrante



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: Elza Aguirre
Título del ejercicio: Informe final de tesis - Bioplastico
Título de la entrega: Obtención de bioplástico a partir de almidón de semilla de Per...
Nombre del archivo: TESIS_FINAL_OLIVO_Y_CASTILLO_2026.pdf
Tamaño del archivo: 6.35M
Total páginas: 215
Total de palabras: 54,408
Total de caracteres: 303,728
Fecha de entrega: 10-jul-2026 08:37a. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2995990065

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

 **UNS**
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

Obtención de bioplástico a partir de almidón de semilla de *Persea americana* y residuos de *Coffea arabica L.*

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Agroindustrial

Autor(a)s:
Bach. Olivo Zavaleta, Durling Juleisy
Bach. Castillo Flores, Rossy Olinda

Asesor(a):
Dra. Elza Berta Aguirre Vargas
DNI. N° 19096335
Código ORCID: 0000-0003-1659-9874

Co-asesor(a):
Ing. Arévalo Oliva, María de Fátima
DNI. N° 70917248
Código ORCID: 0000-0003-3432-9843

NUEVO CHIMBOTE – PERÚ
2026

i

Obtención de bioplástico a partir de almidón de semilla de Persea americana y residuos de Coff

INFORME DE ORIGINALIDAD

17%

INDICE DE SIMILITUD

16%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

6%

TRABAJS DEL ESTUD

FUENTES PRIMARIAS

1 repositorio.uns.edu.pe

Fuente de Internet

2 hdl.handle.net

Fuente de Internet

3 uvadoc.uva.es

Fuente de Internet

4 repositorio.unam.edu.pe

Fuente de Internet

5 idoc.pub

Fuente de Internet

6 documentos.uru.edu

Fuente de Internet

7 dspace.esPOCH.edu.ec

Fuente de Internet

8 core.ac.uk

Fuente de Internet

9 dspace.unitru.edu.pe

Fuente de Internet

10 rinfi.fi.mdp.edu.ar

Fuente de Internet

11 repositorio.unah.edu.pe

Fuente de Internet

12 Submitted to ITESM: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Trabajo del estudiante

13 uceva.repositoriodigital.com

Fuente de Internet

14 repositorio.uta.edu.ec

Fuente de Internet

15 repository.unad.edu.co

Fuente de Internet

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, quien ocupa el primer lugar en mi vida, por ser mi Padre, por darme la vida, la salud y por acompañarme y cuidarme durante cada etapa de este camino. Por recordarme, una vez más, que su tiempo es perfecto y que, mientras yo pongo mi esfuerzo, Él hace el resto.

A mis padres, Benilda Zavaleta Otiniano y Elmer Olivo Vásquez, por su amor infinito, su sacrificio y su apoyo incondicional; por creer siempre en mí, por enseñarme desde pequeña a luchar por mis sueños y a no rendirme ante las dificultades. Este logro también les pertenece, porque ustedes han sido el pilar que me ha permitido llegar hasta aquí.

A mi querida abuela Luisa, y a mis hermanos Carol y Jhon, por ser un ejemplo de fortaleza, valentía y perseverancia, y por estar siempre a mi lado brindándome su cariño y apoyo. A mis sobrinos Ivana, Amir y Caleb, con el deseo de que este logro los inspire a creer en sí mismos y a perseguir sus metas con dedicación.

Finalmente, dedico este trabajo a toda mi familia y a las grandes amistades que la universidad puso en mi camino. De manera especial, a Henry, por su compañía, paciencia y apoyo incondicional, por impulsarme a creer en mí y recordarme que era capaz de llegar a esta meta.

Darling Juleisy Olivo Zavaleta

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por ser mi guía, mi fortaleza y el motor que me permitió superar cada desafío a lo largo de este camino. Su amor y sus bendiciones hicieron posible alcanzar esta meta.

A mi familia, por estar siempre presente, acompañándome con su cariño, comprensión y palabras de aliento en cada etapa de este proceso.

A mis padres, por su amor incondicional, sus enseñanzas y el esfuerzo que realizaron para brindarme las herramientas necesarias para cumplir mis sueños. Su confianza y apoyo han sido el impulso más importante para llegar hasta aquí.

Finalmente, dedico este logro a mis amigos y a todas las personas que formaron parte de esta etapa de mi vida, por compartir conmigo los momentos más importantes, brindarme su apoyo y demostrarme que los sueños alcanzados tienen un mayor significado cuando se celebran junto a quienes más queremos.

Rossy Olinda Castillo Flores

AGRADECIMIENTO

Expresamos, en primer lugar, nuestra más profunda gratitud a Dios, por su infinito amor, fortaleza y guía constante a lo largo de nuestras vidas. Su bendición nos permitió superar cada desafío y culminar satisfactoriamente esta importante etapa de nuestra formación profesional.

A nuestros padres, les manifestamos nuestro más sincero agradecimiento por su amor incondicional, comprensión, sacrificio y apoyo permanente. Su confianza, motivación y ejemplo de perseverancia fueron el pilar fundamental que nos impulsó a alcanzar nuestras metas académicas y personales.

Expresamos nuestro especial reconocimiento a nuestro asesor, Dr. Elza Aguirre Vargas, por su valiosa orientación, conocimientos, dedicación y paciencia durante el desarrollo de esta investigación. Asimismo, agradecemos a nuestra co-asesora, María de Fátima Arévalo Oliva, por su compromiso, disposición y acompañamiento constante en cada etapa del proceso investigativo. Sus enseñanzas, experiencia y recomendaciones fueron fundamentales para fortalecer nuestra formación científica y fomentar nuestro interés por la investigación.

De manera especial, expresamos nuestro reconocimiento a los técnicos del (IITA), especialmente a la Ing. Melissa, la Ing. Juanita y la Ing. Andrea, por su valioso apoyo técnico, disposición y orientación durante la ejecución de los análisis experimentales. Asimismo, agradecemos a los responsables de los laboratorios de las distintas universidades donde se realizaron parte de los ensayos, por facilitarnos el acceso a sus instalaciones y equipos, haciendo posible el desarrollo de esta investigación.

Finalmente, agradecemos a todas las personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron con su apoyo, aliento y colaboración para la realización de esta tesis. Su respaldo fue esencial para alcanzar este importante logro académico y profesional.

INDICE

CERTIFICACIÓN DEL ASESOR.....	ii
AVAL DEL JURADO EVALUADOR.....	iii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO	4
2.1. Antecedentes.....	4
2.2. Marco conceptual	9
2.2.1. Plásticos y problemática ambiental	9
2.2.2. Bioplásticos.....	9
2.2.3. Plastificantes	13
2.2.4. Métodos de obtención de bioplásticos	16
2.2.5. Palta	20
2.2.6. Almidón	26
2.2.7. Residuos del café (Coffea arabica L.).....	31
2.2.8. Propiedades de bioplásticos.....	38
III. MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	40
3.1. Lugares de ejecución	40
3.2. Materiales e instrumentos	40
3.2.1. Materias primas	40
3.2.2. Insumos.....	40
3.2.3. Reactivos	40
3.2.4. Materiales de laboratorio	41
3.2.5. Equipos	42
3.3. Método.....	43
3.3.1. Obtención del almidón de semilla de palta.....	43
3.3.2. Obtención de harina de residuos de café	45
3.3.3. Obtención de bioplástico	46
3.4. Diseño de la investigación	47
3.4.1. Población y muestra	48
3.4.2. Operacionalización de variables	49

3.4.3.	Técnicas e Instrumentos de recolección de datos	51
3.4.4.	Diseño experimental	60
3.4.5.	Análisis estadístico	63
IV.	RESULTADOS	64
4.1.	Caracterización del almidón de semilla de palta	64
4.1.1.	Composición química proximal.....	64
4.1.2.	Composición de amilosa y amilopectina	65
4.1.3.	Punto de gelatinización.....	67
4.2.	Caracterización de la harina de residuos de café.....	67
4.2.1.	Composición química proximal.....	67
4.2.2.	Contenido de celulosa y lignina (%).....	70
4.2.3.	Capacidad antioxidante.....	72
4.3.	Propiedades fisicoquímicas del bioplástico	74
4.3.1.	Espesor	74
4.3.2.	Opacidad.....	82
4.3.3.	Solubilidad.....	89
4.4.	Propiedades mecánicas del bioplástico.....	97
4.4.1.	Tracción	98
4.4.2.	Elasticidad.....	106
4.4.3.	Módulo de Young.....	112
4.5.	Propiedad de barrera del bioplástico.....	125
4.5.1.	Permeabilidad de vapor de agua.....	125
4.6.	Propiedad química del bioplástico.....	127
4.6.1.	FTIR.....	127
4.7.	Propiedad térmica del bioplástico.....	130
4.7.1.	TGA.....	130
4.8.	Evaluación fisicoquímica de la conservación de uva con película multifuncional óptima	133
4.8.1.	Peso.....	133
4.8.2.	Fisicoquímicos (pH, acidez y brix).....	136
V.	CONCLUSIONES	146
VI.	RECOMENDACIONES.....	148

VII.	REFERENCIA BIBLIOGRAFICA.....	149
VIII.	ANEXOS.....	173

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Influencia del glicerol como plastificante en bioplástico de almidón.....	15
Tabla 2 Composición química de la semilla de aguacate	23
Tabla 3 Composición química de almidón de semilla de aguacate	24
Tabla 4 Contenido de amilosa y amilopectina en almidón de semilla de palta.....	24
Tabla 5 Composición químico - proximal de la cáscara de café (Coffe arabica L) (g/100g) .	35
Tabla 6 Componentes de celulosa y lignina de pulpa de café	36
Tabla 7 Variables operacionales	49
Tabla 8 Rango de concentración de las tres variables independientes usadas en el Factorial Multinivel	60
Tabla 9 Matriz experimental para la formulación de bioplástico a base de almidón de palta, harina de residuos de café y glicerina.....	61
Tabla 10 Matriz de diseño experimental para la elaboración de los bioplásticos.....	62
Tabla 11 Composición proximal de almidón de semilla de palta.....	64
Tabla 12 Contenido (%) de amilosa y amilopectina en almidón de semilla de palta	66
Tabla 13 Composición proximal de harina de residuos de café	68
Tabla 14 Contenido de celulosa y lignina (%) de la pulpa de café.....	70
Tabla 15 Capacidad antioxidante en términos de porcentaje de inhibición del radical	72
Tabla 16 Promedio del espesor de los tratamientos de bioplástico.....	74
Tabla 17 Pruebas de Normalidad para ESPESOR.....	76
Tabla 18 Prueba de homogeneidad de varianzas para ESPESOR.....	76
Tabla 19 Tabla ANOVA para ESPESOR.....	76
Tabla 20 Prueba de Tukey HSD para ESPESOR	77
Tabla 21 Análisis de varianza para el espesor en los tratamientos	78
Tabla 22 Promedios de la opacidad de los tratamientos de bioplástico.....	82
Tabla 23 Pruebas de Normalidad para OPACIDAD	83
Tabla 24 Prueba de homogeneidad de varianzas para OPACIDAD	84
Tabla 25 Tabla ANOVA para OPACIDAD	84
Tabla 26 Prueba de Tukey HSD para OPACIDAD.....	85
Tabla 27 Análisis de varianza para la opacidad en los tratamientos.....	86
Tabla 28 Promedios de la solubilidad de los tratamientos de bioplástico	89
Tabla 29 Pruebas de Normalidad para SOLUBILIDAD	91

Tabla 30	Prueba de homogeneidad de varianzas para SOLUBILIDAD	92
Tabla 31	Tabla ANOVA para SOLUBILIDAD	92
Tabla 32	Prueba de Tukey HSD para SOLUBILIDAD	92
Tabla 33	Análisis de varianza para la solubilidad en los tratamientos	94
Tabla 34	Resultados de las propiedades mecánicas evaluadas en los bioplásticos.....	97
Tabla 35	Pruebas de Normalidad para TRACCIÓN	99
Tabla 36	Prueba de homogeneidad de varianzas para TRACCIÓN.....	100
Tabla 37	Tabla ANOVA para Tracción.....	100
Tabla 38	Prueba de Duncan para TRACCIÓN.....	101
Tabla 39	Análisis de varianza para la tracción en los tratamientos	102
Tabla 40	Pruebas de Normalidad para ELASTICIDAD.....	106
Tabla 41	Prueba de homogeneidad de varianzas para ELASTICIDAD.....	107
Tabla 42	Tabla ANOVA para Elasticidad	107
Tabla 43	Prueba de Duncan para ELASTICIDAD.....	108
Tabla 44	Análisis de varianza para la elasticidad en los tratamientos	109
Tabla 45	Pruebas de Normalidad para MODULO DE YOUNG.....	113
Tabla 46	Prueba de homogeneidad de varianzas para MODULO DE YOUNG.....	114
Tabla 47	Tabla ANOVA para Modulo de Young	114
Tabla 48	Prueba de Duncan para MODULO DE YOUNG.....	115
Tabla 49	Análisis de varianza para el módulo de Young en los tratamientos	116
Tabla 50	Optimización de Múltiples Respuestas.....	121
Tabla 51	PVA de los bioplásticos	125
Tabla 52	Pruebas de Normalidad para Permeabilidad.....	125
Tabla 53	Prueba de homogeneidad de varianzas para Permeabilidad	125
Tabla 54	Prueba t para comparar medias.....	126
Tabla 55	Evaluación de la pérdida de peso (%) con el paso de los días.....	133
Tabla 56	Pruebas de Normalidad para pérdida de peso(%).....	133
Tabla 57	Prueba de homogeneidad de varianzas para Permeabilidad	134
Tabla 58	Propiedades fisicoquímicas de la uva verde con el bioplástico control y óptimo.	136
Tabla 59	Pruebas de Normalidad.....	137
Tabla 60	Pruebas de Normalidad de los residuos pH y Acidez	137
Tabla 61	Prueba de homogeneidad de varianzas	138

Tabla 62 Tabla ANOVA para pH según tratamiento y día.....	138
Tabla 63 Tabla ANOVA para acidez según tratamiento y día	140
Tabla 64 Tabla ANOVA para el brix según tratamiento y día	143

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Categorías de materiales bioplásticos en función de su origen y su biodegradabilidad en el medio ambiente	11
Figura 2 Esquema del método casting	17
Figura 3 Diagrama esquemático del método de moldeo por inyección.....	18
Figura 4 Esquema del proceso de moldeo por compresión.	19
Figura 5 Esquema del proceso de extrusión	19
Figura 6 Diagrama esquemático del método de impresión 3D	20
Figura 7 Estructura y principales nutrientes del aguacate, con 50 g de aguacate Hass fresco como ejemplo. AGS: ácidos grasos saturados; AGPI: ácidos grasos poliinsaturados; AGMI: ácidos grasos monoinsaturados.....	21
Figura 8 Morfología de la semilla de aguacate. a)cotiledones y b)embrión.....	22
Figura 9 La estructura del gránulo de almidón.....	27
Figura 10 Estructura de la amilosa y la amilopectina en el almidón.	28
Figura 11 Esquema del mecanismo de gelatinización del almidón normal durante el calentamiento en un exceso de agua a 99 °C.....	29
Figura 12 Residuos de plantas, cerezas y procesamiento de café.....	32
Figura 13 Representación esquemática de la estructura de la cereza de café y de los subproductos derivados del procesamiento del café. Los porcentajes	34
Figura 14 Diagrama de flujo del proceso de extracción húmeda de almidón de la semilla de palta	43
Figura 15 Diagrama de flujo del proceso de obtención de harina de residuos de café.....	45
Figura 16 Diagrama de operación de la elaboración de un bioplástico por el método casting.	46
Figura 17 Esquema del cuerpo de prueba para el ensayo de tracción	58
Figura 18 Gráfico de Medias del espesor con Intervalos de Confianza del 95% para los 13 Tratamientos	78
Figura 19 Diagrama de Pareto del efecto de los factores en el espesor.....	80
Figura 20 Superficie de respuesta para el espesor	80
Figura 21 Gráfico de Medias de opacidad con Intervalos de Confianza del 95% para los 13 Tratamientos	86
Figura 22 Diagrama de Pareto del efecto de los factores en la opacidad	88

Figura 23 Superficie de respuesta para la opacidad.....	88
Figura 24 Gráfico de Medias de opacidad con Intervalos de Confianza del 95% para los 13 Tratamientos	93
Figura 25 Diagrama de Pareto del efecto de los factores en la solubilidad	95
Figura 26 Superficie de respuesta para la solubilidad	96
Figura 27 Gráfico de cajas de los tratamientos.....	102
Figura 28 Diagrama de Pareto del efecto de los factores en la tracción.....	104
Figura 29 Superficie de respuesta para la Tracción.....	104
Figura 30 Gráfico de cajas de los tratamientos.....	109
Figura 31 Diagrama de Pareto del efecto de los factores en la elasticidad.....	111
Figura 32 Superficie de respuesta para la elasticidad	111
Figura 33 Gráfico de cajas de los tratamientos.....	116
Figura 34 Diagrama de Pareto del efecto de los factores en el módulo de Young.....	118
Figura 35 Superficie de respuesta para el módulo de Young	119
Figura 36 Espectros de FTIR de los bioplásticos de a) almidón de semilla de palta 5.5% y glicerina 1.65% (T0 o control), b) almidón de semilla de palta 7.5%, residuos de café 4% y glicerina 1.65% (T8).	128
Figura 37 Análisis de termogravimetría (TGA) de los bioplásticos de a) almidón de semilla de palta 5.5% y glicerina 1.65% (T0 o control), b) almidón de semilla de palta 7.5%, residuos de café 4% y glicerina 1.65% (T8).	131
Figura 38 Pérdida de peso (%) vs días	134
Figura 39 pH vs días.....	139
Figura 40 Acidez titulable (%) vs días	141
Figura 41 Brix vs días.....	144

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Materias primas	173
Anexo 2. Extracción de almidón	173
Anexo 3. Obtención de harina de residuos de café.....	175
Anexo 4. Análisis de humedad.....	176
Anexo 5. Analisis contenido de amilosa y amilopectina.....	177
Anexo 6. Lectura de las muestras en el espectrofotómetro.	179
Anexo 7. Lectura de las muestras en el espectrofotómetro.	179
Anexo 8. Prueba de gelatinización	180
Anexo 9. Análisis de proteínas.....	180
Anexo 10. Análisis de grasa	181
Anexo 11. Análisis de cenizas.....	182
Anexo 12. Análisis de contenido de fibra	183
Anexo 13. Preparación de muestra para medir capacidad antioxidante	185
Anexo 14. Determinación de contenido de celulosa y lignina	186
Anexo 15. Análisis DPPH	189
Anexo 16. Curva de calibración de Trolox mediante el método DPPH para el análisis de capacidad antioxidante del extracto de polvo de café	190
Anexo 17. Tabla de resultados – capacidad antioxidante extracto de harina de residuos de café.....	190
Anexo 18. Preparación de películas	191
Anexo 19. Medición de espesor de bioplásticos.....	192
Anexo 20. Medición de opacidad de bioplásticos	193
Anexo 21. Determinación de solubilidad en bioplásticos	193
Anexo 22. Análisis de Texturometría en bioplásticos.....	195
Anexo 23. Resultados mecánicos de los bioplásticos.....	195
Anexo 24. Análisis de permeabilidad de los bioplásticos	197
Anexo 25. Análisis de FTIR y TGA de los bioplásticos	198
Anexo 26. Acondicionamiento de la uva	199
Anexo 27. Caracterización de la uva.....	199
Anexo 28. Resultados fisicoquímicos de la uva	201

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue obtener un bioplástico a partir de almidón de semilla de palta (*Persea americana*) reforzado con harina de residuos de café (*Coffea arabica* L.) para su potencial aplicación en la conservación de uva verde. Los bioplásticos fueron elaborados mediante el método de *casting* empleando un Diseño factorial multinivel, considerando como variables independientes la concentración de almidón (5.5–7.5 %), harina de residuos de café (2–6 %) y glicerina (1.65–2.00 %), obteniéndose 13 tratamientos. Se evaluaron las propiedades físicas (espesor, opacidad y solubilidad), mecánicas (resistencia a la tracción, elongación y módulo de Young), de barrera (permeabilidad al vapor de agua), estructurales (FTIR) y térmicas (TGA), además de su aplicación en la conservación de uva verde durante 13 días de almacenamiento refrigerado. La formulación óptima correspondió al tratamiento T8 (7.5 % de almidón, 4 % de harina de residuos de café y 1.65 % de glicerina), presentando un espesor de 0.177 mm, opacidad de 8.66 %, solubilidad de 17.61 %, resistencia a la tracción de 5.64 MPa, elongación de 5.81 %, módulo de Young de 217.49 MPa y una permeabilidad al vapor de agua de $2.37 \times 10^{-10} \text{ g} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}$. El análisis FTIR evidenció la formación de interacciones por puentes de hidrógeno sin alterar la estructura química de la matriz, mientras que el análisis TGA mostró una pérdida de masa de 82.74 % y un residuo carbonoso cercano al 17 %, indicando una mayor estabilidad térmica del bioplástico reforzado. En la conservación de uva, la formulación óptima mantuvo la calidad fisicoquímica del fruto durante el almacenamiento, registrando una pérdida de peso de 5.62 % frente al control 2.50%, dentro del rango aceptable para uvas de mesa, lo que demuestra el potencial del bioplástico como alternativa biodegradable para el envasado de frutas frescas y la valorización de residuos agroindustriales.

PALABRAS CLAVE: bioplástico; almidón de semilla de palta; residuos de café; método casting; valorización de residuos.

ABSTRACT

The objective of this study was to produce a bioplastic from avocado seed starch (*Persea americana*) reinforced with coffee waste flour (*Coffea arabica* L.) for its potential application in the preservation of green grapes. The bioplastics were produced using the casting method and a multilevel factorial design, with the concentration of starch (5.5–7.5%), coffee grounds (2–6%), and glycerin (1.65–2.00%) as independent variables, resulting in 13 treatments. The following properties were evaluated: physical (thickness, opacity, and solubility); mechanical (tensile strength, elongation, and Young's modulus); barrier (water vapor permeability); structural (FTIR); and thermal (TGA), as well as their application in the preservation of green grapes during 13 days of refrigerated storage. The optimal formulation was treatment T8 (7.5% starch, 4% coffee grounds flour, and 1.65% glycerin), which had a thickness of 0.177 mm, opacity of 8.66%, solubility of 17.61%, tensile strength of 5.64 MPa, elongation of 5.81%, Young's modulus of 217.49 MPa, and water vapor permeability of $2.37 \times 10^{-1} \text{ g} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}$. FTIR analysis revealed the formation of hydrogen-bond interactions without altering the chemical structure of the matrix, while TGA analysis showed a mass loss of 82.74% and a carbon residue of approximately 17%, indicating greater stability of the reinforced bioplastic. In grape preservation, the optimal formulation maintained the fruit's physicochemical quality during storage, recording a weight loss of 5.62% compared to 2.50% for the control—within the acceptable range for table grapes—demonstrating the potential of bioplastic as a biodegradable alternative for fresh fruit packaging and the valorization of agro-industrial waste.

KEYWORDS: bioplastic; avocado seed starch; coffee waste; casting method; waste valorization.

I. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los plásticos, derivados del petróleo y de un solo uso, no son biodegradables y terminan acumulándose en vertederos y océanos como microplásticos (Oliveira et al., 2021). A nivel global, la producción anual oscila entre 350 y 380 millones de toneladas, con un potencial de reciclaje cercano al 33 % (Shen y Worrell, 2024), en el Perú se generan cerca de 1,2 millones de toneladas de residuos plásticos al año, reciclándose solo el 10 %, mientras el resto se acumula en el ambiente (MINAM, 2024); el consumo alcanza 950 mil toneladas anuales, con 30 kg per cápita, y el reciclaje histórico ha sido menor al 5 % (Salazar, 2023). Se prevé que la cantidad de plástico continúe incrementándose en los próximos años. Esta problemática se agrava considerando que más del 50 % de los envases industriales se destinan al sector alimentario y cerca del 40 % son plásticos (Semple et al., 2022). Si no se modifican las tendencias actuales de consumo ni se desarrollan materiales ecológicos alternativos, para 2050 habrá alrededor de 12.000 millones de toneladas de desechos plásticos en vertederos y el medio ambiente (Miranda, 2025); lo que evidencia la necesidad de desarrollar materiales más eficientes y accesibles.

Paralelamente, la generación de residuos agroindustriales constituye otro problema ambiental significativo. A nivel global, estos residuos han alcanzado aproximadamente 998 millones de toneladas anuales, lo que representa una fuente abundante de biomasa con potencial de valorización (Periyasamy et al., 2024). Los residuos se definen como alimentos seguros y nutritivos que se desechan o se utilizan en alternativas no alimentarias a lo largo de la cadena de suministro (Muñiz et al., 2023); su aprovechamiento en procesos industriales sostenibles se presenta como una estrategia clave dentro del enfoque de economía circular. Entre los residuos agroindustriales de mayor relevancia destacan aquellos provenientes de la industria del café y del procesamiento de frutas como la palta. El café es el segundo producto básico comercializado en el mundo y genera grandes cantidades de subproductos y desechos durante su procesamiento (Skorupa et al., 2023). El Perú alcanza exportaciones cercanas a 380,000 toneladas anuales durante la fase de cosecha, aproximadamente el 63.4% corresponde a cáscara, mientras que durante el procesamiento se producen principalmente cascarilla (51.2%) y residuos de fermentación (24.4%) (Requelme, 2023). Estos subproductos constituyen una proporción significativa del material total y suelen ser desechados, los cuales contienen compuestos lignocelulósicos, lípidos y polisacáridos que pueden ser aprovechados como refuerzos en materiales compuestos (Enriquez et al., 2024); así mismo la industria procesadora del aguacate

sólo utiliza la pulpa, por lo que las semillas y las cáscaras suelen desecharse (Rodríguez et al., 2022); en 2022, Perú exportó 16,766 tn de palta congelada. Con un rendimiento de 72% de pulpa, 10% semilla y 16% cáscara, se generaron 2,731 tn de cáscara y 1,676 tn de semillas como residuos principales (Instituto Tecnológico de la Producción, 2023) además contiene alto contenido de almidón, con potencial para usarse como espesante, gelificante, vehículo farmacéutico y materia prima en polímeros biodegradables (Navarrete et al., 2023).

Los bioplásticos destacan por su biodegradabilidad, menor impacto ambiental y eficiencia energética, además de sus propiedades mecánicas y térmicas. Presentan alto potencial para sustituir plásticos derivados del petróleo en diversas industrias (Nanda et al., 2022) y los bioplásticos de almidón son una alternativa sostenible, pero presentan baja resistencia y alta sensibilidad a la humedad (Ghoshal y Kaur, 2023). La incorporación de residuos lignocelulósicos, mejora propiedades mecánicas, térmicas y de barrera, favoreciendo su uso en empaques biodegradables (Enriquez et al., 2024). Los bioplásticos surgen como una alternativa innovadora dentro de los polímeros actuales, por lo que se propone evidenciar su producción utilizando materiales de desecho.

Ante ello se plantea la siguiente interrogante como problemática: ¿Es posible obtener un bioplástico utilizando almidón de semilla de palta (*Persea americana*) reforzado con harina de residuos de café (*Coffea arabica* L.) mediante el método de casting, que presente las propiedades físicas y mecánicas adecuadas para su aplicación como material de empaque?. Para ello se planteó la siguiente hipótesis: se obtiene un bioplástico utilizando almidón de semilla de palta (%) (5.5 – 7.5 %) reforzado con harina de residuos de café (2 - 6%) añadiendo glicerol como plastificante (1.65 – 2 %) mediante el método casting que presente propiedades físicas y mecánicas adecuadas, permitiendo su aplicación como bioplástico en la conservación de uvas.

La creciente preocupación por la contaminación ambiental causada por plásticos convencionales ha impulsado la búsqueda de alternativas más sostenibles. La utilización de residuos agroindustriales no solo disminuye la cantidad de desechos, sino que también promueve una gestión más eficiente, contribuyendo a la reducción de la contaminación y a la conservación de los recursos naturales (Brizga et al., 2020). En este contexto, el almidón destaca como uno de los polímeros naturales más utilizados en la producción de bioplásticos debido a su disponibilidad, renovabilidad y bajo costo (Salazar et al., 2021). Asimismo, la incorporación de fibras lignocelulósicas provenientes del café puede mejorar las propiedades mecánicas y

fisicoquímicas del bioplástico, como su resistencia y permeabilidad (Tabassum et al., 2025). A pesar de estos avances, existe limitada información sobre el uso combinado del almidón de *Persea americana* y residuos de *Coffea arabica* L., lo que evidencia un vacío científico. En este sentido, esta combinación tecnológica permite optimizar el rendimiento del bioplástico y ampliar sus aplicaciones, especialmente en empaques. Además, el desarrollo de estos materiales contribuye a reducir el impacto ambiental de los plásticos convencionales y promueve la valorización de residuos agroindustriales, fomentando alternativas sostenibles en la industria y el aprovechamiento de recursos renovables. La difusión de estas tecnologías puede fortalecer una cultura de responsabilidad ambiental y social en consumidores y productores (Alves et al., 2023).

Para lo cual se planteó como objetivo general obtener un bioplástico a partir de almidón de semilla de palta (*Persea americana*) reforzados con harina de residuos de café (*Coffea arabica* L y evaluar sus propiedades para su potencial aplicación en la conservación de uva; y como objetivos específicos: determinar la composición química del almidón de semilla de palta y de la harina obtenida a partir de residuos de café; extraer el almidón de semilla de palta y caracterizar sus propiedades fisicoquímicas; obtener harina a partir de los residuos de café y caracterizar sus propiedades fisicoquímicas, lignocelulósicas y antioxidantes; formular bioplásticos a base de almidón de semilla de palta reforzados con harina de residuos de café mediante el método de casting; evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los bioplásticos obtenidos para seleccionar la formulación con mejor desempeño; y evaluar las propiedades de barrera, estructurales y térmicas de la formulación seleccionada para determinar su potencial aplicación en la conservación de uva.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Jiménez et al. (2022), en su investigación “Extraction of starch from Hass avocado seeds for the preparation of biofilms” como objetivo extraer almidón de semilla de aguacate variedad Hass para la producción de biopelículas; la extracción por método vía húmeda y se caracterizó por espectroscopia infrarroja; trabajo con dos tratamientos con glicerol T2 y solo almidón T1 analizo sus propiedades mecánicas; obtuvo como resultados un rendimiento de almidón de 11.38%; la adición de glicerol permitió obtener una biopelícula con características flexibles puesto que solo almidón resulto quebradiza y muy rígida; por lo cual en la resistencia a la tracción siendo T1 (19.37 MPa) mayor que T2 (10.78%) y en porcentaje de elongación paso lo contrario, T1 (3.07%) fue menor que T2 (13.09) en cuanto a permeabilidad de agua que juega un papel importante en reacciones de deterioro de los alimentos siendo la T2 ($3,98E-03 \pm 1,09E-03$ g/día mPa) más permeable que la T1 ($1,42E-05 \pm 2,33E-06$ g/día mPa) debido a la adición de glicerol concluyendo que se puede utilizar en recubrimientos de alimentos con baja humedad.

Según Sánchez et al. (2022) en su investigación empleo la cáscara y semilla de aguacate (*Persea americana*) para obtener películas plásticas a partir de almidón y celulosa presentes en ellas; el método de extracción de almidón vía húmeda y método casting para la película. Se caracterizó en cuanto a humedad, solubilidad en agua, densidad, espesor, biodegradabilidad, tensión, deformación y módulo de elasticidad; reportaron que la celulosa no influyo agregando PVA para mejores resultados, presento 23,43 % de humedad; 39,39 % de solubilidad en agua, 1,52 g/cm³ de densidad; 58 mm de espesor; 21,03 % de pérdida de peso para la prueba de biodegradabilidad; 1,53 MPa para tensión; 21,25 % deformación y 10,04 MPa para el módulo de elasticidad; intervino el % de amilosa y amilopectina que fue de 22.34 y 77.69 respectivamente resultando un almidón de alta solubilidad, baja absorción de agua y bajo poder de hinchamiento. Aun así, los resultados necesitan ser reforzados ya que no compite con un plástico sintético y poder darle mayores propiedades mecánicas se mejorando la calidad del almidón o agregando aditivos.

Según Rizal et al. (2023) en su investigación “Coffee Waste Macro-Particle Enhancement in Biopolymer Materials for Edible Packaging” donde incorporo polvo de café a distintas concentraciones (0%, 1%, 2%, 3%, 4% y 5%) en película de biopolímero de algas determinando sus propiedades físico y mecánicas como (microscopía electrónica de barrido

(MEB), irradiación de transmisión Fourier (FTIR), medición del ángulo de contacto con el agua (WCA) y análisis termogravimétrico (TGA) obteniendo como resultados en cuanto a la MEB revelo que el relleno de café estaba uniformemente disperso en la matriz polimérica, mejorando la estructura de la película; en la FTIR muestra que los residuos de café se incorporó con la matriz de la película con la presencia de un enlace N-H; en la WCA, indica un mayor ángulo de contacto con el agua en comparación con la película pura a mayor concentración aumenta la hidrofobicidad de la película y el TGA mostro una resistencia a la tracción óptima (35,47 MPa) con la adición de residuos de café en polvo al 4%. Teniendo un enfoque prometedor y agregar valor al uso de residuos de café.

Según Gómez et al. (2022) en su investigación realizo una mezcla de pulpa de café seca y almidón de yuca para producir biopelículas mediante una prueba preliminar, el biopolímero estuvo compuesto por 96,3% p/p de almidón de yuca gelatinizado, 0,3% p/p de residuo seco, 2,1% de glicerina y 1,3% de PVOH; evaluó sus propiedades mecánicas respecto a tensión, resistencia de impacto y caracterización térmica, resulto que la que contenía pulpa de café seco presento resistencia a la de 2,44 Mpa y un alargamiento del 78,65% es un porcentaje de deformación plástica esperado para este tipo de materiales. En la Escala de Dureza Shore, el material tuvo un valor de 83,5, lo que lo clasifica como un material blando, mientras que su temperatura de fusión fue de 228,61°C, lo que indica que es resistente a altas temperaturas; el fin es sustituir los materiales plásticos convencionales por el nuevo material para contribuir así a las estrategias de economía circular recalando que piensa reforzar lo obtenido haciendo más análisis físico y mecánicos.

Según Fathurohman et al. (2020) en su investigación “El efecto de la adición de semillas de fruta de aguacate en la biodegradación de bioplástico de quitosano” para ello la prueba de biodegradabilidad lo hallo en función a la pérdida de peso en medio del suelo; los porcentajes de almidón de semilla de palta que empleo en su formulación fue (0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; y 1,4 g) y como plastificante sorbitol; mediante el espectrofotómetro FTIR demostró la formación de almidón por sus grupos funcionales encontrados, resulto un bioplástico una fina película de color marrón en cuanto a los días de biodegradación a más % de almidón más reducción de peso solo al segundo día; concluyo que el bioplástico obtenido tiene propiedades biodegradables por la disminución de la pérdida de peso en 12 días fue en un 76%.

Suhartini et al. (2023) menciona que el uso de plástico como embalaje de alimentos es un grave problema porque es difícil de descomponer es por ello que en su investigación “synthesis and characterization of nano chitosan-avocado seed starch as edible films”, tuvo como desarrollar un bioplástico a partir de una mezcla plastificante, nanoquitosano y almidón de semilla de aguacate. Realizó la síntesis de nanoquitosano utilizando el método UAE durante 2 h con una amplitud del 50% para producir partículas de 0,7 μm de tamaño. Las películas se formaron mediante el método de casting y caracterizaron el bioplástico (pruebas de grupo funcional, espesor, color y antioxidantes). Los resultados de la investigación mostraron mediante el espectro FTIR que la interacción entre el nanoquitosano y el almidón de la semilla de aguacate marcó un cambio en el número de onda del grupo amida carbonilo de 1646,60 cm^{-1} a 1549,99 cm^{-1} . El espesor de la película fue de 0,10 a 0,15 cm con un color más oscuro a medida que aumentaba el volumen de nanoquitosano utilizado. El análisis de antioxidantes reveló que el valor CL50 estaba entre 150 y 250 ppm. Con respecto a la aplicación para conservación de una fruta (fresa), concluyó que las propiedades de barrera de la película resultante contra el vapor de agua pueden inhibir la descomposición de la fresa durante 3 a 4 días a temperatura ambiente.

De Almeida, (2020) en su investigación titulada “Properties of lignocellulosic composites of coffee husk filled polypropylene” tuvo como objetivo evaluar las propiedades de un PP incorporado con compuestos lignocelulósicos de cascara de café, por lo cual para su metodología experimental incorporó cascara de café molida a PP (polipropileno) al 20, 30 y 40% realizó ensayos de tracción y flexión en tres puntos según ASTM D638 y D790 respectivamente, y pruebas de DSG a una velocidad de calentamiento de 10°C/min de 25° a 200°C y TGA (análisis termogravimétrico) a 20°C/min de 25° a 650°C. Como resultado de su investigación en relación con el PP puro, mostró que la rigidez del compuesto aumentó, lo que se evidencia por un aumento en los módulos de tracción y flexión de hasta un 75% y un 90%, respectivamente, debido a las restricciones impuestas a la movilidad de la cadena de polímero por las cáscaras más rígidas con respecto a la temperatura de fusión del DSC no sufrió cambios significativos cuando agregó cascara de café, sin embargo, la cristalinidad del PP aumentó constantemente a medida que aumenta el contenido de cascara de café, menciona que el relleno adsorbió las moléculas del polímero y actuó como núcleos cristalinos, por último la estabilidad térmica relativa del compuesto aumentó un 13°C en

Tmax en comparación al compuesto de 40% de peso de cascara de café con el PP tal como lo muestra en el análisis TGA.

Lubis, (2019) en su investigación “Production of Bioplastic from Avocado Seed Starch Reinforced with Microcrystalline Cellulose from Sugar Palm Fibers” tuvo el objetivo de evaluar la influencia de la celulosa microcristalina derivada de fibras de palma de azúcar y glicerol sobre las propiedades mecánicas de bioplásticos a partir de almidón de semilla de aguacate. Para la obtención de celulosa microcristalina sometido las fibras de la palma de azúcar a un tratamiento alcalino, blanqueamiento e hidrolisis con HLC. Para la elaboración del bioplástico utilizo el método casting, elaboro diferentes proporciones de composición para MCC de fibra de palma de azúcar (6:4; 7:3, 8:2 y 9:1 (p/p)) y glicerol (0,1; 0,2; 0,3 y 0,4 (v/p de almidón)). Como resultado de las propiedades mecánicas del bioplástico determino mediante análisis de resistencia a la tracción y alargamiento a la rotura, que la mejor condición de los bioplásticos obtenidos fue partir de una proporción de 7:3 con 0,2 (v/w) de glicerol agregado, con un valor de 2,74 MPa para la resistencia a la tracción. y 3,16% para el alargamiento a la rotura. El análisis FT-IR mostró los grupos funcionales de los bioplásticos, la mayoría de los grupos OH, se encontraron a partir de la adición de celulosa microcristalina que representaba enlaces de hidrógeno sustanciales.

Yiga et al., (2020) ejecuto una investigación donde desarrollo un polipropileno reforzado con fibra con cáscara de arroz y café pretratada con NaOH como relleno, y tuvo como objetivo evaluar las propiedades mecánicas y térmicas del polipropileno obtenido, para ello la carga de material de relleno utilizado fue cáscaras de arroz y para cáscaras de café, para el uso de las cascara realizo una técnica de modificación en este caso el tratamiento alcalino, posteriormente para la combinación de la matriz del PP con los materiales de relleno utilizaron una extrusora de doble tornillo. Como resultado obtuvo que la resistencia de tracción vario de 27,4 a 37,4 MPa (cascarilla de café) y de 30,7 a 37,4 MPa (Cascarilla de café modificada), con respecto al análisis termogravimétrico mostró que un aumento en el contenido de carga resultó en una pérdida de peso retrasada a altas temperaturas de degradación, por lo tanto, en su investigación concluyo que plásticos reforzados con fibras desarrollados pueden ser utilizados en aplicaciones que requieren una alta estabilidad térmica y buenas propiedades mecánicas.

En el estudio de Rusdianto et al. (2022) titulado “*The Characterization of Biodegradable Plastics from Cassava Starch with Varied Addition of Robusta Coffee Skin (Coffea*

canephora) and Glycerol”, se evaluó el uso de cascarilla de café robusta como refuerzo lignocelulósico en la elaboración de bioplásticos a base de almidón de yuca, destacando su potencial como residuo agroindustrial valorizable. La incorporación de la fibra de café permitió mejorar las propiedades estructurales del material, debido a su contenido de celulosa y lignina. Se utilizó un diseño completamente aleatorizado con dos factores: proporción de cascarilla de café y concentración de glicerol, evaluándose espesor, absorción de agua, biodegradabilidad y propiedades mecánicas. Los resultados evidenciaron que el espesor varió entre 0.703 y 1.007 mm. La absorción de agua se situó entre 3.437 y 13.512%, influenciada tanto por el glicerol como por la naturaleza hidrofílica de la fibra de café. La biodegradabilidad alcanzó valores entre 32.914 y 68.971%, mostrando que la incorporación de cascarilla de café favorece la degradación del material. Asimismo, la resistencia a la tracción osciló entre 19.056 y 46.507%, con un módulo de elasticidad entre 2.557 y 16.442 MPa, evidenciando que la fibra de café aporta rigidez y refuerzo estructural. El índice de efectividad indicó que las mejores formulaciones incluyeron 20% de cascarilla de café con diferentes concentraciones de glicerol, resaltando su importancia en la mejora del desempeño del bioplástico.

En el estudio de Schutz et al. (2023); “Development of starch-based films reinforced with coffee husks for packaging applications”, se desarrollaron biopelículas a base de almidón reforzadas con cáscara de café, destacando este residuo lignocelulósico como una alternativa sostenible para aplicaciones de envasado. Se evaluaron concentraciones de 5%, 10% y 15% (p/p) de cáscara de café sobre propiedades mecánicas, térmicas y de barrera. Los resultados evidenciaron una mejora significativa en la resistencia mecánica, alcanzando un valor máximo de 19,71 MPa con 5% de adición, lo que representó un incremento del 43% respecto a la muestra control. A nivel estructural, las micrografías SEM mostraron buena adhesión entre la fibra de café y la matriz de almidón, aunque a mayores concentraciones se observó menor dispersión. El análisis XRD indicó un aumento en la cristalinidad, mientras que FT-IR no mostró cambios relevantes. En cuanto a las propiedades funcionales, la incorporación de 5% de cáscara de café redujo la permeabilidad al vapor de agua (~15%), el contenido de humedad (~21%) y la solubilidad (~50%). Asimismo, se observó una mejora en la estabilidad térmica y una alta capacidad de barrera frente a radiación UV, confirmando su potencial.

2.2. Marco conceptual

2.2.1. *Plásticos y problemática ambiental*

Los plásticos son materiales sintéticos formados por polímeros orgánicos, principalmente derivados de recursos petroquímicos como petróleo, gas y carbón en la actualidad se producen anualmente entre 350 y 380 millones de toneladas de plástico. (Shen y Worrell, 2024). Se caracterizan por su estructura compleja y la incorporación de aditivos que les confieren propiedades específicas. Entre los más comunes se encuentran el polietileno (PE), polipropileno (PP), tereftalato de polietileno (PET), policloruro de vinilo (PVC), poliestireno (PS) y policarbonato (PC) (Getino et al., 2025). Su bajo costo, resistencia, durabilidad y versatilidad han impulsado su uso masivo en múltiples sectores (Landrigan et al., 2023). El modelo lineal de uso del plástico genera altas emisiones de CO₂ y contaminación, ya que gran parte se utiliza una sola vez y poco se recicla (Johansen et al., 2022). En 2022 se produjeron más de 390 millones de toneladas, agravando impactos en la salud y los ecosistemas (Ali et al., 2023). Como alternativa, los bioplásticos, derivados de recursos renovables, reducen la dependencia fósil y aprovechan residuos agrícolas, siendo una opción sostenible (Mangal et al., 2023; Babaremu et al., 2023).

2.2.2. *Bioplásticos*

Los bioplásticos se generan a partir de biopolímeros de origen natural, producidos por organismos vivos. Dependiendo de su estructura y naturaleza, estos biopolímeros se clasifican en tres categorías: polinucleótidos, polipéptidos y polisacáridos (carbohidratos). Los bioplásticos son plásticos fabricados total o parcialmente a partir de materiales de origen biológico. Su principal ventaja radica en la reducción de la dependencia de recursos fósiles y en su potencial para integrarse en sistemas de economía circular.

Entre los biopolímeros más abundantes se encuentra el almidón, aunque también existen otros poliésteres derivados de microorganismos (Meira & Gugliotta, 2022). Los residuos sólidos agroindustriales que generalmente se obtienen son las semillas, cáscaras, raíces, tallos, y estos son una fuente de biopolímeros (Sánchez et al., 2022). Es por ello que Merino et al., (2021) menciona que la recuperación de los residuos agroindustriales para

la elaboración de bioplásticos es una tendencia de investigación creciente debido a su impacto positivo en el modelo ambiental

2.2.2.1. Clasificación de bioplásticos

Los bioplásticos se clasifican en tres categorías principales según su origen y características: aquellos de base biológica no biodegradables, los de origen biológico biodegradables y los biodegradables derivados de fuentes fósiles. Los plásticos biológicos biodegradables y no biodegradables difieren en impacto ambiental y reciclaje. Los biodegradables, como el PLA y PHA, se descomponen bajo condiciones específicas, pero dificultan su reciclaje. En cambio, los no biodegradables, como bio-PE y bio-PET, son reciclables y compatibles con sistemas convencionales (Shahar et al., 2025).

De acuerdo con Chauhan & Chauhan (2024) y Salort (2025) un bioplástico puede clasificarse en:

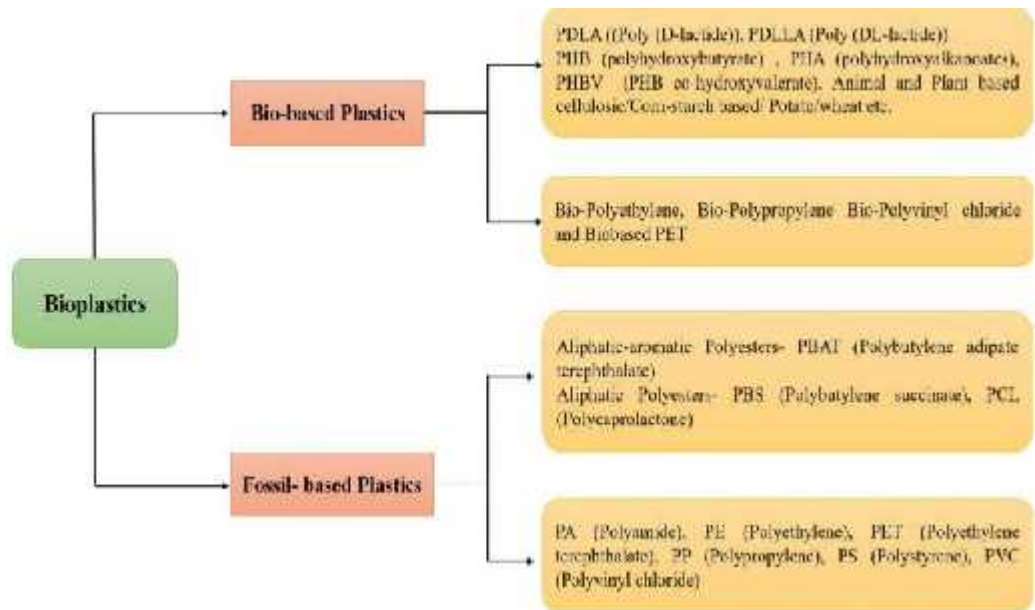
-) Biodegradable: Los bioplásticos biodegradables de origen biológico se obtienen de agro polímeros, poliésteres microbianos y compuestos animales. Se producen a partir de biomasa vegetal, residuos agrícolas y fermentación microbiana, generando CO₂ y agua al degradarse. Incluyen almidón, celulosa y fibras naturales. También se emplean proteínas animales. Destacan polímeros comerciales como ácido poliláctico (PLA), polihidroxibutirato (PHB), tereftalato de adipato de polibutileno (PBAT) y BioPBS, La biodegradación varía en rapidez y nivel según condiciones como temperatura, humedad, disponibilidad de oxígeno y la actividad de los microorganismos.
-) No biodegradable: El biopolietileno es un plástico de origen biológico obtenido a partir de etanol proveniente de cultivos como caña de azúcar, trigo o remolacha. Debido a que posee propiedades similares al polietileno convencional, se emplea en la fabricación de bioplásticos. De igual forma, el bio-PET y las poliamidas de origen biológico cumplen funciones similares. No obstante, aunque provienen de fuentes renovables, estos materiales no son biodegradables debido a las transformaciones químicas durante su producción. Estos materiales mantienen la misma estructura que

los plásticos fósiles, por lo que no se degradan, aunque disminuyen el uso de recursos no renovables.

-) Fuentes fósiles: Algunos plásticos derivados de combustibles fósiles pueden degradarse al exponerse a factores ambientales como la luz solar, el suelo y los microorganismos, transformándose en compuestos más simples. Entre ellos destacan el succinato de polibutileno (PBS), la policaprolactona (PCL), el ácido poliglicólico (PGA) y el alcohol polivinílico (PVOH), utilizados en la producción de bioplásticos; Son valorados por su capacidad de optimizar las propiedades mecánicas y facilitar el procesamiento cuando se combinan con biopolímeros renovables.

Figura 1

Categorías de materiales bioplásticos en función de su origen y su biodegradabilidad en el medio ambiente.



Fuente: Chauhan & Chauhan (2024)

2.2.2.2. Bioplásticos a base de almidón

El almidón destaca como un biopolímero con gran potencial en múltiples aplicaciones, como la fabricación de bioplásticos, gracias a su disponibilidad, carácter renovable y capacidad de degradarse naturalmente (Gamage et al, 2022); está formada por la amilosa, de estructura lineal, aporta elasticidad a los bioplásticos, mientras que la amilopectina, por su forma ramificada, regula la

resistencia y la elongación, contribuyendo a la rigidez y flexibilidad. Además, una mayor hidratación del almidón mejora propiedades como viscosidad y gelatinización (Ahsan et al., 2023; Majeed et al., 2023; Chauhan & Chauhan, 2024). Los bioplásticos pueden obtenerse con diversas propiedades al emplear distintos tipos de almidón, solos o combinados, junto con plastificantes y rellenos naturales. Generalmente, el almidón proviene de fuentes como maíz, papa, trigo o arroz y se mezcla con otros polímeros biodegradables como PLA, PBAT, PBS, PCL y PHA (Chauhan & Chauhan, 2024; Gamage et al, 2022).

Según Dutta & Sit (2024) las ventajas del almidón incluyen:

-) Renovabilidad y disponibilidad: El almidón proviene de fuentes abundantes como maíz, papa y yuca, lo que lo convierte en una materia prima sostenible.
-) Biodegradabilidad y seguridad ambiental: Los bioplásticos derivados de almidón se degradan naturalmente, reduciendo el impacto ambiental frente a plásticos convencionales.
-) Biocompatibilidad: Es apto para aplicaciones médicas y farmacéuticas debido a su compatibilidad con sistemas biológicos.
-) Potencial de refuerzo: Puede combinarse con materiales lignocelulósicos para mejorar sus propiedades y ampliar sus usos.

Algunas de las limitaciones es que para la elaboración de películas biodegradables de almidón para empaques alimentarios exige un manejo adecuado de los procesos de producción y el uso de aditivos que optimicen sus propiedades (Dutta & Sit, 2024); en cuanto a resistencia mecánica, resistencia al agua y durabilidad en diferentes entornos, factores que deben considerarse cuidadosamente para aplicaciones específicas (Temesgen et al., 2021). Los biopolímeros a base de almidón presentan limitaciones como su sensibilidad a la humedad y baja resistencia mecánica. Para mejorar sus propiedades, se emplean plastificantes que reducen las interacciones entre sus componentes, aumentando la flexibilidad, suavidad y procesabilidad. Además, la mezcla con otros compuestos permite optimizar la estabilidad, disminuir la hidrofiliidad, mejorar las propiedades de barrera y favorecer su biodegradabilidad (Gamage et al, 2022; Pástor et al., 2025).

2.2.3. Plastificantes

Son sustancias químicas utilizadas en las industrias del plástico para modificar (o mejorar) las propiedades mecánicas de los productos plásticos, se refieren a moléculas polares de bajo peso molecular agregados a los polímeros para reducir la temperatura de transición vítrea, aumentar la procesabilidad, trabajabilidad y ductilidad (Tan et al., 2022; Benitez et al., 2024); ya que son capaces de romper los enlaces intermoleculares entre las cadenas de polímeros y formar nuevos enlaces con los grupos O-H en las unidades glucosídicas de las cadenas de polisacáridos (Almeida et al., 2023); puede influir en diversas propiedades físicas del polímero, como la viscosidad, el nivel de cristalinidad, la temperatura de transición vítrea (T_g), así como su dureza y densidad. Los plastificantes son compuestos de bajo peso molecular que disminuyen las interacciones entre cadenas poliméricas, aumentando su movilidad. Esto hace que el material sea más flexible y menos rígido, mejorando su elongación y resistencia al agrietamiento, además de facilitar su procesamiento. Entre los más utilizados se encuentran el agua, el glicerol y el sorbitol (Tan et al., 2022). Los plastificantes pueden interactuar con los polímeros de forma externa o interna. En la plastificación externa no hay unión química, por lo que pueden perderse por evaporación o migración. En la interna, se integran a la cadena polimérica, evitando su pérdida. Sin embargo, los externos son los más utilizados por su facilidad de aplicación (Eslami et al., 2023).

Los plastificantes se dividen en primarios, más compatibles y usados solos, y secundarios, de menor compatibilidad. También se clasifican químicamente en ftalatos y no ftalatos. Los plastificantes se pueden agrupar en dos clases: los plastificantes a base de petróleo (ftalato de dioctilo (DOP), tereftalato de dioctilo (DOTP), ftalato de dialilo (DAP), ftalato de buytilbenceno (BBP), ftalato de dietilo (DEP), etc) y los bioplastificantes (ésteres de citrato, ácido esteárico, ácido láctico, ésteres de glicerol, ácido cítrico, ácido tartárico, etc) (Friday & Ekwere, 2023). Los bioplásticos pueden ser frágiles debido a fuertes interacciones intermoleculares que aumentan su rigidez. La incorporación de plastificantes incrementa la movilidad del almidón y reduce los enlaces de hidrógeno, mejorando la elasticidad, flexibilidad y capacidad de elongación del material (Tan et al., 2022).

2.2.3.1. Glicerol

El glicerol conocido como glicerina, un coproducto de la producción de biodiesel, representa aproximadamente el 10% del peso total líquido incoloro, inodoro, de sabor dulce y altamente viscoso. El glicerol, también conocido como propan-1,2,3-triol, es un triálcohol formado por tres átomos de carbono. Es un líquido viscoso, transparente, dulce e inodoro. El glicerol se clasifica como un disolvente polar prótico y se considera una alternativa respetuosa con el medio ambiente a los disolventes convencionales. Se caracteriza por tener un bajo perfil de riesgo, baja toxicidad y biodegradabilidad (Benitez et al., 2024). El glicerol es un poliol soluble en agua, se utiliza en alimentos, cosméticos y fármacos por su baja toxicidad. En bioplásticos, actúa como plastificante eficaz, ya que mejora la flexibilidad al formar enlaces de hidrógeno y aumentar el espacio entre cadenas poliméricas (Eslami et al., 2023). El glicerol es uno de los plastificantes más utilizados en películas de almidón debido a su alta compatibilidad con la amilosa. Esta interacción reduce las fuerzas intermoleculares y mejora las propiedades mecánicas. Su eficacia se ha comprobado en concentraciones entre 10 % y 30 % del peso del almidón (Hernando et al., 2024). El glicerol actúa como plastificante por su naturaleza hidrofílica, ya que facilita la entrada de agua en la matriz del biopolímero, mejorando su compatibilidad y flexibilidad; así mismo reduce la tensión interna y puede mejorar propiedades de barrera, como la permeabilidad al vapor de agua. Sin embargo, su cantidad debe controlarse, ya que un exceso disminuye la resistencia y vuelve el material demasiado blando o pegajoso (Sares et al., 2023; García, 2025).

2.2.3.2. Interacción glicerol–almidón

El almidón es un material biodegradable y económico con potencial para sustituir plásticos sintéticos. Al calentarse con agua, se gelatiniza y puede procesarse, pero por sí solo genera productos frágiles. Por ello, se incorpora glicerol como plastificante, el cual mejora la flexibilidad, reduce la rigidez y permite obtener bioplásticos con mejores propiedades y mayor calidad (Alonso et al., 2022).

Tabla 1*Influencia del glicerol como plastificante en bioplástico de almidón*

Bioplástico	Glicerina	Influencia	Autor
Almidón de tronco de palma aceitera (oil palm trunk starch, OPTS)	10%, 20% y 30% (p/p)	aumenta la flexibilidad y procesabilidad, pero reduce la resistencia mecánica. Forma enlaces de hidrógeno con la amilosa, disminuyendo las interacciones entre cadenas y aumentando su movilidad.	Hernando et al. (2024)
Salvado de arroz (rice bran-based bioplastic)	20%, 30% y 40% (p/p)	aumenta la flexibilidad y disminuye la resistencia. Forma enlaces de hidrógeno con la amilosa, reduciendo las interacciones entre cadenas y aumentando su movilidad	Alonso et al. (2024)
Bioplástico a base de almidón reforzado con quitosano	40% (p/p)	mejora la flexibilidad y elongación del bioplástico. Interactúa con el almidón favoreciendo la movilidad de las cadenas y su procesabilidad, contribuyendo a una estructura más flexible	Tan et al. (2022)
Almidón de cáscara de yuca + carboximetilcelulosa (CMC)	10% (p/p)	mejora la resistencia mecánica y estabilidad térmica del bioplástico. Interactúa con el almidón/CMC favoreciendo la reorganización estructural y aumentando la cristalinidad	Fauziah et al. (2025)
Almidón de cáscara de papa	1.5–3.5 mL (contenido variable)	aumenta la resistencia y elongación, pero también la absorción de agua. Interactúa con el almidón favoreciendo la	Imoisili & Jen (2021)

		flexibilidad y movilidad de las cadenas	
Pectina de cáscara de naranja + almidón de sagú	10%, 20%, 30% y 40% (p/p)	aumenta la elongación y flexibilidad, pero reduce la resistencia mecánica a mayor concentración. Interactúa con la matriz pectina-almidón incrementando la movilidad de las cadenas y la permeabilidad al vapor de agua	Al Fath et al. (2024)
Almidón de cáscara de plátano (<i>Musa acuminata</i>)	1% (óptimo)	aumenta la resistencia, solubilidad y biodegradabilidad; en exceso puede generar fragilidad.	Mamauod et al. (2024)
Almidón de papa + quitosano	0.159 – 1.8409 (wt/vol)	mejora la elongación y biodegradabilidad, contribuyendo al equilibrio de las propiedades mecánicas.	Nwaka et al. (2025)
Almidón de maíz modificado (acetilado)	1%, 3% y 5% (p/v)	incrementa la solubilidad y humedad del bioplástico. A mayor concentración, aumenta la interacción con el almidón modificado, favoreciendo la movilidad de las cadenas	Sares et al. (2023)

Fuente: elaboración propia

2.2.4. Métodos de obtención de bioplásticos

El procesamiento de biopolímeros abarca etapas como extracción, modificación y conformado para adaptar estos materiales naturales. Mediante técnicas como mezcla, impresión 3D, reticulación y pruebas de biodegradabilidad, se optimizan sus propiedades, permitiendo su uso como alternativas sostenibles a los plásticos convencionales.

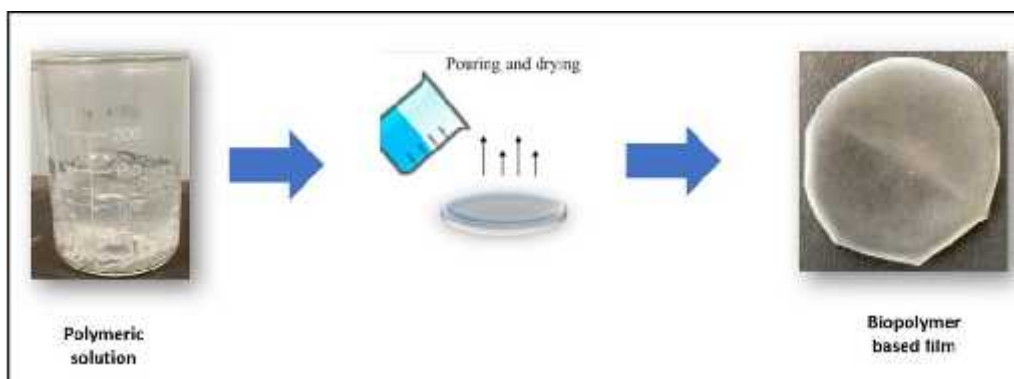
2.2.4.1. Método Casting

El moldeo por solvente, también conocido como método en solución o procesamiento húmedo, consiste en disolver un biopolímero en una mezcla acuosa u orgánica, verterla en un molde y dejar que el solvente se evapore. Durante este proceso, las cadenas poliméricas se reorganizan, formando un bioplástico sólido que puede retirarse fácilmente del molde (Wang et al., 2022). El método de fundición destaca por su simplicidad y bajo costo, ya que no requiere equipos especializados. Además, al ser un proceso húmedo, permite una mejor homogeneidad y menos defectos. Sin embargo, limita la forma del producto a estructuras simples y presenta dificultades para su aplicación a escala industrial debido al control de variables como temperatura y humedad (Flores & Vasquez, 2023).

Con respecto al proceso de elaboración de bioplásticos mediante moldeo por solvente inicia con la disolución del biopolímero en un solvente, generalmente con aplicación de calor para facilitar la mezcla. Luego, la solución se homogeniza y se vierte en un molde, controlando el volumen para definir el espesor. Posteriormente, se evapora el solvente en condiciones controladas para evitar daños estructurales. Finalmente, el bioplástico seco se retira del molde y queda listo para su uso (Dutta & Sit, 2024) como la figura 3.

Figura 2

Esquema del método casting



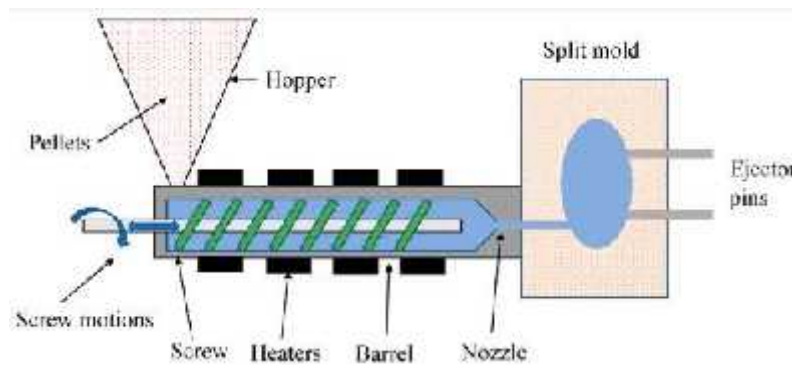
Fuente: Flores & Vasquez (2023)

2.2.4.2. Método de moldeo por inyección

El moldeo por inyección es una técnica ampliamente utilizada en la fabricación de plásticos que también se adapta a biopolímeros, promoviendo alternativas sostenibles. El proceso consiste en fundir el material, inyectarlo en un molde, aplicar presión para compactarlo y enfriarlo hasta su solidificación. Sus propiedades finales dependen de factores como temperatura, presión, velocidad y tiempos de enfriamiento. Este método permite mejorar la resistencia, flexibilidad y durabilidad de los bioplásticos. Sin embargo, requiere un control preciso de los parámetros de máquina y proceso, ya que las condiciones térmicas y mecánicas influyen directamente en el comportamiento y calidad del producto final (Flores & Vasquez, 2023; Dutta & Sit, 2024).

Figura 3

Diagrama esquemático del método de moldeo por inyección.



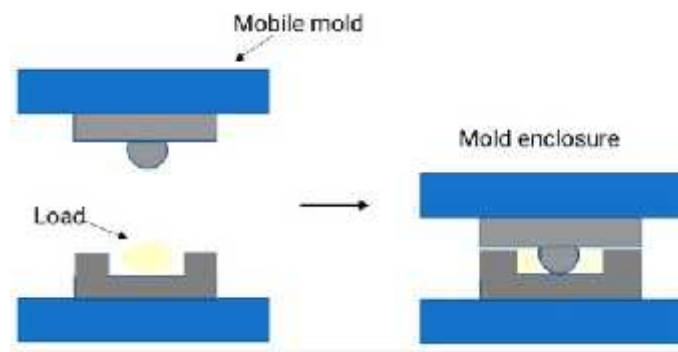
Fuente: Flores & Vasquez (2023)

2.2.4.3. Método de moldeo por compresión

El moldeo por compresión, o prensado, es una técnica utilizada en el procesamiento de biopolímeros que consiste en colocar el material entre moldes calentados, aplicando presión y calor hasta obtener la forma deseada. El proceso incluye la preparación de la carga, cierre del molde, curado y desmoldeo. Requiere un pretratamiento, como la eliminación de humedad, para asegurar la calidad del producto. Factores como temperatura, presión y tiempo influyen en las propiedades finales. Es adecuado para fabricar piezas grandes o moderadamente complejas y se aplica en diversos sectores, destacando como una alternativa sostenible para la producción de materiales (Flores & Vasquez, 2023; Dutta & Sit, 2024).

Figura 4

Esquema del proceso de moldeo por compresión.



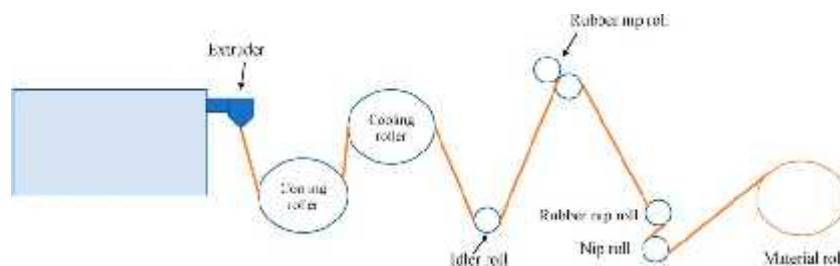
Fuente: Flores & Vasquez (2023)

2.2.4.4. Método de extrusión

La extrusión es un método ampliamente utilizado para procesar biopolímeros, donde el material se somete a compresión, mezcla y altas temperaturas hasta fundirse. Luego, se fuerza a través de una matriz para obtener formas específicas, enfriándose posteriormente. Este proceso implica cambios estructurales y químicos que afectan las propiedades del producto final. Factores como humedad, temperatura y velocidad influyen significativamente en el resultado. Es una técnica versátil que permite fabricar diversos productos y mejorar características del material, siendo aplicada en industrias como la alimentaria, farmacéutica y de polímeros, destacando por su eficiencia en la producción continua de bioplásticos (Wang et al., 2022).

Figura 5

Esquema del proceso de extrusión



Fuente: Flores & Vasquez (2023)

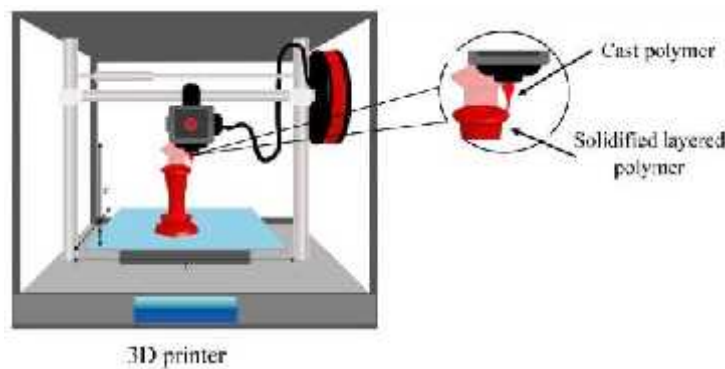
2.2.4.5. Método de impresión tridimensional

La impresión 3D aplicada a biopolímeros ha ganado relevancia, especialmente en el ámbito biomédico, al permitir la fabricación de estructuras que imitan tejidos

naturales. Este proceso consiste en depositar material capa por capa según un diseño previo, requiriendo propiedades térmicas y reológicas adecuadas. Ofrece ventajas como personalización, reducción de residuos y creación de formas complejas. Sin embargo, presenta limitaciones como altos costos, tiempos prolongados y dificultades técnicas, debido a la necesidad de materiales específicos y procesos de adaptación para su uso como “tinta” de impresión (Flores & Vasquez, 2023; Dutta & Sit, 2024).

Figura 6

Diagrama esquemático del método de impresión 3D.



Fuente: Flores & Vasquez (2023)

2.2.5. *Palta*

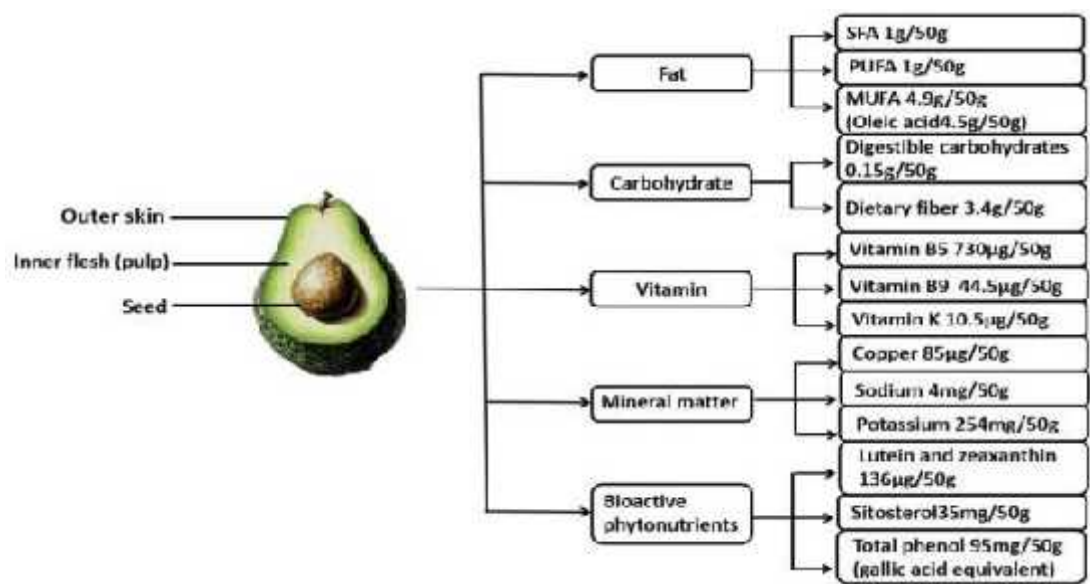
El aguacate, cuyo nombre científico es *Persea americana* Mill., es una planta dicotiledónea perteneciente a la familia Lauraceae y al género *Persea*, el cual se divide en dos subgéneros: *Persea* y *Eriodaphne*. El aguacate proviene de Centroamérica y el sur de México, donde ha sido consumido por pueblos indígenas desde hace más de 5000 años. El aguacate es una fruta climatérica que continúa madurando después de la cosecha (Lieu et al., 2024). El aguacate está compuesto por cáscara, pulpa y semilla; su parte comestible es una pulpa verde amarillenta, de textura cremosa y sabor ligeramente a nuez. Botánicamente es una baya con tejido carnoso que contiene una sola semilla, de tamaño cercano a 6 cm, con formas que varían entre redonda y periforme, y una cáscara que puede ir de verde oscuro a morado casi negro.

El aguacate destaca por su alto valor nutricional y funcional. Su pulpa es rica en ácidos grasos monoinsaturados, especialmente ácido oleico, además de fibra, vitaminas liposolubles y compuestos bioactivos. Estas características le confieren propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y beneficios para la salud cardiovascular. (Nascimento

et al., 2025; Espinoza & Oscoco, 2022). Las principales variedades de palta presentan diferencias en apariencia, sabor y uso comercial. La variedad Hass destaca por su cáscara oscura y rugosa, pulpa cremosa y alto contenido de grasas, siendo la más cultivada y exportada a nivel mundial. La variedad Fuerte tiene piel verde lisa, sabor más ligero y buena resistencia, lo que la hace popular para consumo fresco. Otras como Nabal y Ettinger se caracterizan por su pulpa suave, sabor agradable y buena adaptación al cultivo, aunque su producción es menor y se destinan principalmente a mercados específicos (Gargate & Campos, 2024).

Figura 7

Estructura y principales nutrientes del aguacate, con 50 g de aguacate Hass fresco como ejemplo. AGS: ácidos grasos saturados; AGPI: ácidos grasos poliinsaturados; AGMI: ácidos grasos monoinsaturados.



Fuente: Lin & Li (2024)

Perú es, después de México, el segundo mayor exportador de aguacates Hass a los Estados Unidos de América; En Perú, la producción de aguacate es clave para la economía y el desarrollo social. En 2023 alcanzó cerca de 599 000 toneladas, con un crecimiento del 7,6 % y generando ingresos aproximados de 963,4 millones de dólares (MIDAGRI, 2024). Aunque la pulpa y el aceite del aguacate tienen amplio uso industrial, una parte significativa del fruto se desperdicia. Tras el procesamiento, entre el 50 % y 80 % se aprovecha, mientras que el resto, como cáscara, semilla y pulpa residual, se considera desecho, representando cerca del 40 % del total (Cheikhoussef

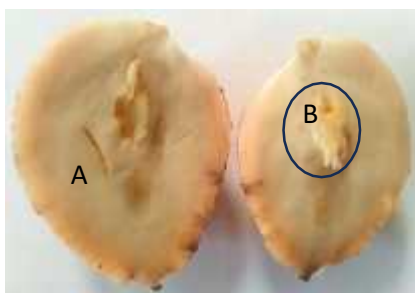
& Cheikhyyoussef, 2022), estos residuos agroindustriales pueden aprovecharse o transformarse en productos con valor comercial. Su valorización se ha convertido en un enfoque clave para promover modelos industriales sostenibles basados en la reducción o eliminación de desechos (De Dios et al., 2022).

2.2.5.1. Semilla de palta

La simiente o pepita es el cuerpo que forma parte del fruto y da creación a una nueva planta, el fruto posee una semilla grande que representa entre el 25% y el 35% de su masa total (Espinoza & Oscoco, 2022; Frasson et al., 2023). En el caso de las semillas de palta, estos residuos mayormente se dan por el sector agroindustrial generado durante la extracción de la pulpa, lo que da paso a grandes cantidades de este subproducto (De Dios et al., 2022). Las semillas, que son pequeñas y de forma esférica (redonda o cónica), generalmente tienen un color negro o café y están adheridas a la pulpa. Contienen almidón y proteínas (Machaca, 2022; Rengifo y Téllez, 2023). Los residuos de palta constituyen entre el 21% y el 30% del peso seco del fruto, de los cuales las semillas representan aproximadamente el 12% al 18%, variando según la variedad, las características y la composición química del aguacate y están constituidas principalmente por agua (~50%), almidón (hasta 29%), fibra (3%), proteína (2.5%), azúcar (2.5%) y ceniza (1.4%), entre otros componentes (Kringel et al., 2020; Espinoza & Oscoco, 2022). Castro (2020) señala que las células del parénquima en las semillas almacenan almidón, proteínas y aceites. El almidón de semilla de aguacate es una alternativa sostenible al provenir de residuos agroindustriales. Su aprovechamiento reduce el impacto ambiental y su producción a nivel industrial es viable (Tesfaye et al., 2021).

Figura 8

Morfología de la semilla de aguacate. a)cotiledones y b)embrión.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 2*Composición química de la semilla de aguacate*

Semilla de aguacate o palta	Hass	Fuerte
Humedad (g/100g)	12,24	11,97
Proteínas (g/100g)	4,43	3,34
Grasa cruda (g/100g)	2,21	1,85
Carbohidratos (g/100g)	68,97	70,51
Cenizas (g/100g)	3,65	3,25

Fuente: Borja & Goetschel (2022)

2.2.5.2. Almidón de semilla de palta

Las semillas se destacan por su alto contenido de almidón, lo que las posiciona como una prometedora fuente alternativa de este compuesto, con niveles que oscilan entre el 7,8% y el 29,3% (Macena et al., 2020). En particular, estas semillas son una fuente prometedora de biopolímeros, dando alternativas de nuevas fuentes de almidón. El análisis proximal en el almidón de estas semillas varía entre especies, e incluso dentro de la misma especie, influenciado por factores geográficos y agroclimáticos (De Dios et al., 2023). El almidón de la semilla de aguacate presenta rendimientos de 10 % a 19 %, con bajo contenido de proteínas y grasas, y alta proporción de amilosa, lo que favorece la formación de geles estables, viscosos y opacos (Martins et al ., 2022). Según Rojas (2021), este porcentaje varía entre el 60% y el 30%, dependiendo de la variedad, como es el caso de Lorena (67,60%), Fuerte (29,60%) y Hass (29,60%). Además, las semillas contienen elevados niveles de amilosa y amilopectina, con gránulos de formas triangulares y circulares, de entre 6 y 32 μm , los cuales generan geles opacos con cierto grado de sinéresis, pero con buenas propiedades espesantes y de formación de pastas viscosas a bajo costo (De Dios et al., 2022). Estas características las hacen idóneas para su uso como agente espesante y gelificante, vehículo en fármacos o materia prima en la producción de polímeros biodegradables (Navarrete et al., 2023).

Tabla 3*Composición química de almidón de semilla de aguacate*

Almidón de semilla de aguacate	Landrace	Hass
Humedad (%)	6.68 ± 0.06	6.42 ± 0.06
Proteínas (%)	5.23 ± 0.09	0.45 ± 0.02
Lípidos (%)	2.42 ± 0.11	0.23 ± 0.08
Ceniza (%)	2.40 ± 0.23	0.06 ± 0.00
Rendimiento (%)	46.86 ± 2.09	35.47 ± 1.97

Fuente: De Dios et al. (2022)

2.2.5.3. Contenido de amilosa y amilopectina en almidón de palta

La proporción de amilosa y amilopectina en el almidón influye en sus propiedades fisicoquímicas; un mayor contenido de amilopectina incrementa la capacidad de hinchamiento y mejora la elasticidad (Sánchez et al., 2022). Por otro lado, Martins et al. (2022) señalan que el contenido de amilosa favorece en la elaboración de películas, debido a que sus estructuras se reorganizan mejor durante el proceso de secado, lo que las hace más adecuadas para el desarrollo de recubrimientos. La amilosa, además, influye en varios factores como el hinchamiento, la solubilidad y la capacidad de gelificación del almidón.

Tabla 4*Contenido de amilosa y amilopectina en almidón de semilla de palta*

Variedad	Contenido de amilosa	Contenido de amilopectina	Autor
Hass y criolla (landrace)	42.25 – 48.20	51.80 – 57.75*	(De Dios-Ávila et al., 2022)
Hass	22.34 ± 0.04 (nativo) / 29.85 ± 0.04 (acetilado)	77.66 ± 0.04 (nativo) / 70.15 ± 0.04 (acetilado)	(Navarrete et al., 2023)
No especificada	17 ± 0.03	83.2 ± 0.11	(Alemu et al., 2022)

Variedad	Contenido de amilosa	Contenido de amilopectina	Autor
No especificada	39.56	60.44	(Martins et al., 2022)
Hass, Pinkerton, Reed, Zutano, Re Xuan, Re You (8 cultivares)	35.34 – 48.19	51.81 – 64.66*	(Wang et al., 2022)
No especificada	32.54 (con solución alcalina) / 33.44 (sin solución alcalina)	40.08 (con solución alcalina) / 33.86 (sin solución alcalina)	(Indarti et al., 2022)
No especificada	21.45 ± 0.12	78.55 ± 0.12	(Sharma et al., 2022)
No especificada	31,4	68,6	(Muñoz et al., 2024)
Hass y Bacon (semilla de palta)	33,67	66,33	(Yildirim et al., 2026)
Fortuna y Hass	41.95 – 49,47	58,05 – 50,53	(Frasson et al., 2023)
No especifica	22,34	77,66	(Sánchez et al., 2022)
Hass	38,69	61.31	(Machaca,2022)

Fuente: Elaboración propia

El contenido de amilosa en el almidón de semilla de palta (17–49.47%) influye directamente en la formación de bioplásticos. Altos niveles de amilosa favorecen materiales más rígidos, resistentes y con mayor capacidad de formación de película, mientras que la amilopectina (50–83%) contribuye a obtener bioplásticos más flexibles y homogéneos.

Por ello, la variabilidad en la relación amilosa/amilopectina permite ajustar las propiedades del bioplástico según la aplicación deseada.

2.2.6. Almidón

El almidón es un polímero de glucosa formado principalmente por amilosa y amilopectina, que se organiza en gránulos cuyas características dependen de su origen botánico. El almidón es un polvo blanco, fino y sin sabor producido por las plantas verdes. Tiene una estructura granular, es de naturaleza orgánica e insoluble en agua fría, alcohol y otros solventes. Su fórmula química es $(C_6H_{11}O_5)_n$ (Chauhan & Chauhan, 2024). Es un recurso biodegradable, económico y ampliamente presente en cereales, legumbres y tubérculos. En su estado nativo, destaca por su versatilidad, ya que se utiliza como espesante, gelificante, encapsulante y en la elaboración de películas biodegradables. No obstante, su aplicación es limitada debido a propiedades como baja solubilidad, inestabilidad térmica, tendencia a la retrogradación, baja resistencia al congelamiento-descongelamiento y sinéresis, por lo que se recurre a diversas modificaciones para mejorar su funcionalidad y ampliar sus usos (Navarrete et al., 2023); existen tres tipos de almidón: A, B y C. El tipo A presenta una estructura compacta con cadenas cortas de amilopectina, típica de los cereales. El tipo B es menos denso, con cadenas más largas y mayor presencia de agua entre sus estructuras, común en papa y plátano. Por su parte, el tipo C combina características de los tipos A y B, con una estructura intermedia presente en leguminosas como guisantes y judías (Trejo et al., 2024).

2.2.6.1. Estructura del almidón

La amilosa constituye aproximadamente entre el 20% y 30% del almidón y se caracteriza por tener una estructura lineal formada por cadenas de glucosa unidas mediante enlaces α -(1-4). En cambio, la amilopectina, que representa entre el 65% y 85%, posee una estructura ramificada, con enlaces α -(1-4) en sus cadenas principales y enlaces α -(1-6) en los puntos de ramificación. (Días & Acuña, 2022).

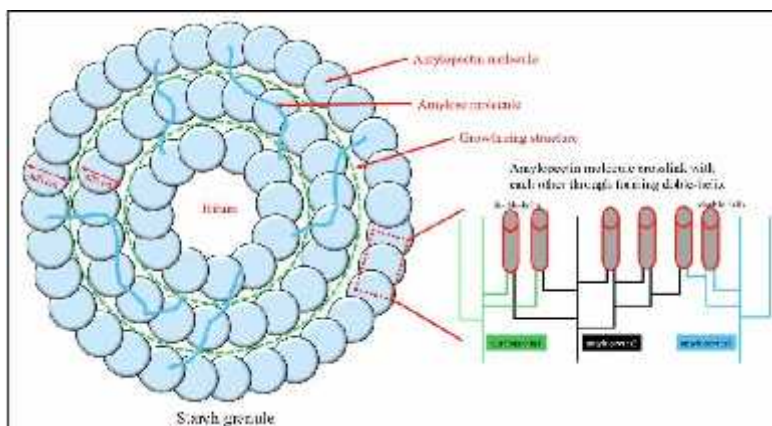
Los gránulos de almidón presentan una estructura con una capa externa delgada (alrededor de 1 μ m) y más densa, mientras que el interior es más hueco y con poca adherencia. Esta diferencia estructural permite que los gránulos mantengan mejor su forma original cuando son sometidos a fuerzas externas.

Dentro del gránulo, las moléculas de amilosa se distribuyen atravesando varios anillos de crecimiento. Un mayor contenido de amilosa se asocia con un aumento

en la temperatura de gelatinización, ya que estas moléculas pueden interactuar y entrelazarse con la amilopectina de distintos anillos, actuando como enlaces que refuerzan la estructura. En consecuencia, la amilosa limita la expansión de los gránulos y contribuye a la estabilidad interna del almidón.

Figura 9

La estructura del gránulo de almidón



Fuente: Zhiguang et al. (2025)

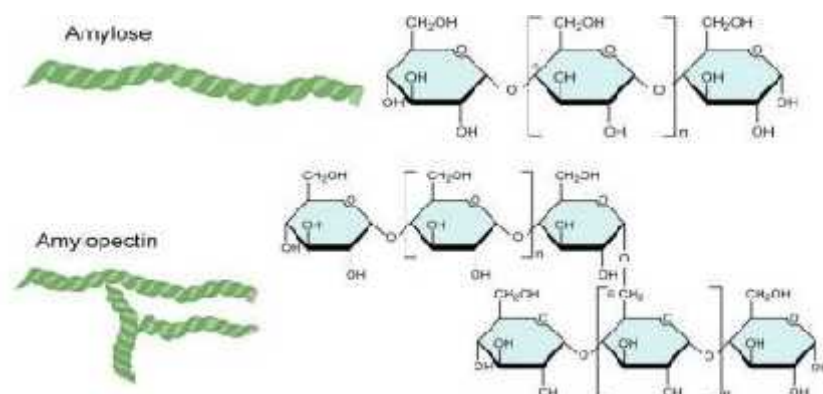
2.2.6.2. Amilosa y amilopectina

La amilopectina es un polisacárido altamente ramificado que constituye entre el 65 % y 85 % del almidón. Su estructura no se conoce completamente, pero se acepta que está organizada en “clústeres”, donde las cadenas laterales forman doble hélices. Estas estructuras son responsables de las propiedades fisicoquímicas y cristalinas del almidón (Nakamura & Kainuma, 2022).

La amilosa es el segundo componente principal del almidón (20–30 %) y se caracteriza por ser una molécula lineal o ligeramente ramificada, con un alto grado de polimerización que varía según su origen. Presenta alta pureza y forma estructuras helicoidales que pueden cristalizar en distintos tipos, lo que influye en su estabilidad y comportamiento. Además, su composición y estructura varían entre especies vegetales, afectando las propiedades funcionales del almidón (Wang et al., 2024).

Figura 10

Estructura de la amilosa y la amilopectina en el almidón.



Fuente: Tan et al. (2022)

La composición y estructura del almidón varían según factores como la nutrición, el ambiente y la genética de la planta. Componentes como lípidos y cadenas largas de amilopectina limitan la absorción de agua, mientras que una mayor proporción de amilopectina con cadenas cortas favorece la hidratación y la formación de geles, aunque estos pueden retrogradarse con el tiempo. Además, los gránulos más pequeños absorben agua más rápido, aumentando su hinchamiento, viscosidad y gelatinización. En este contexto, la amilopectina aporta estabilidad estructural, mientras que la amilosa contribuye a la flexibilidad, siendo importante en la elaboración de bioplásticos (Majeed et al., 2023); así mismo lo menciona Chauhan & Chauhan (2024) que la amilopectina, debido a su estructura ramificada, influye en la resistencia y la capacidad de elongación, mientras que la amilosa lineal aporta la elasticidad, siendo fundamental en la formación de bioplásticos.

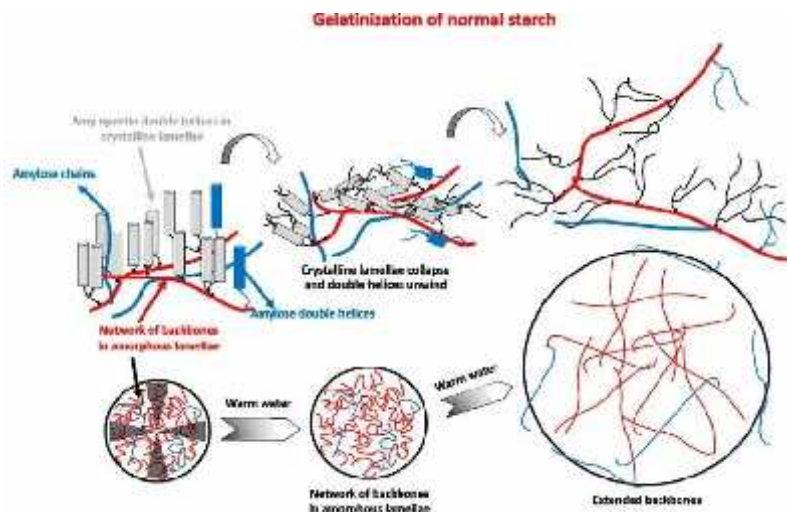
2.2.6.3. Gelatinización del almidón

El calentamiento del almidón en presencia de agua produce gelatinización, la cual se acompaña de la ruptura de los gránulos, la pérdida de la estructura ordenada y la pérdida de la birrefringencia óptica (Sethi et al., 2022). La gelatinización del almidón es un proceso en el que los gránulos absorben agua, se hinchan y pierden su estructura cristalina, liberando amilosa y aumentando la viscosidad. Este fenómeno ocurre principalmente con calor y agua, aunque también puede inducirse mediante métodos químicos o mecánicos (Yan et al., 2024). La gelatinización del

almidón ocurre al calentarlo entre 60 y 70 °C en presencia de abundante agua, lo que provoca el hinchamiento y ruptura de los gránulos. Este proceso sucede en dos etapas: primero, la absorción de agua rompe los enlaces de hidrógeno, separando la amilosa y la amilopectina y reduciendo la estructura cristalina; luego, la amilosa se libera hacia el medio. La cantidad de agua influye en el proceso: con poca agua la gelatinización es incompleta, mientras que con exceso se produce una mayor hinchazón. Además, la proporción de amilosa y amilopectina afecta la temperatura de gelatinización y las propiedades finales de la pasta (Lacerda et al., 2024).

Figura 11

Esquema del mecanismo de gelatinización del almidón normal durante el calentamiento en un exceso de agua a 99 °C.



Fuente: Zhong et al. (2023)

La gelatinización del almidón implica la ruptura de su estructura semicristalina debido a factores como alta temperatura, presión, cizallamiento y la presencia de agua. Este proceso depende de condiciones específicas de procesamiento, siendo la temperatura un factor clave. Dentro del gránulo, la zona interna es menos compacta y más sensible al calor, mientras que la parte externa es más organizada y resistente. Además, un mayor contenido de amilosa incrementa la temperatura de gelatinización, ya que contribuye a estabilizar la estructura y evita su desintegración durante el calentamiento (Zhong et al., 2023).

En los bioplásticos, el almidón actúa como matriz, mientras que el plastificante y el relleno mejoran su flexibilidad y resistencia. Su formación se basa en la gelatinización, donde el almidón absorbe agua, se hincha, pierde su estructura cristalina y libera amilosa, formando un gel estable. Durante este proceso, el aumento de temperatura permite la entrada de agua, la ruptura de enlaces de hidrógeno y la disolución parcial del almidón. Luego, el plastificante sustituye las interacciones entre moléculas de almidón, haciendo el material más elástico, mientras que el relleno refuerza la estructura y mejora sus propiedades mecánicas (Tan et al., 2022).

2.2.6.4. Extracción húmeda de almidón

La molienda húmeda tradicional permite obtener almidón con alta pureza (hasta 99,5 %), mientras que los métodos enzimáticos conservan mejor su estructura, lo que resulta importante para aplicaciones farmacéuticas; la extracción de almidón por vía húmeda varía según el tipo de tubérculo o raíz, pero generalmente incluye etapas como limpieza, pelado, corte y filtración del material triturado para obtener una suspensión de almidón. Luego, esta se deja reposar para separar el sobrenadante, se recupera el almidón húmedo, se seca y finalmente se muele hasta obtener un polvo listo para su almacenamiento y análisis. (Rashwa et al., 2024; Dorantes et al., 2024). De acuerdo con Avellán et al. (2020) y Ahmed et al. (2024) el método húmedo consiste en:

-) Preparación de la materia prima: Selección de tubérculos sanos, maduros y de buen tamaño para maximizar el rendimiento; luego lavado, pelado (opcional) y corte.
-) Extracción y separación del almidón: Trituración con agua para formar una suspensión; uso de suficiente agua y, en algunos casos, agentes químicos para evitar degradación; posterior filtración y sedimentación.
-) Purificación: Lavados sucesivos y decantación para eliminar fibras e impurezas, mejorando la pureza del almidón.
-) Secado: Reducción de humedad ($\leq 20\%$) mediante métodos como aire, horno (30–40 °C), tambor o aspersión, controlando temperatura y tiempo para evitar daños en sus propiedades.

J Rendimiento: Determinación del porcentaje de almidón obtenido en función del peso inicial, considerando eficiencias de extracción.

El método de extracción determina en gran medida la calidad del almidón, ya que influye en su pureza, rendimiento, estructura y propiedades funcionales. La molienda húmeda suele obtener almidón más puro que la seca, mientras que la extracción alcalina aumenta el rendimiento al degradar componentes estructurales. En cambio, la extracción enzimática conserva mejor la estructura original del almidón y sus propiedades térmicas (Rashwa et al., 2024) El proceso de extracción puede modificar la relación amilosa/amilopectina y la estructura del almidón, afectando sus propiedades de gelatinización. Además, fuerzas mecánicas pueden dañar los gránulos y alterar su tamaño. También influye en el color y la transparencia, obteniéndose almidones más claros con métodos más refinados. La elección del método depende de la materia prima y del equilibrio entre rendimiento, pureza y funcionalidad (Punia et al., 2022).

2.2.7. Residuos del café (*Coffea arabica* L.)

El café constituye uno de los productos agrícolas con mayor relevancia económica y comercial a nivel mundial. La producción global se concentra principalmente en **Coffea arabica** L. y **Coffea canephora** Pierre, especies que representan aproximadamente el 60 % y 40 % del mercado internacional, respectivamente (Tran et al., 2022). La cadena productiva del café incluye el procesamiento primario para la obtención del grano verde en los países productores, seguido por etapas como tostado, molienda y preparación de la bebida en los países consumidores (Oliveira et al., 2021). Sin embargo, una proporción reducida del fruto termina siendo aprovechada como producto final, mientras que la mayor parte corresponde a residuos y subproductos agroindustriales (Iriondo-DeHond et al., 2020).

El procesamiento del café puede desarrollarse mediante beneficio húmedo o seco. En el método húmedo, utilizado principalmente para **Coffea arabica**, la eliminación de la pulpa genera uno de los residuos más abundantes, alcanzando aproximadamente una tonelada de pulpa por cada dos toneladas de café procesado (Dos Santos et al., 2024). Posteriormente se generan otros subproductos como mucílago y pergamino. Por otro lado, en el beneficio seco, aplicado con mayor frecuencia en **Coffea canephora**, se

obtiene la cascarilla o cáscara de café, formada por tejidos externos deshidratados del fruto (Tran et al., 2022; Vivas et al., 2025). Además, durante el tostado se produce la película plateada y después de la preparación de la bebida se genera la borra o posos de café.

La acumulación inadecuada de estos residuos representa un problema ambiental debido a su potencial contaminante cuando son depositados sin tratamiento (Tran et al., 2022). No obstante, su composición rica en proteínas, carbohidratos estructurales, polifenoles, taninos y cafeína evidencia su potencial como materia prima valorizable para aplicaciones industriales (Iriondo-DeHond et al., 2020; Oliveira et al., 2021).

Figura 12

Residuos de plantas, cerezas y procesamiento de café



Fuente: Rojas-Orduña et al. (2023)

2.2.7.1. Tipos de residuos de la industria cafetera

De acuerdo con Iriondo-DeHond et al. (2020) y Oliveira et al. (2021), los subproductos del café pueden clasificarse según la capa del fruto de la que proceden y la etapa del procesamiento en la que se generan:

-) Cascarilla o cáscara (husk/cascara): fracción externa seca del fruto, compuesta por piel, pulpa y mucílago residual, característica del beneficio seco. Presenta un elevado contenido de fibra, cercano al 70 %, del cual aproximadamente 17.86 % corresponde a lignina, además de

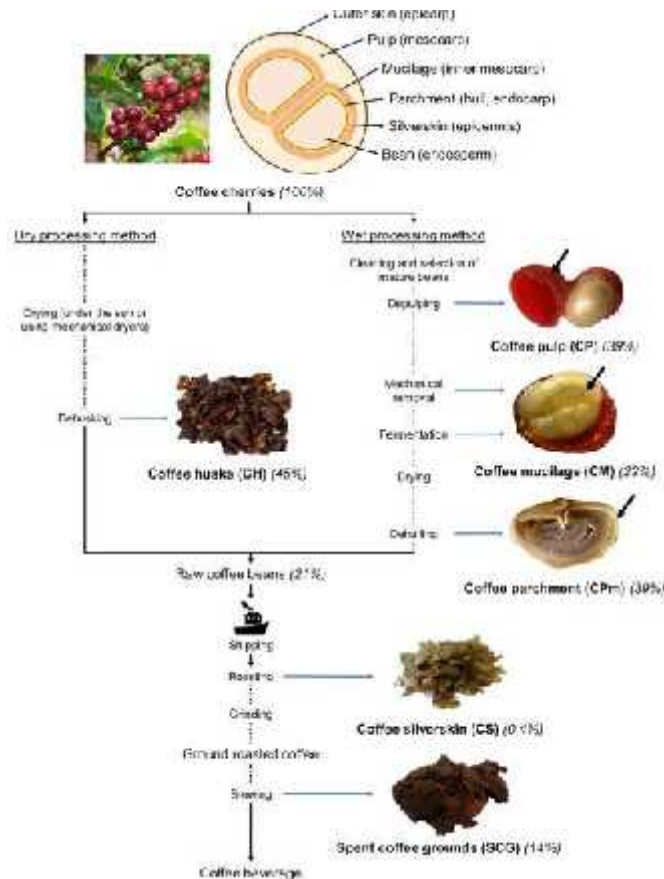
micronutrientes como potasio, calcio, fósforo y magnesio (Vivas et al., 2025).

-) Pulpa (mesocarpio): tejido carnosos separado mecánicamente durante el despulpado húmedo; constituye hasta el 40 % del peso de la cereza fresca (Tran et al., 2022) y es rica en azúcares, pectinas, taninos, cafeína y compuestos fenólicos.
-) Mucílago: capa mucilaginosos y altamente hidratada, rica en azúcares fermentables, que envuelve al pergamino y se retira mediante fermentación o desmucilaginado mecánico durante el beneficio húmedo.
-) Pergamino (parchment): endocarpio córneo que protege al grano y queda como residuo tras el trillado.
-) Película plateada (silverskin): tegumento delgado adherido al grano verde, subproducto característico del proceso de tueste.
-) Borra o posos de café (spent coffee grounds, SCG): residuo sólido remanente tras la extracción acuosa del café tostado y molido para la preparación de la bebida.

Cada una de estas fracciones difiere en su composición fisicoquímica y, en consecuencia, en sus posibilidades de aprovechamiento, aunque todas comparten una matriz lignocelulósica común celulosa, hemicelulosa y lignina junto con compuestos fenólicos, minerales y, en algunos casos, pigmentos como los carotenoides (Van Nguyen et al., 2023; Rojas-Orduña et al., 2023).

Figura 13

Representación esquemática de la estructura de la cereza de café y de los subproductos derivados del procesamiento del café. Los porcentajes se refieren a la cantidad de cada subproducto obtenido a partir de cerezas de café frescas.



Fuente: Oliveira et al. (2021)

2.2.7.2. Composición química

Los residuos de café presentan una composición química caracterizada por la presencia predominante de componentes lignocelulósicos, principalmente celulosa, hemicelulosa y lignina, lo que los convierte en una fuente potencial de biomasa renovable para aplicaciones sostenibles. La fracción fibrosa constituye uno de los componentes más importantes, con valores que varían según el tipo de residuo, variedad del café, condiciones de cultivo y métodos de procesamiento.

El análisis proximal de los residuos cafeteros muestra variaciones importantes asociadas al origen del material, especie cultivada, condiciones agroclimáticas y tratamientos aplicados durante su transformación. En relación con la humedad, los

estudios reportan valores entre 5,50 % y 11,29 %, lo que refleja la influencia del proceso de secado sobre la estabilidad del residuo (Cangussu et al., 2021; Vivas et al., 2025). Asimismo, el contenido de proteínas presenta diferencias entre investigaciones, con valores cercanos al 8–10 %, atribuibles a factores como la variedad del café y las condiciones ambientales de producción (Vivas et al., 2025). Los residuos cafeteros presentan además bajos contenidos de lípidos, generalmente inferiores al 3 %, debido a que la mayor proporción de compuestos grasos se encuentra localizada en el grano y no en los tejidos externos del fruto (Rodríguez-Quiroz et al., 2023). Por otro lado, el contenido de cenizas, asociado a la presencia de minerales como potasio, calcio, fósforo y magnesio, puede variar aproximadamente entre 5 % y 8 %, dependiendo de la composición mineral del residuo (Cangussu et al., 2021). En conjunto, la composición proximal de los residuos de café evidencia su carácter lignocelulósico y su potencial como fuente de fibras naturales y compuestos funcionales. Estas características favorecen su valorización en la obtención de biopolímeros, materiales biodegradables y otras aplicaciones industriales dentro del enfoque de economía circular.

Tabla 5
Composición químico - proximal de la cáscara de café (Coffe arabica L) (g/100g)

Componente	Rodríguez- Quiroz et al. (2023)	Vivas et al. (2025)	Cangussu et al. (2021)
Humedad (%)	8,32 ± 1,04	11.29	5.50
Proteínas (%)	-	8.31	10.03
Lípidos (%)	2,87 ± 0,93	1.26	-
Ceniza (%)	7,83 ± 1,08	7.86	5.20
Fibra (%)	18,07 ± 1,13	70.00	65.83
Carbohidratos (%)	-	17.56	-

La cascarilla de café constituye un residuo lignocelulósico con alto potencial de aprovechamiento debido a su composición química. Diversos estudios reportan contenidos de celulosa entre 26 % y 39 %, hemicelulosa de 12 % a 15 % y lignina de 17 % a 27 % en base seca (Van Nguyen et al., 2023; Zeleke et al., 2022). En este

sentido, Van Nguyen et al. (2023) identificaron valores de 39.2 % de celulosa, 12.6 % de hemicelulosa, aproximadamente 26 % de lignina total, además de extractivos (8.7 %) y cenizas (9.5 %), junto con minerales como potasio, calcio, magnesio, aluminio, hierro, titanio, azufre y silicio. Asimismo, Vivas et al. (2025) reportaron que cascarillas de café colombianas presentan cerca del 70 % de fibra, con 17.86 % de lignina y presencia de minerales como potasio, calcio, fósforo y magnesio.

Por otro lado, la pulpa de café también destaca como fuente de componentes lignocelulósicos. Rodríguez-Quiroz et al. (2023) evidenciaron que el contenido de celulosa puede incrementarse desde 26.06 % hasta 64.7 % mediante tratamientos alcalinos, blanqueamiento e hidrólisis ácida, debido a la eliminación progresiva de lignina y hemicelulosa. De manera similar, Villar et al. (2026) determinaron que la pulpa húmeda libre de extractivos contiene 35.4 % de carbohidratos estructurales, distribuidos en 20.4 % de celulosa y 15.0 % de hemicelulosa, además de 27.0 % de lignina. Además de su fracción estructural, la pulpa de café contiene compuestos bioactivos como fenoles, flavonoides, taninos y cafeína. Dos Santos et al. (2024) reportaron concentraciones de fenoles totales de hasta 79.53 mg equivalentes de ácido gálico/g y actividad antioxidante superior al 81 % mediante DPPH en extractos de *Coffea arabica* y *Coffea canephora*. Asimismo, Rojas-Orduña et al. (2023) identificaron la presencia de carotenoides, principalmente luteína y sus ésteres, con mayor concentración en pulpa amarilla de café variedad Caturra.

Tabla 6
Componentes de celulosa y lignina de pulpa de café.

Componentes		Cantidad en %	
Lignina	24.3	11.51	18.29
Celulosa	52.9	12.55	26.06
Hemicelulosa	12.5	23.57	20.92
Referencia	Zelege et al. (2022)	Rizkiansyah et al. (2023)	Rodríguez- Quiroz et al. (2023)

La composición lignocelulósica de los residuos de café presenta una variabilidad considerable entre estudios, principalmente debido al tipo de residuo evaluado

(pulpa o cascarilla), la especie de *Coffea*, las condiciones de cultivo y el método de caracterización empleado. No obstante, todos los autores coinciden en que la celulosa constituye el componente mayoritario, seguida por la lignina y la hemicelulosa, confirmando que estos residuos representan una fuente importante de biomasa lignocelulósica con potencial para la obtención de fibras naturales, nanocelulosa y materiales biodegradables.

2.2.7.3. Aprovechamiento en biomateriales

Los residuos generados por la industria cafetera han adquirido relevancia como fuentes renovables para el desarrollo de envases biodegradables y activos, debido a su composición rica en polisacáridos y compuestos biofuncionales dentro del enfoque de economía circular. Oliveira et al. (2021) destacan que subproductos como pulpa, mucílago, pergamino, cascarilla, película plateada y borra de café pueden emplearse como componentes estructurales o agentes funcionales en materiales poliméricos, aportando propiedades como actividad antioxidante y antimicrobiana, reducción de permeabilidad gaseosa, mayor hidrofobicidad y mejoras en el desempeño mecánico.

En este contexto, Rizal et al. (2023) evaluaron la incorporación de residuos de café en películas biopoliméricas comestibles elaboradas con alga roja (*Kappaphycus alvarezii*) mediante la técnica de vertido en solvente. La adición de partículas de café, con tamaños entre 1.106 y 1.281 μm y potencial zeta de -27.0 mV , favoreció la resistencia al agua y mejoró las propiedades mecánicas del material, alcanzando una resistencia a la tracción de 35.47 MPa con una incorporación del 4 % de polvo de café, evidenciando su potencial para aplicaciones en empaques alimentarios.

Asimismo, Reichembach et al. (2024) estudiaron la recuperación de pectinas provenientes de residuos cafeteros para la elaboración de películas pectina-quitosano. La pectina obtenida del agua residual presentó 49 % de ácido urónico, además de compuestos fenólicos y proteínas, mientras que la pectina extraída de la pulpa mediante hidrólisis ácida mostró mejores propiedades reológicas y viscoelásticas para la formación de películas. De forma complementaria, Muñiz-Márquez y colaboradores resaltan que los residuos del café representan una fuente

potencial de biopolímeros y compuestos funcionales destinados a biopelículas alimentarias sostenibles.

Además, Islam et al. (2026) demostraron que la incorporación de refuerzos lignocelulósicos y compuestos bioactivos provenientes de residuos agroindustriales puede mejorar las propiedades de barrera, antioxidantes y antimicrobianas de películas basadas en PLA y almidón, tendencia aplicable al aprovechamiento futuro de residuos cafeteros.

2.2.8. *Propiedades de bioplásticos*

2.2.8.1. Propiedades físicas

) Las propiedades físicas de los bioplásticos comprenden las características que determinan su comportamiento durante el procesamiento, almacenamiento y uso, sin alterar su composición química. Entre las más importantes se encuentran el espesor, la densidad, la transparencia, la opacidad, el contenido de humedad, la solubilidad en agua y la permeabilidad al vapor de agua, las cuales influyen directamente en la funcionalidad y desempeño del material, especialmente en aplicaciones de empaque de alimentos. Estas propiedades dependen de factores como el tipo de biopolímero, la concentración de plastificantes, la incorporación de agentes de refuerzo y las condiciones de procesamiento, afectando la resistencia, estabilidad y capacidad de protección del producto envasado (Ranote et al., 2024).

2.2.8.2. Propiedades mecánicas

) El ensayo de tracción es uno de los métodos más utilizados para evaluar las propiedades mecánicas de materiales poliméricos, debido a su sencillez y facilidad de interpretación. Consiste en aplicar una fuerza de estiramiento controlada sobre la muestra hasta provocar su fractura, obteniéndose la curva esfuerzo-deformación. A partir de esta curva se determinan parámetros como la resistencia a la tracción, que corresponde al máximo esfuerzo que el material soporta antes de romperse; el módulo de Young, que expresa la rigidez del material; y la elongación a la rotura, que representa la capacidad del material para deformarse antes de la fractura (Boey et al., 2022).

2.2.8.3. Propiedades química y térmica

-) La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) es una técnica analítica ampliamente empleada para identificar compuestos y caracterizar la composición química de materiales en diferentes estados físicos, como sólidos, líquidos, polvos, pastas, películas y gases. Esta técnica genera un espectro característico o "huella molecular" a partir de la absorción de radiación infrarroja por los enlaces químicos presentes en la muestra. En el espectro FTIR, los enlaces simples absorben en la región de $2500\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$, los enlaces triples entre 2000 y 2500 cm^{-1} , y los enlaces dobles en el intervalo de $1500\text{--}2000\text{ cm}^{-1}$, lo que permite identificar los grupos funcionales y evaluar cambios en la estructura química de los materiales. Debido a su precisión y versatilidad, esta técnica ha adquirido gran importancia en la investigación y en la industria alimentaria (Ahmad & Ayub, 2022; Tkachenko & Niedzielski, 2022).
-) El análisis termogravimétrico (TGA) es una técnica de análisis térmico ampliamente utilizada para evaluar la estabilidad térmica de los materiales mediante el registro de la variación de su masa conforme aumenta la temperatura. Este ensayo permite identificar las etapas de degradación, evaporación o descomposición de una muestra durante el calentamiento. Generalmente, analiza cantidades de material que oscilan entre 1 mg y varios gramos, sometidas a un programa de calentamiento que puede alcanzar hasta $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ bajo una atmósfera controlada. Debido a su precisión, el TGA se emplea en la caracterización de nuevos materiales, estudios cinéticos, desarrollo de polímeros y evaluación de la estabilidad térmica de diversos productos (Tsioptsias, 2022; Liu et al., 2022).

III. MATERIALES Y METODOLOGÍA

3.1. Lugares de ejecución:

El trabajo de investigación se ejecutó en los laboratorios de:

- Universidad Nacional del Santa:
 - Laboratorio de Análisis y Composición de Productos Agroindustriales
 - Laboratorio de Microbiología y Toxicología de Alimentos
 - Instituto de Investigación Tecnológico Agroindustrial (IITA)
 - Laboratorio de control y calidad
 - Laboratorio de nutrición y toxicología
 - Planta Piloto Agroindustrial
- Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas
 - Laboratorio de Fisiología Vegetal
- Universidad Nacional de Trujillo
 - Laboratorio de Ingeniería de Procesos Agroindustriales
- Universidad Nacional José María Arguedas
 - Laboratorio de Investigación en Control y Análisis de Aguas

3.2. Materiales e instrumentos

3.2.1. *Materias primas*

-) Palta Fuerte (Semilla de palta) 30 kg
-) Café Catimor (Cascara-pulpa de café) 5 kg

3.2.2. *Insumos*

-) Glicerina 99.5% 1kg
-) Agua destilada

3.2.3. *Reactivos*

-) Yodo
-) Gel sílice
-) Ácido sulfúrico 72%
-) Ácido acético 1M

-) Éter de petróleo al 99% grado cromatográfico
-) Gas carrier Helio, Hidrogeno y Aire.
-) Hidróxido de sodio 1M
-) Etanol 99%
-) Acetona al 99%
-) Etanol al 70%
-) Metanol
-) Ácido acético 1M
-) Ácido sulfúrico 1M
-) DPPH (2,2-difenil-1-picril hidrazilo)
-) Trolox
-) Solución de Proteasa
-) Solución de Amiloglucosidasa
-) Solución de $\alpha - \alpha$
-) Fenolftaleína

3.2.4. *Materiales de laboratorio*

-) Jarras milimetradas (500 ml, 1L y 5L)
-) Probetas (10 ml, 50 ml)
-) Pipetas graduadas (1 ml, 5 ml, 10 ml)
-) Vasos de precipitado (250 ml, 500 ml)
-) Desecador de vidrio
-) Balde de plástico graduado (5 y 10L)
-) Crisoles
-) Termómetro
-) Placas Petri
-) Coladores
-) Tubos centrifuga
-) Bolsas ziploc
-) Papel filtro
-) Papel aluminio
-) Papel toalla

-) Molde de aluminio
-) Tubos de ensayo
-) Copas de permeabilidad Elcometer
-) Acrílicos 10 x20 cm
-) Micropipeta Bitlab
-) Silica gel
-) Bolsas estériles
-) Campana de desecación

3.2.5. Equipos

-) Estufa, marca BIOBASE, modelo BOV-VF
-) Balanza analítica, marca OHAUS modelo PX323
-) Balanza Analítica Denver. Modelo AA-200.Serie 6022063.
-) Molino, marca RETSCH, modelo ZM 200
-) Estufa de secado: Marca POL-EKO-APARATURA, modelo SLW 115STD
-) Mufla Protherm: Modelo FE-360U.Serie 22050159.Turquia
-) Destilador de agua Fistreem. Modelo A74410.
-) Analizador termogravimétrico TGA-550 (TA Instruments, USA)
-) Texturómetro CT-3, Brookfield Engineering Laboratories, USA
-) Espectrómetro FTIR Nicolet iS50 (Thermo Scientific, Alemania)
-) Equipo Dumas LECO. Modelo CHN 6283C.
-) Equipo Soxhlet FOSS. Modelo Basic Unit 2043.
-) Tamizador de acero inoxidable Cormac. Modelo AS 500 Basic.
-) Determinador de Fibra FOSS. Modelo Fibertec TM 1023.
-) Vortex Kynnel. Modelo M10101002.
-) Estufa de convección manual (POL-EKO-APARATURA, modelo SLW 115STD)
-) Centrifuga Sigma. Modelo 4-16 KS
-) Licuadora comercial - LAR-08MB marca Skymsem
-) Refrigeradora SAMSUNG. Modelo RT46K6631BS.Serie 021344.
-) Espectrofotómetro Jasco. Modelo V-670. Serie AO19961154.Japon
-) Cocina eléctrica (Marca: IMACO, Modelo: HP 1000)

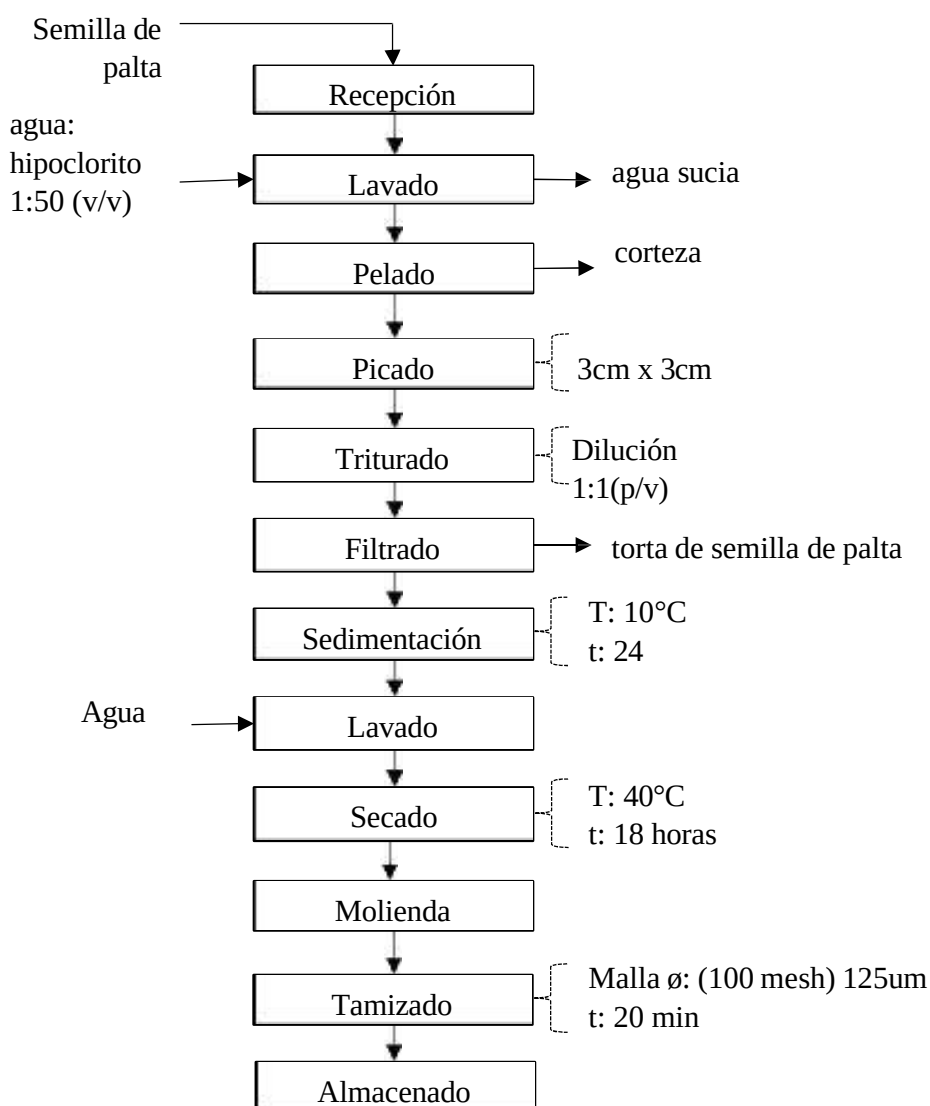
-) Agitador magnético con calefacción DLAB. Modelo MS-H280-PRO
-) Micrómetro digital Dasqua. Modelo KJ51503.
-) Baño María de temperatura constante IKA. Modelo HB 10
-) Molino de mano
-) Brixometro BS. Modelo OPTi. Serie RFM IP65. U.K.
-) Phmetro HANNA. Modelo H12211. Serie 92011234. China

3.3. Método

3.3.1. Obtención del almidón de semilla de palta

Figura 14

Diagrama de flujo del proceso de extracción húmeda de almidón de la semilla de palta.



Siguiendo la metodología de Jiménez et al. (2022) con modificaciones para la extracción de almidón por el método húmedo con sedimentación natural, describimos el procedimiento realizado como se presenta en la figura 14.

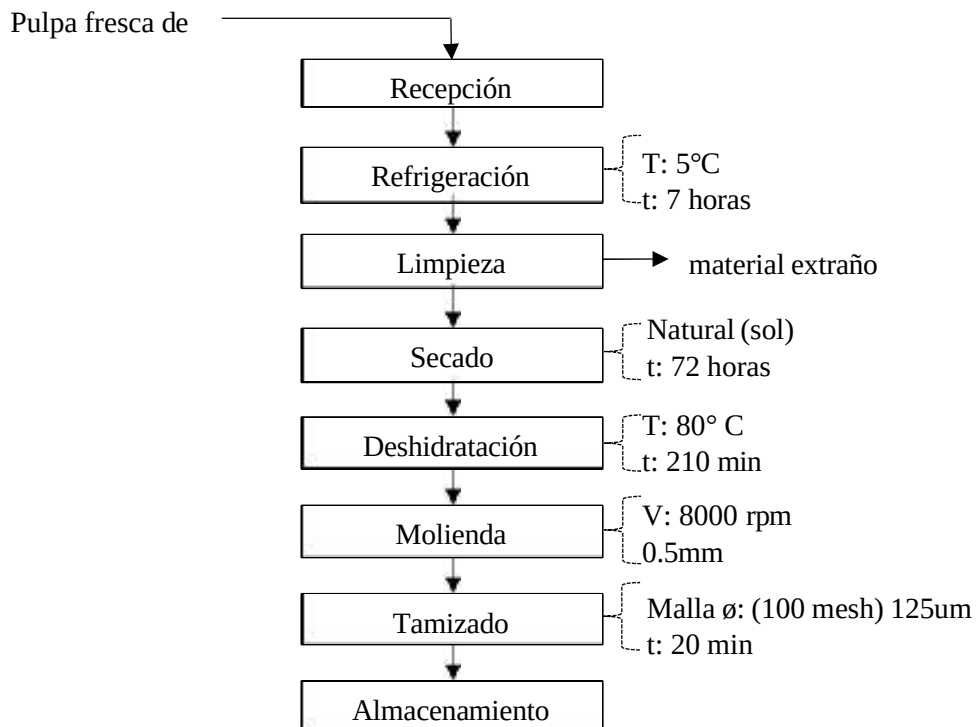
1. Recepción de la materia prima: Se adquirirá materia prima fresca que cumplirá los requisitos para garantizar un producto final de alta calidad; libre de cualquier cuerpo extraño que no formará parte de la semilla.
2. Lavado: Se eliminarán los sólidos presentes, en este caso parte de la pulpa de palta, con abundante agua; para la desinfección se utilizará una solución de NaClO de 1:50 (v/v) durante 15 min.
3. Pelado: La cascarilla o corteza de la semilla será desprendida por fricción durante el proceso de lavado; las que no logren desprenderse serán peladas con un pelador.
4. Picado: Se realiza para romper las paredes celulares y liberar los gránulos de almidón presentes en la semilla de palta, se cortarán en cubos pequeños de 3 cm x 3 cm para facilitar el proceso de molienda.
5. Triturado: La semilla de palta picada se mezclará con agua en proporción 1:1 (p/v). Esta mezcla se verterá en una licuadora de alimentos (licuadora comercial - LAR-08MB marca Skymsem) para reducir su tamaño y formar una masa pastosa homogénea.
6. Filtrado: Después de obtener la masa pastosa, esta se hará pasar por un filtro que separará el material fibroso de la lechada de almidón. Se realizarán lavados adicionales para optimizar el rendimiento.
7. Sedimentación: El almidón se sedimentará en un recipiente, permitiendo su separación del líquido sobrenadante. Este proceso de reposo se llevará a cabo durante aproximadamente 24 horas a 10°C.
8. Lavado: Se decantará por medio de inclinación del recipiente, así se retirará el sobrenadante y se lavará la materia precipitada con agua para lograr un almidón más blanco y evitar que se queden restos de fibra.
9. Secado: Se decantará el sobrenadante del lavado para deshidratar el almidón húmedo obtenido durante las etapas anteriores por medio de la exposición al calor; para lo cual se colocará en una estufa de convección manual (POL-EKO-APARATURA, modelo SLW 115STD) y se secará a 40°C por 48 horas.

10. Molienda: Después de obtener el almidón seco, se molerá empleando un mortero cerámico para facilitar el tamizado.
11. Tamizado: La muestra molida se pasará por un tamizador (FRITSCH, modelo ANALYSETTE 3 PRO) con una malla de acero inoxidable N°100 (125 μ m).
12. Almacenado: El almidón resultante del tamizado se envasará en bolsas tipo ziploc y se almacenará en campanas de desecación.

3.3.2. Obtención de harina de residuos de café

Figura 15

Diagrama de flujo del proceso de obtención de harina de residuos de café



Siguiendo la metodología de Clara et al. (2025) con modificaciones para la obtención de harina de pulpa de café, describimos el procedimiento realizado como se muestra en la figura 15.

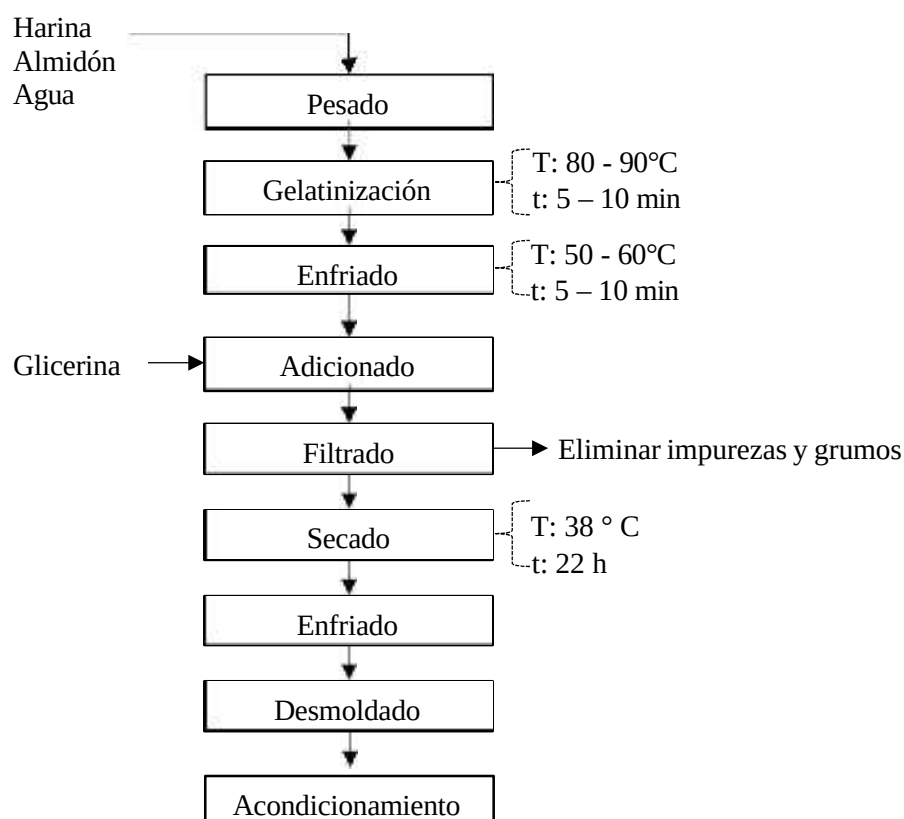
1. Recepción de la materia prima: La pulpa de café que saldrá directamente de la despulpadora se recolectará en cubetas de plástico limpias y se transportará en carro.
2. Refrigeración: Se mantendrá en refrigeración a una temperatura de 5°C, ya que estará lejos del centro de proceso para evitar fermentación.

3. Limpieza: Se pesará y se eliminarán los sólidos presentes, en este caso parte de granos de café, bayas y hojas.
4. Secado: Se realizará un secado natural expuesto al sol durante 3 días para facilitar su transporte al centro de proceso.
5. Deshidratación: Para llegar a una humedad requerida de <10%, se colocará en una estufa de convección manual (POL-EKO-APARATURA, modelo SLW 115STD) y se secará a 80°C por 210 minutos.
6. Molienda: Después de obtener la pulpa de café seca, se molerá empleando un molino Retsch ZM200 con una velocidad de 8000 rpm para reducir volumen y peso y obtener harina con 0.5 mm de diámetro.
7. Tamizado: La muestra molida se pasará por un tamizador (FRITSCH, modelo ANALYSETTE 3 PRO) con una malla de acero inoxidable N°100 (125 µm).
8. Almacenado: La harina de residuos de café resultante del tamizado se envasará en bolsas tipo ziploc y se almacenará en campanas de desecación.

3.3.3. Obtención de bioplástico

Figura 16

Diagrama de operación de la elaboración de un bioplástico por el método casting.



Siguiendo la metodología Siguiendo la metodología de Machaca (2022) con modificaciones para la obtención de un bioplástico por el método casting, describimos el procedimiento realizado como se muestra en la figura 16.

1. Pesado: En esta etapa, se pesarán los ingredientes principales: harina de residuos de café, almidón de semillas de palta y agua.
2. Gelatinización: La mezcla de harina de café, almidón de palta y agua se calentará a una temperatura de 80-90°C durante 5-10 minutos.
3. Enfriado: Después del calentamiento, la mezcla se enfriará a una temperatura de 50-60°C durante 5-10 minutos.
4. Adicionado: Una vez que la mezcla llegue a la temperatura, se le añadirá el glicerol, con una agitación constante.
5. Filtrado: Posteriormente, la mezcla se filtrará para eliminar impurezas, especialmente grumos que desfavorezcan la aceptabilidad del bioplástico.
6. Secado: La mezcla filtrada se colocará en un molde de 10 x 5 cm y se secará en una estufa a una temperatura de 40°C durante 18 horas.
7. Enfriado: Al retirar la muestra de la estufa, se dejará enfriar en una campana de desecación.
8. Desmoldado: Una vez enfriada la muestra, se procederá a desmoldarla, obteniendo así un bioplástico.
9. Acondicionamiento: El bioplástico obtenido se colocará en una campana para evitar que gane humedad.

3.4. Diseño de la investigación

El presente proyecto de investigación tiene un enfoque experimental, según el grado de profundidad correlacional y explicativa, según la complejidad integrativo, debido a que se manipularan las variables independientes (almidón de semilla de palta (*Persea americana*), harina de residuos de café (*Coffe arabica L.*) y glicerina) y se medirá el efecto de estas en las variables independientes características físicas (espesor (mm), opacidad (%), solubilidad (%), permeabilidad al vapor de agua (%)) y características mecánicas (tracción (Mpa), elasticidad (%), módulo de Young (Mpa); todo ello mediante un diseño factorial multinivel ya que cada variable independiente tiene distintos niveles siendo un total de 12 tratamientos con 3 repeticiones para determinar que formulación debería considerarse más

adecuada para evaluar fisicoquímicamente su aplicación como material de empaque para la conservación de uvas.

3.4.1. Población y muestra

3.4.1.1. Población

En esta investigación se tomará como población dos muestras residuales, las semillas de paltas descartadas en la cosecha obtenidos de la ciudad de Moro y cascará de café obtenidas durante el proceso de despulpado del grano de cereza obtenidos en la ciudad de Chanchamayo (La Merced).

3.4.1.2. Muestra

El muestreo fue no probabilístico ya que las muestras fueron escogidas por conveniencia de acuerdo a las restricciones establecidas de cada uno de los componentes, para la investigación se trabajó con 10 kg de semillas de palta de la variedad Fuerte seleccionadas aleatoriamente recolectadas de una chacra de cultivo de palta en la ciudad de Moro y 5 kg de cascara de café de la variedad Catimor seleccionadas aleatoriamente recolectados de una chacra de cultivo de cereza ubicada en la Ciudad de Chanchamayo (La Merced). Muestras residuales procesadas para la obtención de almidón de las semillas de la palta y harina de los residuos de café, se caracterizaron de acuerdo a normas establecidas.

3.4.2. Operacionalización de variables

Tabla 7

Variables operacionales

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones e indicador	Escala de medición
Independientes	Almidón de semilla de palta El almidón de semilla de <i>Persea americana</i> es una fuente renovable no convencional de polisacáridos con potencial para la elaboración de bioplásticos, debido a su contenido de amilosa y amilopectina (Martins et al., 2022).	El almidón será extraído mediante el método de vía húmeda y caracterizado por su composición fisicoquímica, contenido de amilosa, amilopectina y temperatura de gelatinización, para su incorporación en la formulación del bioplástico.	Composición del almidón J Análisis proximal (%) J Composición de amilosa y amilopectina (%) J Gelatinización (°C)	Razón
	Harina de residuos de café Producto con nutrientes esenciales como carbohidratos, fibra y proteína. Tiene bajo contenido de grasa y cafeína, con alta capacidad antioxidante. Su sabor y olor es afrutado y ácido. Su color es marrón oscuro. (Villar, 2026)	La harina será obtenida mediante secado y molienda de los residuos de café, y caracterizada mediante análisis proximal, contenido de celulosa, lignina y actividad antioxidante antes de incorporarse a la formulación del bioplástico.	Composición de la harina J Análisis proximal (%) J Celulosa y lignina (%) J Actividad antioxidante (μmol Trolox/g)	Razón

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones e indicador	Escala de medición	
Dependientes	Propiedades físicas describen las características del bioplástico relacionadas con su comportamiento dimensional, óptico y de interacción con el agua, determinando su aptitud como material de empaque (Ranote et al., 2024).	Se determinarán mediante ensayos de espesor, opacidad y solubilidad para evaluar el desempeño físico del bioplástico.	Características físicas J Espesor (mm) J Opacidad (%) J Solubilidad (%)	Razón	
	Propiedad química del bioplástico	Las propiedades químicas corresponden a la composición molecular y a los grupos funcionales que caracterizan la estructura del bioplástico (Ahmad & Ayub, 2022).	Se evaluarán mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), identificando los grupos funcionales presentes en el material.	Característica química J Espectro de absorción en función del número de onda (cm ⁻¹)	Razón
	Propiedad térmica del bioplástico	Las propiedades térmicas describen la estabilidad del bioplástico frente a cambios de temperatura y su comportamiento durante la degradación térmica. (Liu et al., 2022)	Se determinarán mediante análisis termogravimétrico (TGA), evaluando la temperatura de degradación y la pérdida de masa del material.	Estabilidad térmica J Análisis gravimétrico según temperatura (°C) y pérdida de masa (%).	Razón
	Propiedades mecánicas del bioplástico	Las propiedades mecánicas describen la resistencia y capacidad de deformación del bioplástico frente a esfuerzos mecánicos (Boey et al., 2022).	Se determinarán mediante ensayos de tracción, evaluando la resistencia a la tracción, la elongación y el módulo de Young.	Resistencia mecánica J Resistencia a tracción (Mpa) J Elasticidad (%) J Módulo de Young (Mpa)	Razón

3.4.3. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

3.4.3.1. Caracterización de semilla de palta

- **Humedad**

Este análisis se lleva a cabo siguiendo el método estándar 950.46 A.O.A.C. (2005), que consiste en colocar de 2 a 5 g de muestra en una estufa a 105°C durante 3 horas, hasta alcanzar un peso constante. Luego, se registrará el peso final. Este procedimiento se repetirá tres veces. Aplicando la siguiente formula:

$$H \quad (\%) = \frac{p_i - p_f}{p_i} \times 100$$

- **Composición de amilosa y amilopectina**

El contenido de amilosa se cuantificó de acuerdo con la metodología descrita por Williams et al. (1958). Para ello, se pesaron 0.10 g de muestra en un matraz aforado de 100 cm³, a los que se adicionaron 1 cm³ de etanol al 99 % y 9 cm³ de NaOH 1 M. La mezcla se homogenizó y se calentó en baño María a ebullición durante 10 min con el fin de promover la gelatinización del almidón. Una vez enfriada, la solución se llevó a volumen con agua destilada y se agitó. Posteriormente, se tomó una alícuota de 5 cm³, la cual se transfirió a un matraz aforado de 100 cm³, adicionando 1.0 cm³ de ácido acético 1 M y 2.0 cm³ de solución de yodo (0.2 g de I₂ y 2.0 g de KI disueltos en 100 cm³). Finalmente, se completó el volumen con agua destilada y se determinó la absorbancia a 620 nm mediante un espectrofotómetro, utilizando un blanco para la corrección de la lectura. Se calculó mediante la ecuación:

$$\text{Amilosa (\%)} = 3.06 \times \text{absorbancia} \times 20$$

$$\text{Amilopectina (\%)} = 100 - \text{Amilosa (\%)}.$$

- **Gelatinización**

La temperatura de gelatinización se determinó siguiendo la metodología descrita por Jiménez et al. (2022), basada en la técnica propuesta por Grace (1977). Para ello, se pesaron 10 g de almidón, los cuales se suspendieron en agua destilada hasta completar un volumen de 100 mL. Posteriormente, se calentó agua en un vaso de precipitados de 250 mL hasta alcanzar 85 °C. De la suspensión preparada se tomaron 50 mL, que se transfirieron a un vaso de

precipitados de 100 mL y se colocaron en el baño de agua caliente. La mezcla se agitó continuamente hasta la formación de una pasta homogénea y la estabilización de la temperatura, momento en el que se registró la temperatura de gelatinización utilizando un termómetro.

3.4.3.2. Caracterización de harina de residuos de café

▪ **Humedad**

Este análisis se llevó a cabo siguiendo el método estándar 950.46 A.O.A.C. (2005), que consiste en colocar de 2 a 5 g de muestra en una estufa a 105°C durante 3 horas, hasta alcanzar un peso constante. Luego, se registrará el peso final. Este procedimiento se repetirá tres veces. Aplicando la siguiente formula:

$$H (\%) = \frac{p_i - p_f}{p_i} \times 100$$

▪ **Proteínas**

La determinación del contenido de proteína se llevó a cabo mediante el método de Dumas, conforme a lo establecido en la norma AOAC 990.03 (AOAC, 2005). Para ello, se pesó entre 0.5 y 1 g de muestra de almidón, la cual fue colocada en un tubo de combustión. Posteriormente, la muestra fue sometida a altas temperaturas (alrededor de 900 °C), provocando su combustión y la conversión del nitrógeno presente en óxidos de nitrógeno, los cuales luego fueron reducidos a nitrógeno molecular. La cuantificación del nitrógeno se realizó mediante un detector de conductividad térmica (DCT). Finalmente, el contenido de proteína se calculó aplicando un factor de conversión de 6.25 al nitrógeno total obtenido.

▪ **Grasa**

Según el método AOAC 920.39 (2005), el contenido de grasa se determina extrayendo la grasa del material seco utilizando una fracción de éter de petróleo en un extractor Soxhlet. Posteriormente, se pesaron aproximadamente 3 g de muestra de almidón, los cuales fueron envueltos en papel filtro y colocados en el cuerpo del extractor. A continuación, se añadió éter de petróleo como solvente, permitiendo que el proceso de extracción se llevara a cabo mediante ciclos continuos de evaporación, condensación y

sifoneo. Este proceso tuvo una duración aproximada de 3 horas. Una vez finalizada la extracción, el matraz fue retirado y colocado en una estufa a 60 °C para evaporar el solvente residual, obteniéndose la fracción grasa.

$$\% G = \frac{W_3 - W_2}{W_1} * 100$$

Donde:

W₁: peso de la muestra inicial sin desecación (g)

W₂: peso del matraz sin grasa

W₃: peso del matraz con grasa

■ **Cenizas**

Para determinar el contenido de cenizas en una harina, se utiliza un método de calcinación en el que la muestra se incinera a una alta temperatura para eliminar la materia orgánica, dejando únicamente los minerales inorgánicos (cenizas). El método estándar más comúnmente utilizado es el método AOAC 923.03. (2005). Se pesa una cantidad entre 2 a 5 gr en un crisol, se registra el peso, posteriormente se coloca el crisol con la muestra en un horno de mufla a 600°C durante 4 horas, la muestra tendrá un color blanco grisáceo uniforme.

$$C (\%) = \frac{(c_i + c_{i+1}) - (c_v)}{p \cdot i \cdot d \cdot l \cdot m}$$

■ **Contenido de fibra**

La determinación de la fibra dietética total se realizó mediante el método enzimático-gravimétrico descrito en la AOAC 985.29 (1995), basado en el procedimiento de Prosky et al. (1988). Para ello, se pesó aproximadamente 1 g de muestra de almidón en un matraz. Posteriormente, la muestra fue sometida a incubación con α-amilasa, con el objetivo de gelatinizar y licuar los almidones presentes. Luego, se añadió proteasa para eliminar las proteínas y amiloglucosidasa para hidrolizar los oligosacáridos. A continuación, se incorporó etanol al 95% para precipitar la fracción soluble de la fibra dietética. El precipitado obtenido fue filtrado utilizando crisoles con filtros de vidrio, y posteriormente lavado con etanol y acetona. El residuo se secó a una temperatura controlada hasta alcanzar peso constante. Finalmente, los crisoles con el residuo fueron colocados en un horno a 105

°C, enfriados en un desecador y pesados, con el fin de determinar el contenido de fibra dietética total.

$$F d t_i (\%) = \frac{p d r_i s_i - p d r_i i_i}{p d m i_i} \times 100$$

▪ **Carbohidratos**

Los carbohidratos se calculan restando del 100% la suma de los demás componentes, utilizando la siguiente ecuación:

$$\%C = 100 - (\%Humedad + \%Proteínas + \%Grasa + \%Cenizas + \%Fibra).$$

▪ **Contenido de celulosa y lignina:**

La determinación del contenido de celulosa y lignina se llevó a cabo siguiendo la metodología de Chesson-Datta (Clara et al., 2025). Para ello, se mezcló 1 g de muestra seca (a) con 120 mL de agua destilada y se calentó a 100 °C durante 1 hora en baño María. Posteriormente, la mezcla se filtró utilizando una tela filtrante para recuperar el residuo, el cual fue escurrido y pesado (b). Luego, dicho residuo se trató con una solución de H₂SO₄ 0,5 M durante 1 hora, se filtró nuevamente y se secó para obtener el peso correspondiente (c). A continuación, el material seco se sometió a hidrólisis con 10 mL de H₂SO₄ al 72 % durante 4 horas; después se filtró y secó, registrándose el peso del residuo resultante (d). Finalmente, el residuo fue incinerado hasta obtener cenizas y se determinó su peso (e). Los porcentajes de celulosa y lignina se calcularon mediante las ecuaciones correspondientes.

$$c_i (\%) = \frac{c - d}{a} * 100\%$$

$$li (\%) = \frac{d - e}{a} * 100$$

▪ **Actividad antioxidante**

El método DPPH desarrollado por Brand-Williams et al. (1995) siguiendo la metodología descrita por De Lima Silva et al. (2021). Para ello, se preparó una solución de DPPH (1 mM) en metanol, la cual fue posteriormente ajustada empleando metanol absoluto. Para el análisis, se colocaron en una microplaca la curva de calibración, el blanco y las muestras del extracto, adicionando 10 µL de cada uno por triplicado. La mezcla se dejó incubar

durante 30 minutos en condiciones de oscuridad. Finalizado este tiempo, se registraron las absorbancias a una longitud de onda de 515 nm mediante un espectrofotómetro UV-Visible. En el caso del control, el extracto fue sustituido por 10 µL de metanol. Finalmente, el porcentaje de inhibición de la actividad antioxidante se determinó utilizando la siguiente fórmula:

$$C \quad A \quad (%) = \left[1 - \frac{A2 - A3}{A1} \right] \times 100$$

Donde:

A1= Absorbancia del patrón de referencia

A2= Absorbancia de la muestra

A3= Absorbancia del blanco de muestra

Para elaborar la curva de calibración se utilizó Trolox como patrón de referencia, empleando concentraciones comprendidas entre 5 y 500 µM. La solución madre (1 mM) se preparó mediante la disolución de 12.5 mg de Trolox en 50 mL de metanol. A partir de esta solución se realizaron las diluciones correspondientes para obtener los diferentes niveles de concentración requeridos en la construcción de la curva de calibración. Esta curva se empleó para cuantificar la capacidad antioxidante de los extractos, expresando los resultados como equivalentes de Trolox. La curva de calibración obtenida se presenta en el Anexo 16.

3.4.3.3. Evaluación de propiedades físicas de bioplástico

▪ Espesor

Se cortaron muestras de 50 × 50 mm de cada formulación y el espesor se determinó mediante un micrómetro digital, efectuando seis mediciones en puntos aleatorios de cada muestra para calcular el espesor promedio. Este procedimiento se realizó de acuerdo con las recomendaciones para la medición del espesor de películas plásticas descritas en la norma ASTM F2251-13(2023)

▪ Opacidad

De acuerdo con un método ligeramente modificado del ASTM D1746 -23, se realiza una prueba estándar para evaluar la transparencia de las láminas de bioplástico a una longitud de onda de 560 nm. Se corta tiras rectangulares de

las láminas con las dimensiones adecuadas para la celda (0.8 x 3 mm) y se coloca en una celda dentro del espectrofotómetro. Se toma una lectura de referencia en blanco utilizando una celda vacía. Cada bioplástico se evalúa tres veces a las longitudes de onda establecidas. La opacidad del bioplástico se calcula usando la ecuación proporcionada (Ranote et al., 2024).

$$O(\%) = \frac{A_{560n}}{X}$$

Donde, A560 es la absorbancia a 560 nm, respectivamente, y 'X' es el espesor del bioplástico en mm.

- **Solubilidad**

La solubilidad en agua de las películas se evaluó siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM D570, con modificaciones propuestas por Shafqat et al. (2021). Se utilizaron muestras de bioplástico con un área aproximada de 1.5 cm², las cuales se secaron inicialmente en una estufa a 85 °C durante 24 h para obtener su peso seco inicial (W₁). Posteriormente, cada muestra se sumergió en 50 mL de agua destilada a temperatura ambiente durante 24 h. Transcurrido este periodo, el material insoluble se recuperó mediante filtración, se secó nuevamente a 85 °C durante 24 h y se registró su peso final (W₂). El porcentaje de solubilidad se calculó a partir de la diferencia entre el peso inicial y el peso final del bioplástico, expresándose mediante la ecuación correspondiente.

$$\%S = \left(\frac{W_1 - W_2}{W_1} \right) * 100$$

- **Permeabilidad de vapor de agua (PVA)**

Según el método desecante ASTM E96, que utiliza gel de sílice activado a 105°C durante 24 horas, se deben llenar tres cuartas partes de las copas de permeabilidad (25 cm²) con el gel de sílice (desecante). El bioplástico se corta según las dimensiones del marco del vaso, se coloca en la boca de la copa y se sella herméticamente. Las copas se colocan luego en un desecador con una humedad relativa de 48% - 52%, donde se coloca una solución saturada de cloruro de sodio o agua en el fondo. El desecador se mantiene a

una temperatura de 20°C - 30°C, y las muestras se pesan durante un período de 7 horas consecutivas (Songtipya et al., 2020).

$$P = \frac{Q * l}{A * \Delta P}$$

Dónde:

Q= es la pérdida de peso por unidad de tiempo (t)

l= es el espesor de la película (mm)

A= es el área de transferencia (m)

ΔP = es el gradiente de presión de vapor de agua de vapor de agua 3167 kPa a 25°C) generado por el agua destilada y el gel de sílice a 25 °C.

3.4.3.4. Evaluación de propiedad química de bioplástico

- **Espectrofotometría Infrarroja por Transformada de Fourier - FTIR**

Las muestras de tamaño 1cm x 1cm se analizaron en un espectrómetro FTIR Nicolet iS50 (Thermo Scientific, Alemania) mediante el accesorio ATRMiracle diamante de 3 rebotes, en un intervalo de 600 a 4000 cm^{-1} con una resolución de 4 cm^{-1} y empleando 16 barridos (Ranote et al., 2024).

3.4.3.5. Evaluación de propiedad térmica de bioplástico

- **Análisis termogravimétrico (TGA)**

Para el análisis TGA en materiales poliméricos, se realiza mediante un analizador termogravimétrico TGA-550 (TA Instruments, USA) mediante una atmósfera nitrogenada (50mL/min), con una rampa de calentamiento 10°C/min, el peso de la muestra fue entre 10 mg y con una temperatura inicial de 20 hasta 600°C. (Matos y Diaz, 2022).

3.4.3.6. Evaluación de propiedades mecánicas de bioplástico

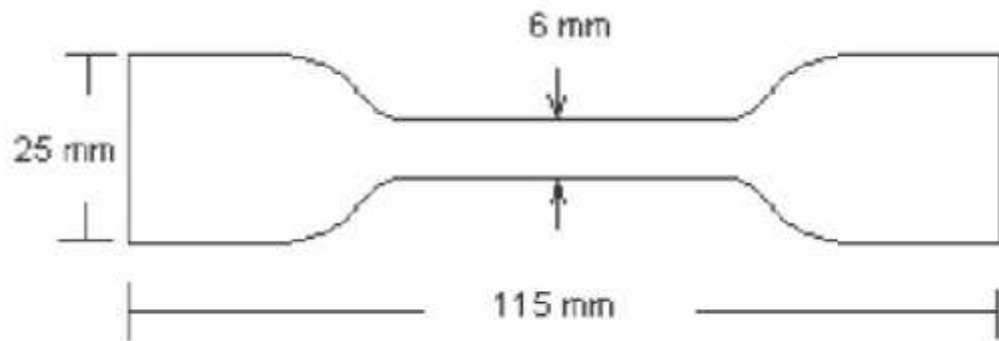
La prueba mecánica de tracción de las películas se realizó en un texturómetro TA. XT Plus (TA Instruments), utilizando el software del equipo “Texture Expert”, versión 1.22. Los análisis se realizaron por triplicado. La tensión y la elongación a la rotura en el ensayo de 45 tracción se determinaron según la norma ASTM D882-09 (ASTM, 2018). Los bioplásticos fueron cortados según se muestra en la Figura 17 y sometidas a tracción con una velocidad de 1,0 mm/s, comenzando desde una separación inicial de 115 mm hasta la rotura del bioplástico. La tensión a la rotura y la elongación a la rotura se obtuvieron directamente de la curva de tensión en

función de la elongación, conociendo las dimensiones iniciales de los cuerpos de prueba. El módulo de elasticidad, o módulo de Young, se determinó a partir de la pendiente de la región lineal de la curva. De acuerdo con las dimensiones de la probeta fueron :

- Ancho de los extremos: 25 mm.
- Ancho de la zona central útil: 6 mm (según cada muestra).
- Longitud total de la probeta: 115 mm.

Figura 17

Esquema del cuerpo de prueba para el ensayo de tracción



$$\sigma = \left(\frac{F_{m\acute{a}x}}{A} \right)$$

Donde:

σ = tensión a la rotura (MPa)

$F_{m\acute{a}x}$ = fuerza máxima antes de la rotura (N)

A = área transversal inicial (mm²) (b x e)

b = ancho de la zona útil de la probeta (mm)

e = espesor de la película (mm)

$$\epsilon = \left(\frac{L_f - L_0}{L_0} \right) * 100$$

Donde:

ϵ = elongación a la rotura (%)

L_0 = longitud inicial entre mordazas (mm)

L_f = longitud al momento de la rotura (mm)

ΔL = incremento de longitud (mm)

$$M \quad d \quad y \quad E = \left(\frac{L_0}{A} \right) * \left(\frac{\Delta F}{\Delta L} \right)$$

Donde:

E = módulo de Young (MPa)

L_0 = longitud inicial entre mordazas (mm)

A = área transversal = ancho $\times$ espesor (mm²)

$\Delta F/\Delta L$ = pendiente de la región lineal de la curva **Fuerza vs. Distancia** (N/mm)

3.4.3.7. Caracterización fisicoquímica de la uva conservada con el bioplástico

) Acidez titulable (%)

De acuerdo con el método AOAC 942.15 (2005), se extrajo el jugo de trozos de uva, se filtró, y luego se pesaron 5 gramos del jugo. Este se disolvió en 50 ml de agua destilada en un matraz Erlenmeyer, añadiendo 3 gotas de fenolftaleína. Se realizó una titulación rápida con NaOH 0.1N y se determinó el porcentaje de acidez utilizando el volumen de titulante consumido, según la fórmula proporcionada.

$$\%A = \frac{N * V * m}{W} * 100$$

N: normalidad de la solución de NaOH (0.1N)

V: mililitros de NaOH utilizados en la titulación

Meq: peso en miliequivalentes del ácido predominante (ácido tartárico = 0.075)

W: peso de la muestra (ml)

) pH

Se determinó mediante el método potenciométrico, conforme al AOAC 981.12 (2005). Se extrajo el jugo de uva triturando los trozos, se filtró, y se pesaron 50 gramos del jugo. El pH se midió utilizando un potenciómetro digital a 25°C, sumergiendo el electrodo en el jugo de uva, después de calibrar el dispositivo con soluciones buffer de pH 4 y 7.

) **Sólidos solubles totales (°Brix)**

Según el método AOAC 932.12 (2005), se aplicaron tres gotas de la muestra en la zona de medición del refractómetro. Se realizaron lecturas repetidas hasta obtener lecturas consistentes, y se calculó el valor promedio. Los resultados se reportaron en grados °Brix.

3.4.4. Diseño experimental

A través del diseño experimental se pretende analizar la respuesta de una o más variables dependientes a partir del efecto de diversos factores. Para la elaboración del bioplástico, se empleará un diseño factorial $2 \times 3 \times 2$, considerando tres variables independientes: almidón de semilla de palta (5,5–7,5%), harina de residuos de café (2–6%) y glicerina (1,6–2%).

Se utilizó el software estadístico Statgraphics Centurión para definir 12 tratamientos experimentales, cada uno con 3 réplicas, sumando un total de 36 unidades distribuidas aleatoriamente. Este enfoque permitirá evaluar la influencia de las variables independientes en las propiedades del bioplástico, con el objetivo de determinar su viabilidad en el envasado de uvas. Los factores considerados en el diseño se presentan en la tabla correspondiente.

Tabla 8

Rango de concentración de las tres variables independientes usadas en el Factorial Multinivel

Factor	Variables dependientes	Bajo	Alto	Niveles	Unidades
X1	Almidón de semilla de palta	5.5	7.5	2	%p/p
X2	Harina de cascara de café	2	6	3	%p/p almidón
X3	Glicerina	1.65	2.0	2	%p/p

Se muestra la tabla con los 12 tratamientos sugeridos por el diseño Factorial Multinivel:

Tabla 9

Matriz experimental para la formulación de bioplástico a base de almidón de palta, harina de residuos de café y glicerina

Tratamientos	% de almidón de semilla de palta	% Harina o fibra de residuos de café	% de glicerina
Control	5.5%	0%	1.65%
T1	5.5%	2%	1.65%
T2	5.5%	4%	1.65%
T3	5.5%	6%	1.65%
T4	5.5%	2%	2.00%
T5	5.5%	4%	2.00%
T6	5.5%	6%	2.00%
T7	7.5%	2%	1.65%
T8	7.5%	4%	1.65%
T9	7.5%	6%	1.65%
T10	7.5%	2%	2.00%
T11	7.5%	4%	2.00%
T12	7.5%	6%	2.00%

Tabla 10

Matriz de diseño experimental para la elaboración de los bioplásticos.

Tratamientos	% de almidón de semilla de palta	% Harina o fibra de residuos de café	% de glicerina	Características físicas			Características mecánicas		
				Espesor (mm)	Opacidad (%)	Solubilidad (%)	Tracción (Mpa)	Elasticidad (%)	Módulo de Young (Mpa)
Control	5.5%	0%	1.65%						
T1	5.5%	2%	1.65%						
T2	5.5%	4%	1.65%						
T3	5.5%	6%	1.65%						
T4	5.5%	2%	2.00%						
T5	5.5%	4%	2.00%						
T6	5.5%	6%	2.00%						
T7	7.5%	2%	1.65%						
T8	7.5%	4%	1.65%						
T9	7.5%	6%	1.65%						
T10	7.5%	2%	2.00%						
T11	7.5%	4%	2.00%						
T12	7.5%	6%	2.00%						

3.4.5. Análisis estadístico

Se consideraron tres factores: X1 (% de almidón de semilla de palta), X2 (% de harina de residuos de café) y X3 (% de glicerina), evaluados mediante un diseño factorial $2 \times 3 \times 2$ con niveles codificados. Los resultados fueron analizados mediante ANOVA usando Statgraphics Centurion, con un nivel de significancia del 95%, lo que permitió determinar la influencia de las variables y sus interacciones. Además, se generaron gráficos de efectos y superficies de respuesta para identificar las condiciones óptimas del bioplástico según su deseabilidad.

El análisis estadístico de un diseño factorial $2 \times 3 \times 2$ elaborado en Statgraphics Centurion se centra en evaluar tanto los efectos principales como las interacciones entre los factores sobre la variable respuesta; cuyo modelo matemático es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + C_k + (A)_{ij} + (A)_{ik} + (B)_{jk} + (A)_{ijk} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

Y: variable respuesta

μ : media general

A,B,C: efectos principales

AB,AC,BC,ABC: interacciones

ε : error experimental

Según el diseño experimental realizado por medio del software Statgraphics Centurión se realizará la evaluación de las características físicas y mecánicas del bioplástico, pues las variables respuesta a evaluar son (espesor (mm), opacidad (%), solubilidad (%), resistencia de tracción (Mpa), elasticidad (%), módulo de Young (Mpa); donde los resultados serán evaluados por medio de un ANOVA de un solo factor utilizando un nivel de confianza del 95%.

IV. RESULTADOS

4.1. Caracterización del almidón de semilla de palta

4.1.1. Composición química proximal

En la tabla 11 se detalla la composición proximal del almidón de semilla de palta en base húmeda y base seca

Tabla 11

Composición proximal de almidón de semilla de palta

Análisis	Húmeda (%)	Seca (%)
Humedad	6.24 ± 0.176	6.66 ± 0.19
Proteínas	4.15 ± 0.03	4.45 ± 0.03
Grasa	1.02 ± 0.02	1.09 ± 0.02
Fibra	7.44 ± 0.05	7.97 ± 0.05
Carbohidratos	80.45 ± 0.20	86.23 ± 0.21
Cenizas	0.28 ± 0.04	0.30 ± 0.04

Nota: Los valores se expresan como media ± desviación estándar (n = 3)

El contenido de humedad del almidón de semilla de palta fue de 6.24 %, valor cercano al reportado por De Dios-Avila et al. (2022) con 6.4 % en variedades Hass y Landrace, aunque inferior a los valores de Delgado et al. (2026) (9.13–9.84 %) y Navarret et al. (2023) (11–11.5 %) para almidones nativos y modificados. Estas diferencias podrían atribuirse a la variedad, método de extracción y condiciones de secado. El bajo contenido de humedad favorece la estabilidad y conservación del almidón, además de limitar el crecimiento microbiano y su degradación (Araujo et al., 2020; Sanchez et al., 2021).

El contenido de proteínas fue de 4.15 %, valor superior al reportado por Martins et al. (2022) con 1.60 %, Wang et al. (2022) con 0.40–0.45 % y Frasson et al. (2023) con 0.21 %. Estas diferencias podrían relacionarse con el método de extracción y el grado de purificación del almidón (Delgado et al., 2026), ya que una menor remoción de proteínas residuales incrementa el contenido proteico y puede influir en propiedades funcionales como la absorción de agua y gelatinización (Martins et al., 2022).

En cuanto al contenido de grasa (1.02 %), el valor fue superior al 0.16 % reportado por Delgado et al. (2026), pero inferior al 3.63 % obtenido por Araújo et al. (2020), siendo además cercano al 1.68 % descrito por Martins et al. (2022). Estas diferencias podrían atribuirse al cultivar, etapa de maduración y método de extracción, ya que el contenido lipídico aumenta durante el desarrollo del fruto (De Dios-Avila et al., 2022). El mayor contenido de grasa podría indicar una menor remoción de lípidos durante la extracción, los cuales pueden formar complejos con la amilosa y modificar las propiedades térmicas y reológicas del almidón.

El contenido de fibra fue de 7.44 %, valor superior al reportado por Delgado et al. (2026) (0.01–0.11 %), aunque inferior al 20.65 % obtenido por Araújo et al. (2020). Estas diferencias podrían relacionarse con el método de extracción y la remoción parcial de residuos fibrosos durante el procesamiento. En este contexto, Bangar et al. (2022) señalaron que la semilla de palta contiene cantidades importantes de fibra dietaria con potencial funcional e industrial.

El contenido de cenizas fue de 0.28 %, valor cercano al reportado por Jimenez et al. (2022) con 0.16 % y ligeramente inferior al 0.33 % descrito por Martins et al. (2022). Estos resultados evidencian una adecuada pureza del almidón y baja presencia de impurezas inorgánicas. Las diferencias entre estudios podrían atribuirse al método de extracción y grado de purificación del almidón (Alemu et al., 2022).

Finalmente, los carbohidratos representaron el componente mayoritario con 80.45 %, aunque menor al 90.26 % reportado por Delgado et al. (2026) para la variedad Fuerte. Estas diferencias podrían atribuirse al método de extracción y al contenido residual de proteínas, fibra y lípidos presentes en el almidón obtenido. Los autores señalaron que los carbohidratos constituyen la principal fracción de la semilla de aguacate, donde gran parte corresponde al almidón. En este contexto, Onyeaka et al. (2022) indicaron que los almidones no convencionales con alto contenido de carbohidratos presentan mejores propiedades funcionales y adecuada capacidad de gelatinización para la formación de matrices a base de almidón.

4.1.2. Composición de amilosa y amilopectina.

En la tabla 12 se muestra el resultado de absorbancia que se leyeron las muestras en el espectrofotómetro, donde se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 12*Contenido (%) de amilosa y amilopectina en almidón de semilla de palta*

Muestra	Amilosa %	Amilopectina %
Almidón de semilla de palta	12.624 ± 0.04	87.376 ± 0.04

Nota: Los valores se expresan como media ± desviación estándar (n = 3)

El almidón de semilla de palta presentó 12.624 % de amilosa y 87.376 % de amilopectina, evidenciando el predominio de la fracción ramificada, lo que favorece matrices más flexibles, menos cristalinas y con mejor gelatinización. Estos resultados fueron cercanos a los reportados por Wang et al. (2022), quienes relacionaron menores contenidos de amilosa con mayor flexibilidad y menor retrogradación. De manera similar, Martins et al. (2022) señalaron que el predominio de amilopectina favorece estructuras más homogéneas y deformables, mientras que Alemu et al. (2022) reportaron un contenido de amilosa de 17 ± 0.03 %, atribuyendo las variaciones a factores genéticos y ambientales.

En contraste, los valores obtenidos fueron inferiores a los reportados por Tome et al. (2026) y Delgado et al. (2026), quienes encontraron contenidos de amilosa entre 28.85–39.41 %, indicando que mayores niveles de amilosa incrementan la viscosidad, rigidez y resistencia mecánica, aunque reducen la elasticidad. Por otro lado, Irrazabal et al. (2023) reportaron 15.91 g/100 g de amilosa para la variedad Fuerte, valor cercano al obtenido en esta investigación. Estas diferencias podrían deberse al método de determinación, condiciones de cultivo y técnica de extracción; Zuñiga et al. (2024) mencionaron que el uso de hidróxido de sodio puede modificar estructuralmente los gránulos y favorecer una mayor cuantificación de amilosa.

Asimismo, Frasson et al. (2023) indicaron que altos contenidos de amilosa (>30 %) generan estructuras más rígidas y cristalinas, mientras que menores contenidos (<30 %) producen estructuras más abiertas, asociadas al elevado contenido de amilopectina de este estudio.. De manera complementaria, De Dios-Avila et al. (2022) señalaron que la amilosa influye significativamente en las propiedades fisicoquímicas, térmicas y funcionales del almidón. Finalmente, Yildirim-Yalcin et al. (2026) reportaron 33.67 %

de amilosa y concluyeron que altos contenidos incrementan la estabilidad térmica y resistencia mecánica, aunque disminuyen la flexibilidad del material.

4.1.3. Punto de gelatinización

En cuanto al punto de gelatinización, el almidón de semilla de palta presentó un valor de 79.55 ± 0.304 °C, evidenciando adecuada estabilidad térmica y resistencia estructural del gránulo, asociadas a la organización molecular del almidón y al predominio de amilopectina. Estos resultados fueron similares a los reportados por Tome et al. (2026), quienes encontraron temperaturas entre 75.78 y 79.56 °C, mientras que Delgado et al. (2026) reportaron una temperatura final de 74 °C, indicando que un amplio rango de gelatinización sugiere mayor asociación molecular entre sus componentes, especialmente la amilosa.

Asimismo, Wang et al. (2022) reportaron temperaturas pico entre 78.49 y 87.58 °C en almidones de semilla de aguacate, señalando que mayores contenidos de amilosa favorecen estructuras más cristalinas y densas, requiriendo mayor energía durante la gelatinización. De forma similar, Jimenez et al. (2022) encontraron una temperatura final de 80 °C en almidón de aguacate Hass, asociada a mayor estabilidad térmica. Por otro lado, Frasson et al. (2023) reportaron temperaturas pico y final de 76.35 °C y 81.92 °C, respectivamente, valores ligeramente superiores a los obtenidos en esta investigación, atribuidos al mayor contenido de amilosa. Del mismo modo, Yildirim-Yalcin et al. (2026) indicaron que temperaturas de gelatinización superiores a 78 °C favorecen mayor estabilidad estructural y mejores propiedades mecánicas.

De manera complementaria, Martins et al. (2022) señalaron que el almidón de semilla de palta presenta temperaturas de gelatinización superiores a otros almidones debido a su estructura compacta y mayor interacción intermolecular. Además, Falua et al. (2022) y Chakraborty et al. (2023) mencionaron que las temperaturas de gelatinización están relacionadas con el contenido de amilosa, el grado de cristalinidad y la estabilidad térmica y mecánica del almidón.

4.2. Caracterización de la harina de residuos de café:

4.2.1. Composición química proximal

En la tabla 13 se detalla la composición proximal de la harina de residuos de café; la composición proximal de la harina de residuos de café muestra los siguientes resultados:

Tabla 13*Composición proximal de harina de residuos de café*

Análisis	Húmeda (%)	Seca (%)
Humedad	8.19 ± 0.14	8.78 ± 0.16
Proteínas	14.99 ± 0.03	16.32 ± 0.03
Grasa	1.50 ± 0.01	1.63 ± 0.01
Fibra	56.37 ± 0.07	61.39 ± 0.08
Carbohidratos	10.71 ± 0.03	11.66 ± 0.03
Cenizas	8.24 ± 0.19	8.97 ± 0.19

Nota: Los valores se expresan como media ± desviación estándar (n = 3)

La composición proximal de la harina de residuos de café, obtenida a partir de la pulpa generada durante el despulpado del café, secada y molida, mostró un elevado contenido de fibra (56.37 % en base húmeda y 61.39 % en base seca), seguido de proteínas (14.99 %) y cenizas (8.24 %). Estos resultados evidencian el potencial de este residuo agroindustrial como refuerzo natural en bioplásticos biodegradables debido a su composición lignocelulósica. El contenido de humedad obtenido se encuentra dentro del rango reportado en la literatura para pulpa de café seca. Rodríguez-Quiroz et al. (2023), en el estudio reportaron un valor de 8.32 %, mientras que Vivas et al. (2025) indicaron 11.29 % en coffee husk destinado a aplicaciones en materiales biodegradables. De manera similar, Cangussu et al. (2021) reportó 5.50 % en residuos de café. Esta concordancia sugiere que el proceso de secado aplicado es eficiente para reducir el agua libre presente en la matriz vegetal, lo cual contribuye a la estabilidad del material y disminuye la posibilidad de degradación microbiana durante su almacenamiento.

En cuanto al contenido de proteínas, el valor obtenido de 14.99 % es ligeramente superior al reportado, 8.31% de proteína de Vivas et al. (2025) menciona que un porcentaje considerable si se tiene en cuenta la naturaleza de este tipo de compuesto. Sin embargo, Rohaya et al. (2023) reporta de 4 – 8 % para la variedad arábica, robusta y liberica y Cangussu et al. (2021), quienes reportan contenidos proteicos de 10.03 % en residuos de café. Esta variación puede atribuirse principalmente a factores como la variedad del café y altitud del lugar de cultivo, el grado de madurez del fruto y las

condiciones de procesamiento y secado, ya que la eliminación de humedad puede concentrar los compuestos nitrogenados presentes en la matriz.

El contenido de grasa obtenido fue bajo (1.50 %), lo cual coincide ampliamente con lo reportado en la literatura para este tipo de residuos agroindustriales. Vivas et al. (2025) y Rebolledo et al. (2023) reportaron valores de lípidos 1.26 % y 1.46% respectivamente mencionan que esto es coherente debido a que la mayor parte de su composición está constituida por compuestos estructurales y fracciones fibrosas; mientras que Rodríguez-Quiroz et al. (2023) indicó 2.87 %. Este bajo contenido lipídico es característico de la pulpa de café, debido a que la mayor fracción de grasas del fruto se encuentra en el grano y no en la pulpa. Este comportamiento resulta favorable para aplicaciones en bioplásticos, ya que la baja presencia de lípidos mejora la compatibilidad con matrices poliméricas hidrofílicas.

El contenido de fibra representó el componente predominante de la muestra, con un valor de 56.37 % en base húmeda y 61.39 % en base seca. Estos resultados son consistentes con los reportados por Vivas et al. (2025), quienes reportó 71.92% en coffee husk destinado a aplicaciones en materiales biodegradables, así como con Cangussu et al. (2021), quienes reportaron 65.83 % de fibra dietaria total en residuos de café, lo que respalda la predominancia de esta fracción en este tipo de materiales lignocelulósicos y al contrastar con otros estudios, los resultados obtenidos muestran similitud, destacando la fibra como el principal componente en subproductos del café, como las cáscaras (Nolasco et al., 2022). Por otro lado, el contenido de carbohidratos fue de 10.71 %, valor inferior al reportado en algunos estudios de referencia. Vivas et al. (2025) valores superiores de 17.56 %. La menor proporción observada en este estudio puede explicarse por el lavado inicial de la pulpa y el secado térmico, procesos que favorecen la pérdida o degradación de compuestos solubles, concentrando principalmente la fracción estructural del material.

Finalmente, el contenido de cenizas obtenido fue de 8.24 %, valor que se encuentra dentro del rango reportado en la literatura. Rebolledo et al. (2023) reportaron 7.86 %, mientras que Cangussu et al. (2021) indicaron valores 5.20 % en residuos de café. Este contenido refleja la presencia de minerales como potasio, calcio y magnesio, característicos de la pulpa de café. El ligero incremento observado en este estudio puede

deberse a la concentración de minerales tras la eliminación de agua durante el proceso de secado. En conjunto, los resultados confirman que la pulpa de café seca y molida es un material predominantemente fibroso, con niveles moderados de proteínas y cenizas, y bajos contenidos de grasa y carbohidratos. Esta composición concuerda con la literatura reciente y evidencia su naturaleza lignocelulósica, lo que la hace adecuada como refuerzo en bioplásticos biodegradables, mejorando su rigidez y estabilidad estructural.

4.2.2. Contenido de celulosa y lignina (%)

Tabla 14

Contenido de celulosa y lignina (%) de la pulpa de café

Definición	Promedio	Desv.
% celulosa	21.31	0.26
% lignina	20.88	0.45

Nota: Los valores se expresan como media $\pm$ desviación estándar (n = 3)

El contenido de celulosa y lignina de la pulpa de café seca y molida fue de 21.31 ± 0.26 % y 20.88 ± 0.45 %, respectivamente. Estos resultados confirman la naturaleza lignocelulósica del material y coinciden con los rangos reportados para residuos de café utilizados en aplicaciones de valorización y desarrollo de biomateriales.

El contenido de celulosa obtenido fue cercano al reportado por Villar et al. (2026), quienes encontraron 20.39 % de celulosa en pulpa de café destinada a la producción de xilooligosacáridos. Asimismo, Rodríguez-Quiroz et al. (2023) reportaron 26.06 % de celulosa en pulpa de café seca y molida señala que las partes correspondientes a la cereza del café y el proceso de obtención de las semillas pueden influir en la composición lignocelulósica, mientras que Carvajal y Oakley (2023) reportó 23.90 %. La ligera diferencia observada respecto a estos estudios puede atribuirse a factores como la variedad del café, las condiciones agronómicas, el grado de madurez del fruto y el método de secado empleado. La celulosa constituye el principal polisacárido estructural de la pared celular vegetal; por ello, su concentración suele variar según la proporción de tejidos fibrosos presentes en la pulpa y el nivel de degradación de los componentes solubles durante el procesamiento (Kidanu et al., 2026).

Por otro lado, el contenido de lignina obtenido (20.88 %) fue superior al reportado por Rodríguez-Quiroz et al. (2023), quienes encontraron 18.29 %, y por Malarat et al. (2023), quienes reportaron 17.32 % en pulpa de café antes de los tratamientos de extracción de nanocelulosa. Sin embargo, fue inferior al valor informado por Villar et al. (2026), quienes encontraron 27.04 % de lignina. De manera similar, Van Nguyen et al. (2023) reportaron 23.3 % de lignina en cáscara de café, mientras que Vivas et al. (2025) obtuvieron aproximadamente 17.86 % en coffee husk utilizado para materiales biodegradables. Las diferencias entre estudios pueden atribuirse a la variedad de café, origen, condiciones de cultivo y procesamiento de la biomasa. Sin embargo, los valores obtenidos confirman que la pulpa de café es una fuente importante de compuestos lignocelulósicos con potencial para aplicaciones de valor agregado, especialmente como refuerzo natural en materiales biodegradables (Schutz et al., 2023).

Los resultados obtenidos también son inferiores a los reportados para algunas cáscaras de café sometidas a procesos de purificación. Por ejemplo, Zeleke et al. (2022) reportaron 52.9 % de celulosa en coffee husk, mientras que Amensisa (2024) encontró contenidos superiores al 35% tras tratamientos alcalinos. Asimismo, Kidanu et al. (2026) reportaron incrementos importantes en la recuperación de celulosa después de procesos de deslignificación. Estas diferencias son esperables, ya que dichos estudios evaluaron materiales sometidos a tratamientos químicos destinados a remover lignina, hemicelulosa y extractivos, concentrando artificialmente la fracción celulósica. En contraste, la presente investigación evaluó la pulpa de café en estado natural, por lo que los valores reflejan la composición real del residuo sin modificaciones químicas. El contenido de celulosa (21.31 %) y lignina (20.88 %) obtenido resulta favorable para aplicaciones en bioplásticos biodegradables, ya que la celulosa aporta rigidez y resistencia mecánica, mientras que la lignina contribuye a la estabilidad estructural y a una menor afinidad por la humedad. Asimismo, los valores encontrados se encuentran dentro de los rangos reportados para pulpa y cáscara de café en la literatura, confirmando que este residuo constituye una importante fuente de compuestos lignocelulósicos con potencial para ser utilizado como refuerzo natural en materiales biodegradables.

4.2.3. Capacidad antioxidante

Asimismo, se realizó el extracto de residuos de café para poder determinar su capacidad antioxidante el cual se muestra en la tabla 15. se ha demostrado la presencia de los compuestos fenólicos y la actividad antioxidante tanto en los extractos acuosos de la pulpa del café por el método de la maceración.

Tabla 15

Capacidad antioxidante en términos de porcentaje de inhibición del radical DPPH y $\mu\text{mol trolox/g}$ muestra.

Definición	Promedio	Desv.
%Inhibición de radicales DPPH	46.863	0.892
$\mu\text{mol trolox/g}$	31.431	0.775

Nota: El %Inhibición está dada a una concentración de 0.654 mg/mL del del extracto La pulpa seca y molida de *Coffea arábica* variedad Catimor presentó una capacidad antioxidante de 46.86 ± 0.89 % de inhibición del radical DPPH, equivalente a 31.43 ± 0.78 $\mu\text{mol Trolox/g}$, evidenciando que este subproducto conserva una importante capacidad para neutralizar radicales libres tras el secado. Esta actividad se atribuye principalmente a la presencia de ácidos clorogénicos, flavonoides y otros compuestos fenólicos con capacidad donadora de electrones o átomos de hidrógeno.

Los resultados fueron muy similares a los reportados por Cortés et al. (2021) , quien obtuvo 32.56 ± 0.38 $\mu\text{mol Trolox/g}$ para pulpa fresca sin tratamiento y 25.22 ± 1.40 $\mu\text{mol Trolox/g}$ para pulpa tratada (*Coffea arábica* var. Castillo, Colombia). El valor obtenido en el presente estudio (31.43 ± 0.78 $\mu\text{mol Trolox/g}$) fue ligeramente inferior al de la pulpa fresca, pero superior al de la pulpa tratada, lo que sugiere que la extracción asistida por ultrasonido empleando una solución acuosa de 20 % metanol favoreció la recuperación de compuestos antioxidantes pese al secado previo de la muestra. Estas diferencias pueden atribuirse al secado, que reduce parcialmente los compuestos fenólicos; no obstante, el ultrasonido favoreció su recuperación al mejorar la extracción, Islam et al. (2023), señalaron que las mezclas metanol-agua favorecen una extracción más eficiente de compuestos fenólicos y una mayor actividad captadora del radical DPPH que los solventes puros, debido a una mejor penetración en la matriz vegetal. Solomakou et al. (2023), quienes reportaron que el rendimiento en compuestos fenólicos

de residuos de café molido aumenta desde 20 °C hasta los 45–60 °C permiten maximizar la solubilidad y difusión de los polifenoles sin comprometer su integridad química.

Asimismo, Barragán-Condori et al. (2023), quienes evaluaron la pulpa y cáscara de cereza de café (*Coffea arabica* var. Catimor y Typica, Perú) en estado fresco, seco y congelado, se obtuvieron valores de DPPH entre 16.07 y 33.73 $\mu\text{mol Trolox/g}$. El resultado del presente estudio (31.43 $\mu\text{mol Trolox/g}$) se ubica en el rango superior reportado por estos autores, siendo comparable a la variedad Catimor en estado fresco (32.46 $\mu\text{mol Trolox/g}$) y congelado (32.36 $\mu\text{mol Trolox/g}$), lo que indica que la pulpa evaluada conserva una actividad antioxidante equivalente a variedades de alto rendimiento fenólico evidenciando que el potencial antioxidante depende tanto del genotipo como del método de conservación y del contenido de compuestos fenólicos. Por otro lado, Preedalikit et al. (2023), quienes evaluaron la actividad antioxidante de extractos de pulpa de cereza de café (*Coffea arabica*, Tailandia) obtenidos mediante tres métodos de extracción Soxhlet (CCS), ultrasonido (CCU) y maceración (CCM), se reportaron valores de DPPH de 98.2, 52.3 y 46.2 $\mu\text{M Trolox/g}$ de extracto, respectivamente, siendo superiores al valor registrado en este trabajo. Estas diferencias pueden atribuirse a las condiciones de extracción, el tipo y concentración del solvente y la naturaleza de la materia prima.

De forma similar, Tran et al. (2022) reportaron en pulpa de *Coffea canephora* un valor de DPPH de 9.3 mg TE/g de muestra seca mediante extracción asistida por microondas, confirmando que tanto el ultrasonido como las microondas son tecnologías eficientes para la recuperación de compuestos bioactivos del café. Los resultados también concuerdan con lo reportado por Lestari et al. (2023), quienes obtuvieron un IC_{50} de 9.59 mg/L para extractos etanólicos de cáscara de pulpa de *Coffea arabica*, evidenciando una elevada capacidad antioxidante. Asimismo, Santos, Macedo et al. (2024) registraron porcentajes de inhibición del radical DPPH superiores al 81 % en extractos liofilizados de pulpa de *Coffea arabica* y *Coffea canephora*. Aunque estos estudios emplean diferentes unidades de expresión, ambos confirman el alto potencial antioxidante de la pulpa de café como fuente de compuestos bioactivos.

La extracción asistida por ultrasonido incrementa la recuperación de compuestos fenólicos mediante cavitación acústica, que provoca la ruptura de paredes celulares y

potencia la difusión de solutos hacia el solvente, permitiendo rendimientos de polifenoles superiores en más del 20% respecto a métodos convencionales como la maceración o Soxhlet, con menores tiempos de procesamiento y consumo de solvente (Silva et al., 2020). Rojas-Orduña et al. (2023) señalan que la actividad antioxidante de la pulpa de café depende de la variedad, el procesamiento y el método de extracción, confirmando su potencial como fuente de compuestos bioactivos; los compuestos fenólicos presentes en la pulpa molida pueden migrar parcialmente hacia la superficie del empaque, confiriéndole un carácter activo antioxidante favorable para la conservación de alimentos frescos. Esta capacidad antioxidante considerable respalda la valorización de la pulpa de café como ingrediente funcional en bioplásticos, contribuyendo a la reducción del impacto ambiental de su disposición inadecuada y al fortalecimiento de la economía circular en la cadena productiva del café.

4.3. Propiedades fisicoquímicas del bioplástico

4.3.1. Espesor

En el Tabla 16 se muestran los valores de las propiedades físicas (espesor) de los bioplásticos elaborado en base a los tratamientos realizados:

Tabla 16

Promedio del espesor de los tratamientos de bioplástico

Tratamientos	Almidón de semilla de palta %	Harina de residuos de café %	Glicerina %	Espesor (mm)
Control	5.5%	0%	1.65%	0.149 ± 0.002
T1	5.5%	2%	1.65%	0.162 ± 0.006
T2	5.5%	4%	1.65%	0.155 ± 0.003
T3	5.5%	6%	1.65%	0.175 ± 0.004
T4	5.5%	2%	2.00%	0.159 ± 0.011
T5	5.5%	4%	2.00%	0.168 ± 0.012
T6	5.5%	6%	2.00%	0.177 ± 0.007
T7	7.5%	2%	1.65%	0.167 ± 0.011
T8	7.5%	4%	1.65%	0.177 ± 0.013
T9	7.5%	6%	1.65%	0.188 ± 0.009

Tratamientos	Almidón de semilla de palta %	Harina de residuos de café %	Glicerina %	Espesor (mm)
T10	7.5%	2%	2.00%	0.188 ± 0.005
T11	7.5%	4%	2.00%	0.192 ± 0.004
T12	7.5%	6%	2.00%	0.199 ± 0.002

Nota: Los valores se expresan como media ± desviación estándar (n = 3)

La tabla 16 muestra los valores promedio del espesor de los bioplásticos obtenidos osciló entre 0.149 ± 0.002 mm y 0.199 ± 0.002 mm, observándose un incremento progresivo conforme aumentó la concentración de almidón de semilla de palta, harina de residuos de café y glicerina. Este comportamiento puede atribuirse al aumento de sólidos totales en la solución filmógena y a la incorporación de compuestos lignocelulósicos provenientes de la harina de café, los cuales favorecen la formación de una matriz polimérica más gruesa durante el secado. Los resultados obtenidos fueron similares a los reportados en bioplásticos elaborados con almidón de semilla de palta, donde se registraron espesores entre 0.139 y 0.185 mm (Martins et al., 2025) y alrededor de 0.25 mm (Díaz & López, 2024). Asimismo, Wahyudi et al. (2025) obtuvieron espesores entre 0.205 y 0.266 mm en películas de almidón de semilla de palta reforzadas con PVA y quitosano, mientras que Navarrete et al. (2023) reportaron valores entre 0.55 y 0.60 mm en bioplásticos elaborados con almidón acetilado de aguacate. Las diferencias observadas podrían explicarse por la incorporación de agentes reforzantes y modificaciones químicas del almidón, que incrementan la cantidad de sólidos y favorecen una mayor expansión de la matriz polimérica.

De manera similar, diversos estudios realizados con otras fuentes de almidón y materiales de refuerzo han demostrado que el incremento de fibras vegetales, celulosa o plastificantes produce aumentos significativos en el espesor de las películas biodegradables. Kumari et al. (2025) reportaron espesores entre 0.102 y 0.194 mm en bioplásticos elaborados con almidón de cáscara de papa y celulosa de bagazo de caña, mientras que Oluwasina et al. (2024) obtuvieron valores entre 0.21 y 0.48 mm en películas reforzadas con celulosa alcalina. Del mismo modo, Tassew et al. (2025) y Sánchez et al. (2022) señalaron que la incorporación de materiales fibrosos mejora la estructura de la matriz y contribuye al incremento del espesor. Por otra parte, Wahyudi

al. (2025) observaron que el aumento de la concentración de glicerol incrementó el grosor de películas elaboradas con almidón de palma de azúcar, comportamiento que coincide con la tendencia observada en los tratamientos con mayor contenido de glicerina en el presente estudio.

Tabla 17

Pruebas de Normalidad para ESPESOR

<i>Prueba</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Gl</i>	<i>Valor-P</i>
Estadístico W de Shapiro-Wilk - Espesor	0.939053	39	0.0354128

Nota: La prueba de Shapiro-Wilk está basada en la comparación de los cuartiles de la distribución normal ajustada a los datos.

En la tabla 17 se muestra el análisis de normalidad realizado obteniendo un valor $p = 0.035 < 0.05$, que es el intervalo de confianza; por lo que se rechaza la hipótesis nula y aceptando la hipótesis alterna; se puede rechazar la idea de que ESPESOR proviene de una distribución normal con 95% de confianza. En cuanto al supuesto de la homogeneidad de varianzas se tiene los siguientes resultados:

Tabla 18

Prueba de homogeneidad de varianzas para ESPESOR

	<i>Prueba</i>	<i>Valor-P</i>
Levene's	1.90203	0.0827

Nota: Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95.0% de confianza.

De acuerdo a la tabla 18 se muestra un valor de $p = 0.0827 > 0.05$ en el espesor, por lo que se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alterna, lo que indica que los datos presentan homogeneidad de varianzas, en consecuencia, las varianzas fueron homogéneas, evidenciando una dispersión similar del espesor entre las muestras analizadas siendo adecuado aplicar un ANOVA.

Tabla 19

Tabla ANOVA para ESPESOR

	<i>Gl</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Tratamientos	12	5.91	0.0001

En la tabla 18 el análisis de varianza evidenció un efecto significativo de los tratamientos sobre el espesor ($F = 5.91$; $p = 0.0001$). Dado que el valor de probabilidad fue inferior al nivel de significancia establecido ($\alpha = 0.05$), se rechazó la hipótesis nula de igualdad de medias, concluyéndose que existen diferencias estadísticamente significativas en el espesor entre los tratamientos evaluados. La prueba de Tukey HSD para el espesor en los bioplásticos, presentada en la tabla 20, demostró un efecto significativo, evidenciado por la formación de subgrupos:

Tabla 20

Prueba de Tukey HSD para ESPESOR

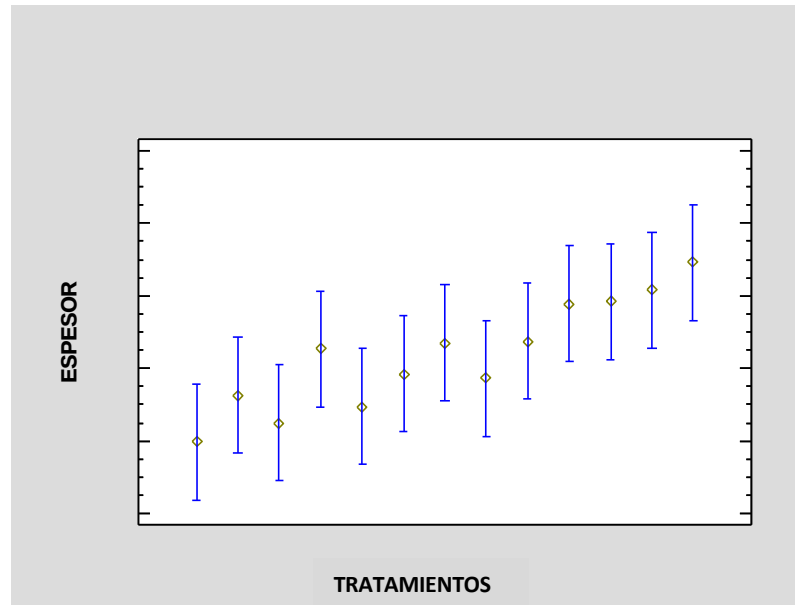
TRATAMIENTO	Casos	Media	Grupos Homogéneos
0	3	0.149667	X
2	3	0.155	X
4	3	0.159333	XX
1	3	0.162667	XXX
7	3	0.167333	XXX
5	3	0.168333	XXXX
3	3	0.175333	XXXX
6	3	0.177	XXXX
8	3	0.177333	XXXX
9	3	0.187667	XXX
10	3	0.188333	XXX
11	3	0.191667	XX
12	3	0.199333	X

Nota: La tabla muestra los resultados obtenidos de la prueba de Tukey HSD para el espesor de los tratamientos, arrojado por el programa Statgraphics Centurion

La Tabla 20 presenta la comparación de medias del espesor mediante grupos homogéneos. Los valores promedio oscilaron entre 0.149667 y 0.199333, siendo el tratamiento 12 el de mayor espesor y el tratamiento 0 el menor. La superposición de grupos homogéneos indica que varios tratamientos no presentaron diferencias significativas entre sí respecto al espesor del bioplástico.

Figura 18

Gráfico de Medias del espesor con Intervalos de Confianza del 95% para los 13 Tratamientos



El gráfico de medias con intervalos de confianza al 95% evidenció diferencias en el espesor entre los 13 tratamientos, donde el tratamiento 12 presentó la mayor media y el tratamiento 0 la menor. La superposición de algunos intervalos indicó ausencia de diferencias significativas entre ciertos tratamientos. Se procedió a realizar el ANOVA factorial, para realizar el análisis de varianza en los variables dependientes, como se muestra en la tabla:

Tabla 21

Análisis de varianza para el espesor en los tratamientos

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:ALMIDON	0.003249	1	0.003249	27.18	0.0000
B:CAFE	0.00142604	1	0.00142604	11.93	0.0018
C:GLICERINA	0.000860444	1	0.000860444	7.20	0.0121
AB	3.75E-7	1	3.75E-7	0.00	0.9557
AC	0.000312111	1	0.000312111	2.61	0.1173
BB	0.000130681	1	0.000130681	1.09	0.3047
BC	0.00000704167	1	0.00000704167	0.06	0.8100

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Error total	0.00334653	28	0.000119519		
Total (corr.)	0.00933222	35			

Nota: La tabla muestra el análisis de varianza de regresión para la variable espesor.

El coeficiente de determinación (R^2) indicó que el modelo explicó el 64.14 % de la variabilidad observada en el espesor. El análisis de varianza (ANOVA) evidenció efectos significativos de los factores A (almidón de semilla de palta), B (harina de café) y C (glicerina), con valores p inferiores a 0.05. El factor A presentó la mayor influencia sobre la variable respuesta ($F = 27.18$; $p < 0.0001$). En contraste, las interacciones AB, AC y BC, así como el efecto cuadrático de la harina de café (BB), no mostraron efectos estadísticamente significativos ($p > 0.05$). Estos resultados indican que el espesor del bioplástico estuvo determinado principalmente por los efectos individuales de los factores evaluados, sin evidenciarse interacciones significativas entre ellos.

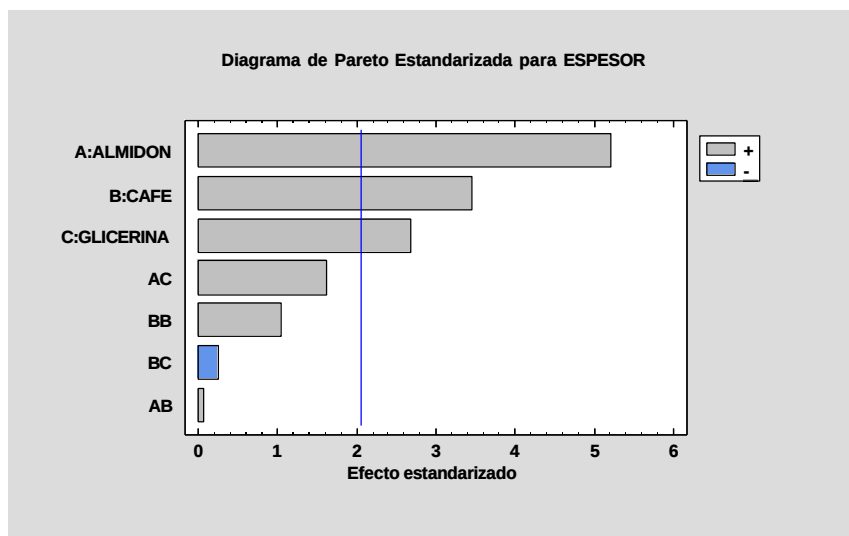
Además, la ecuación de regresión ajustada a los datos presentados en la tabla 25, es la siguiente:

$$\begin{aligned} \text{ESPESOR} = & 0.251018 - 0.0214563 * \text{Almidon} - 0.00181101 * \text{Café} - \\ & 0.0752381 * \text{Glicerina} + 0.0000625 * \text{Almidon} * \text{Cafe} + 0.0168254 * \text{Almidon} * \text{Glicerina} + \\ & 0.00101042 * \text{Cafe}^2 - 0.00154762 * \text{Cafe} * \text{Glicerina} \end{aligned}$$

La Figura 19 muestra el diagrama de Pareto estandarizado para el espesor del bioplástico. Los signos (+) indican efectos positivos y los signos (–) efectos negativos sobre la variable respuesta. Los factores A (almidón de semilla de palta), B (harina de café) y C (glicerina) presentaron efectos positivos y significativos, siendo el factor A el de mayor influencia. En cambio, las interacciones AB, AC y BC, así como el efecto cuadrático BB, no mostraron efectos significativos sobre el espesor.

Figura 19

Diagrama de Pareto del efecto de los factores en el espesor



En la figura 20 se presenta la superficie de respuesta estimada para el espesor de los bioplásticos; evidencian que el espesor de este aumentó conforme se incrementaron las concentraciones de almidón de semilla de palta, harina de café y glicerina. Se observa una tendencia ascendente en la respuesta, indicando que los efectos individuales de los factores influyeron positivamente sobre el espesor del bioplástico.

Figura 20

Superficie de respuesta para el espesor



. Los espesores de los bioplásticos obtenidos oscilaron entre 0.149 ± 0.002 mm y 0.199 ± 0.002 mm, observándose un incremento conforme aumentaron las concentraciones de almidón de semilla de palta, harina de residuos de café y glicerina. El análisis de varianza confirmó la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos ($F =$

5.91; $p = 0.0001$), mientras que el modelo factorial explicó el 64.14 % de la variabilidad del espesor. Los tres componentes presentaron efectos individuales positivos y significativos, siendo el almidón el factor de mayor influencia ($F = 27.18$; $p < 0.0001$); en cambio, sus interacciones no fueron significativas, lo cual indica que cada componente influyó principalmente de manera independiente. El efecto del almidón se atribuye al aumento de la concentración de macromoléculas y de los sólidos totales en la solución filmógena, generando una mayor cantidad de material depositado por unidad de superficie después de la evaporación del agua durante el secado. Asimismo, la harina de residuos de café aportó celulosa, lignina y otras partículas lignocelulósicas que quedaron incorporadas en la matriz polimérica, actuando como material de refuerzo y aumentando la masa sólida y el volumen estructural de la película. Por su parte, la glicerina, debido a su naturaleza higroscópica y a su capacidad para establecer puentes de hidrógeno con las cadenas de almidón, incrementó la movilidad molecular y la separación entre dichas cadenas, favoreciendo una matriz más expandida y con mayor retención de humedad residual, lo que también pudo contribuir al aumento del espesor. Estos resultados coinciden con lo señalado por Martins et al. (2025), quienes relacionaron el aumento del almidón de semilla de palta con la formación de matrices más gruesas, y con Kumari et al. (2025) y Oluwasina et al. (2024), quienes determinaron que la incorporación de fibras vegetales y celulosa aumenta el espesor debido al mayor contenido de sólidos y al efecto estructurante de estos materiales. No obstante, un mayor espesor no implica necesariamente un mejor desempeño, ya que películas excesivamente gruesas pueden presentar menor uniformidad, rigidez elevada o dificultades para su aplicación como empaque. En este sentido, la formulación óptima T8, constituida por 7.5 % de almidón, 4 % de harina de residuos de café y 1.65 % de glicerina, presentó un espesor de 0.177 mm, valor intermedio dentro del intervalo experimental y comprendido en el rango de 0.10 a 0.25 mm reportado para películas biodegradables destinadas al envasado. Por ello, su selección no se sustentó en obtener el mayor espesor, sino en alcanzar un equilibrio adecuado entre grosor, resistencia mecánica, flexibilidad, solubilidad y propiedades de barrera.

De igual manera, Martins et al. (2025) señalaron que el aumento de la concentración de almidón de semilla de palta favorece la formación de matrices más gruesas por la mayor disponibilidad de biopolímero para estructurar la red filmógena, mientras que

Sirbu et al. (2024) indicaron que mayores concentraciones de glicerol modifican la organización de las cadenas de almidón y promueven la expansión de la matriz, contribuyendo al incremento del grosor de las películas.

No obstante, diversos estudios coinciden en que un mayor espesor no necesariamente representa un mejor desempeño del bioplástico. Se ha reportado que películas biodegradables con espesores comprendidos aproximadamente entre 0.10 y 0.25 mm presentan un equilibrio adecuado entre resistencia mecánica, flexibilidad y propiedades barrera, características deseables para aplicaciones de empaque (Frangopoulos et al., 2023). En este sentido, los tratamientos con 7.5 % de almidón, 4 % de harina de residuos de café y 1.65–2.0 % de glicerina generaron espesores comprendidos entre 0.177 y 0.192 mm, valores que se encuentran dentro de los rangos reportados para películas biodegradables con desempeño adecuado en aplicaciones de empaque. Asimismo, se ha señalado que espesores excesivamente elevados pueden asociarse con matrices menos homogéneas y con una disminución de algunas propiedades funcionales, mientras que espesores intermedios favorecen una estructura más equilibrada y un mejor desempeño global del bioplástico (Pooja & Shashank, 2024).

4.3.2. Opacidad

Como parte de la evaluación de las propiedades ópticas en la siguiente tabla se muestra la opacidad obtenida de las láminas del bioplástico elaborado en base a los tratamientos realizados:

Tabla 22

Promedios de la opacidad de los tratamientos de bioplástico

Tratamientos	Almidón de semilla de palta %	Harina de residuos de café %	Glicerina %	Opacidad (%)
Control	5.5%	0%	1.65%	11.77 ± 0.125
T1	5.5%	2%	1.65%	11.08 ± 0.411
T2	5.5%	4%	1.65%	12.04 ± 0.116
T3	5.5%	6%	1.65%	11.27 ± 0.140
T4	5.5%	2%	2.00%	11.23 ± 0.550
T5	5.5%	4%	2.00%	10.91 ± 0.142
T6	5.5%	6%	2.00%	10.75 ± 0.325
T7	7.5%	2%	1.65%	9.08 ± 0.325
T8	7.5%	4%	1.65%	8.66 ± 0.281
T9	7.5%	6%	1.65%	8.39 ± 0.145
T10	7.5%	2%	2.00%	8.19 ± 0.250
T11	7.5%	4%	2.00%	8.41 ± 0.350
T12	7.5%	6%	2.00%	8.16 ± 0.146

Nota: Los valores se expresan como media ± desviación estándar (n = 3)

La tabla 22 muestra los valores de opacidad obtenidos variaron entre 8.16 ± 0.146 % y 12.04 ± 0.116 %, observándose una disminución progresiva de la opacidad cuando la concentración de almidón de semilla de palta aumentó de 5.5 % a 7.5 %. Los tratamientos T10, T11 y T12 presentaron los valores más bajos, mientras que T2 registró el valor más alto. La disminución de la opacidad podría deberse a que el mayor contenido de almidón favoreció una matriz más homogénea, reduciendo la dispersión de la luz. Este comportamiento coincide con estudios realizados en películas de almidón de semilla de palta con estructuras más uniformes (Muñoz et al., 2024).

La menor opacidad observada con 2.00 % de glicerina podría deberse a su efecto plastificante, que promueve una matriz más uniforme. Sin embargo, niveles más altos de glicerina pueden aumentar la opacidad al incrementar el espesor y la turbidez de las películas, la harina de residuos de café no presentó un efecto lineal sobre la opacidad, lo que indica que esta propiedad dependió tanto de la concentración incorporada como de la dispersión de las partículas lignocelulósicas dentro de la matriz del bioplástico. De manera similar, Tassew et al. (2025) reportaron que la incorporación de fibras celulósicas aumentó la opacidad de las películas de almidón por la dispersión de la luz, favoreciendo su aplicación en empaques para alimentos sensibles a la radiación lumínica. Para los autores Yalcin et al. (2025), el aumento de la cantidad de almidón de semilla de aguacate (3-5 %) y glicerol (0,75-1,75 %) provocó una disminución significativa de la opacidad de las películas ($3,83 \pm 0,12$ y $10,44 \pm 0,77$) señalo que la disminución de la opacidad podría relacionarse con una matriz más homogénea y una mejor gelatinización del almidón, condiciones que favorecen la transmisión de la luz y reducen su dispersión (Ghosh & Roy, 2022). La opacidad moderada obtenida constituye una característica favorable para aplicaciones de empaque, ya que puede ayudar a proteger alimentos sensibles a la luz y reducir procesos fotooxidativos, coincidiendo con lo reportado en películas de almidón de semilla de palta reforzadas con celulosa. La opacidad disminuye con el aumento del almidón debido a una matriz más homogénea que reduce la dispersión de la luz, como Frangopoulos et al. (2023) reporta que la opacidad aumenta a concentraciones intermedias ($\approx 4\text{--}5.5\%$) por agregación de gránulos ($\approx 10\text{--}30$ de opacidad), y luego disminuye a mayores contenidos ($\approx 5.5\text{--}7\%$) al formarse estructuras más compactas ($\approx 30\text{--}10$). Asimismo, la glicerina puede incrementar la transparencia por su efecto plastificante sobre la matriz polimérica.

Tabla 23

Pruebas de Normalidad para OPACIDAD

Prueba	Estadístico	Gl	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk - Opacidad	0.877477	39	0.00053

Nota: La prueba de Shapiro-Wilk está basada en la comparación de los cuartiles de la distribución normal ajustada a los datos.

En la tabla 23 se muestra el análisis de normalidad realizado obteniendo un valor $p = 0.00053 < 0.05$, que es el intervalo de confianza; por lo que se rechaza la hipótesis nula y aceptando la hipótesis alterna; se puede rechazar la idea de que la OPACIDAD proviene de una distribución normal con 95% de confianza. En cuanto al supuesto de la homogeneidad de varianzas se tiene los siguientes resultados:

Tabla 24

Prueba de homogeneidad de varianzas para OPACIDAD

	<i>Prueba</i>	<i>Valor-P</i>
Levene's	1.80015	0.1018

Nota: Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95.0% de confianza.

De acuerdo a la tabla 24 se muestra un valor de $p = 0.1018 > 0.05$ en la opacidad, por lo que se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alterna, esto evidencia que las mediciones de opacidad del bioplástico elaborado con almidón de semilla de palta, harina de café y glicerina mantuvieron una dispersión homogénea, permitiendo asumir estabilidad en la variación de los datos entre las diferentes formulaciones analizadas, siendo adecuado aplicar un ANOVA.

Tabla 25

Tabla ANOVA para OPACIDAD

	<i>Gl</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Tratamientos	12	45.00	0.0001

En la tabla 25 el análisis de varianza para la variable opacidad mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados ($F = 45.00$; $p = 0.0001$). Dado que el valor p fue inferior a 0.05, se rechazó la hipótesis nula de igualdad de medias, concluyéndose que los tratamientos ejercieron un efecto significativo sobre la opacidad de los bioplásticos. La prueba de Tukey HSD para la opacidad en los bioplásticos, presentada en la tabla 26, demostró un efecto significativo, evidenciado por la formación de subgrupos:

Tabla 26*Prueba de Tukey HSD para OPACIDAD*

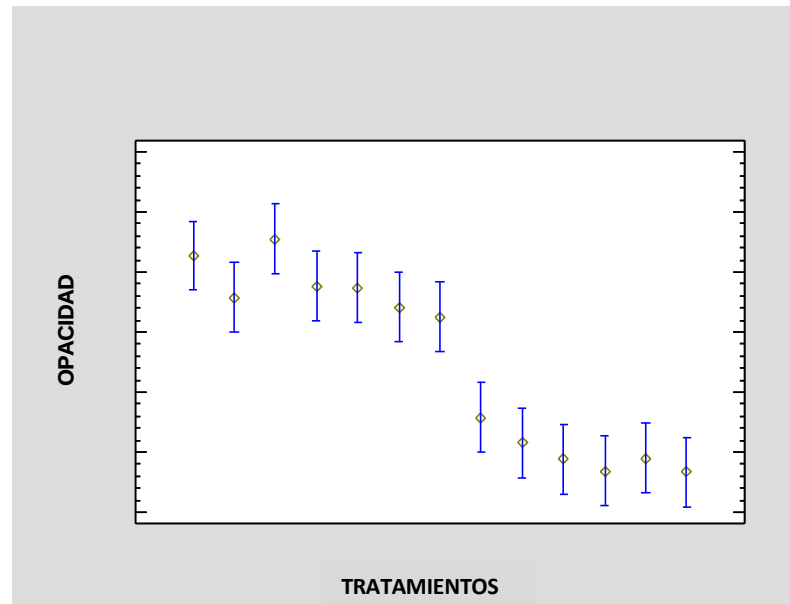
TRATAMIENTO	Casos	Media	Grupos Homogéneos
12	3	8.16467	X
10	3	8.189	X
9	3	8.38633	X
11	3	8.406	X
8	3	8.66067	X
7	3	9.078	X
6	3	10.7457	X
5	3	10.9143	XX
1	3	11.0757	XX
4	3	11.232	XX
3	3	11.265	XX
0	3	11.7703	XX
2	3	12.0433	X

Nota: La tabla muestra los resultados obtenidos de la prueba de Tukey HSD para la opacidad de los tratamientos, arrojado por el programa Statgraphics Centurion.

La comparación de medias para la variable opacidad mostró valores entre 8.16467 y 12.0433. Los tratamientos 12, 10 y 9 presentaron las menores medias de opacidad, mientras que el tratamiento 2 registró el valor más alto. Asimismo, la superposición de grupos homogéneos indicó que varios tratamientos no presentaron diferencias significativas entre sí respecto a la opacidad del bioplástico.

Figura 21

Gráfico de Medias de opacidad con Intervalos de Confianza del 95% para los 13 Tratamientos



El gráfico de medias con intervalos de confianza al 95% evidenció diferencias en la opacidad entre los tratamientos evaluados. El tratamiento 2 presentó la mayor media de opacidad, mientras que el tratamiento 12 registró la menor. Además, la superposición de algunos intervalos de confianza indicó ausencia de diferencias significativas entre ciertos tratamientos. Se procedió a realizar el ANOVA factorial, para realizar el análisis de varianza en los tratamientos, como se muestra en la tabla:

Tabla 27

Análisis de varianza para la opacidad en los tratamientos

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:ALMIDON	67.169	1	67.169	325.81	0.0000
B:CAFE	0.384813	1	0.384813	1.87	0.1827
C:GLICERINA	2.04109	1	2.04109	9.90	0.0039
AB	0.0658354	1	0.0658354	0.32	0.5765
AC	0.00401111	1	0.00401111	0.02	0.8901
BB	0.457127	1	0.457127	2.22	0.1476
BC	0.0000260417	1	0.0000260417	0.00	0.9911

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Error total	5.7724	28	0.206157		
Total (corr.)	75.8943	35			

Nota: La tabla muestra el análisis de varianza de regresión para la variable opacidad.

El coeficiente de determinación (R^2) indicó que el modelo explicó el 92.39 % de la variabilidad observada en la opacidad. El análisis de varianza (ANOVA) evidenció que los factores A (almidón de semilla de palta) y C (glicerina) ejercieron un efecto significativo sobre la opacidad del bioplástico, con valores p inferiores a 0.05. El factor A presentó la mayor influencia sobre la variable respuesta ($F = 325.81$; $p < 0.0001$). Por otro lado, el factor B (harina de café), las interacciones AB, AC y BC, así como el efecto cuadrático BB, no mostraron efectos estadísticamente significativos ($p > 0.05$). Estos resultados indican que la opacidad estuvo determinada principalmente por los efectos individuales del almidón de semilla de palta y la glicerina, sin evidenciarse interacciones significativas entre los factores evaluados.

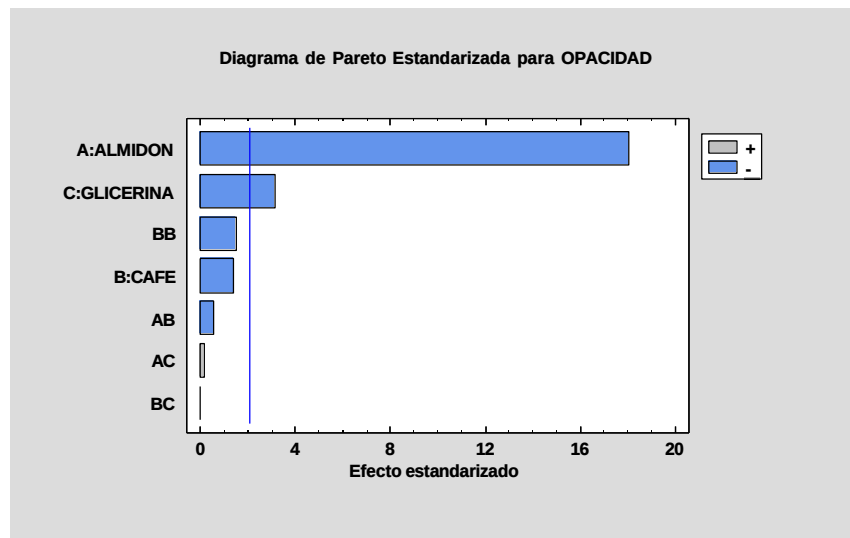
Además, la ecuación de regresión ajustada a los datos presentados en la tabla 25, es la siguiente:

$$\text{OPACIDAD} = 20.6779 - 1.37127 * \text{Almidón} + 0.590421 * \text{Cafe} - 1.74079 * \text{Glicerina} - 0.0261875 * \text{Almidón} * \text{Cafe} + 0.0603175 * \text{Almidón} * \text{Glicerina} - 0.0597604 * \text{Cafe}^2 - 0.00297619 * \text{Cafe} * \text{Glicerina}$$

El diagrama de Pareto estandarizado para la opacidad según la figura 22 mostró que el factor A (almidón de semilla de palta) y C (glicerina) presentó el mayor efecto significativo sobre la variable respuesta, al superar la línea de referencia estadística. Los signos (–) indican efectos negativos, evidenciando que el incremento de los factores tendió a disminuir la opacidad del bioplástico. No obstante, solo el factor A y C fue significativo, mientras que los factores B, las interacciones AB, AC y BC, y el efecto cuadrático BB no mostraron efectos significativos.

Figura 22

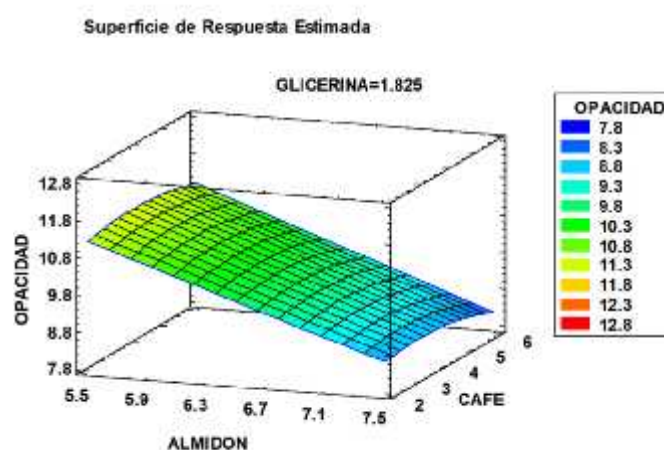
Diagrama de Pareto del efecto de los factores en la opacidad



Las superficies de respuesta estimadas para la opacidad evidenciaron una tendencia decreciente conforme aumentaron los niveles de almidón de semilla de palta, harina de café y glicerina. El almidón de semilla de palta mostró la mayor influencia sobre la reducción de la opacidad seguido de la glicerina, mientras que la harina de café presentó efectos menos pronunciados. En general, las superficies confirmaron el efecto negativo de los factores sobre la opacidad del bioplástico

Figura 23

Superficie de respuesta para la opacidad



Los resultados de opacidad en bioplásticos basados en almidón y glicerina se explican por cambios en la microestructura de la matriz polimérica. Se ha reportado que matrices más homogéneas favorecen la transmisión de la luz, mientras que estructuras

heterogéneas incrementan la dispersión óptica (Liu et al., 2025). Asimismo, se ha reportado que estructuras más uniformes reducen la dispersión óptica, mientras que la presencia de agregados o dominios heterogéneos incrementa la opacidad (Ghosh y Roy, 2022).

El contenido de almidón puede influir de forma no lineal en la opacidad debido a la gelatinización incompleta y agregación de gránulos, lo que aumenta la dispersión de la luz; sin embargo, a mayores concentraciones se forman estructuras más compactas que reducen este efecto (Charles et al., 2022). En cuanto a la glicerina, su efecto plastificante puede reducir la opacidad al mejorar la movilidad molecular, aunque también puede aumentarla si altera el empaquetamiento de las cadenas de almidón o incrementa el espesor del film (Wang et al., 2022).

En conjunto, la opacidad está determinada principalmente por la interacción entre gelatinización del almidón y plastificación por glicerina, siendo la organización estructural del material el factor clave en la respuesta óptica (Ortega-Rubio et al., 2026). Finalmente, la superficie de respuesta indica que una opacidad intermedia es la condición más favorable, al representar un equilibrio adecuado entre protección frente a la luz y funcionalidad del bioplástico (Tassew et al., 2025; Liu et al., 2025).

4.3.3. Solubilidad

En la tabla 28 se puede observar el resultado de solubilidad de los bioplásticos elaborado en base a los tratamientos realizados:

Tabla 28

Promedios de la solubilidad de los tratamientos de bioplástico

Tratamientos	Almidón de semilla de palta %	Harina de residuos de café %	Glicerina %	Solubilidad (%)
Control	5.5%	0%	1.65%	18.72 ± 0.167
T1	5.5%	2%	1.65%	21.50 ± 1.740
T2	5.5%	4%	1.65%	18.94 ± 0.722
T3	5.5%	6%	1.65%	18.82 ± 1.725
T4	5.5%	2%	2.00%	19.21 ± 1.401

Tratamientos	Almidón de semilla de palta %	Harina de residuos de café %	Glicerina %	Solubilidad (%)
T5	5.5%	4%	2.00%	21.68 ± 0.886
T6	5.5%	6%	2.00%	21.83 ± 0.464
T7	7.5%	2%	1.65%	18.73 ± 1.260
T8	7.5%	4%	1.65%	17.61 ± 0.772
T9	7.5%	6%	1.65%	18.18 ± 0.279
T10	7.5%	2%	2.00%	18.68 ± 1.207
T11	7.5%	4%	2.00%	17.25 ± 0.674
T12	7.5%	6%	2.00%	18.04 ± 0.477

Nota: Los valores se expresan como media ± desviación estándar (n = 3)

La Tabla 28 presenta los valores de la solubilidad de los bioplásticos obtenidos en este estudio osciló entre 17.25 y 21.83 %, observándose los menores valores en los tratamientos T11 (17.25 %) y T8 (17.61 %), formulaciones que combinaron 7.5 % de almidón de semilla de palta con 4 % de harina de residuos de café. Estos resultados sugieren que el incremento del contenido de almidón y la incorporación de una concentración intermedia de material lignocelulósico favorecieron la formación de una matriz más compacta y menos susceptible a la acción del agua. Un comportamiento similar fue reportado por Tassew et al. (2025) en películas elaboradas con almidón de semilla de aguacate reforzado con celulosa de enset, donde la incorporación de fibras celulósicas incrementó la cristalinidad y redujo la afinidad de la película por el agua, mejorando sus propiedades de barrera. Por otra parte, los valores de solubilidad obtenidos en esta investigación fueron inferiores a los reportados por Martins et al. (2025) para películas elaboradas exclusivamente con almidón de semilla de aguacate y aceite esencial de aguacate, cuyos valores oscilaron entre 22.43 y 23.44 %. Esta diferencia sugiere que la presencia de harina de residuos de café contribuyó a disminuir la fracción soluble del material mediante el establecimiento de interacciones físicas entre las partículas lignocelulósicas y las cadenas de almidón. Asimismo, Asikkutlu & Yildirim-Yalcin (2025) reportaron un amplio rango de solubilidad (12.13–37.86 %) en películas de almidón de semilla de aguacate plastificadas con glicerol, observando que las formulaciones con mayor contenido de plastificante presentaron mayores porcentajes de solubilidad debido a la naturaleza hidrofílica del

glicerol. Estos resultados son consistentes con lo observado en los tratamientos T5 y T6, donde la concentración de glicerina de 2.00 % estuvo asociada a los mayores valores de solubilidad del estudio.

Esta hipótesis es respaldada por diversos estudios recientes. Jeencham et al. (2024) demostraron que la incorporación de celulosa microcristalina en películas de almidón de yuca disminuyó la solubilidad debido al incremento de la cohesión intermolecular y a la reducción de la movilidad de las cadenas poliméricas. De manera similar, Olusanya et al. (2023) reportaron que la adición de nanopartículas de celulosa incrementó la cristalinidad de bioplásticos a base de almidón y redujo significativamente su interacción con el agua. Asimismo, Ilyas et al. (2023) observaron que la incorporación de fibras lignocelulósicas de palma azucarera en matrices de almidón y alcohol polivinílico (PVA) disminuyó tanto la solubilidad como la absorción de agua debido al fortalecimiento estructural del material. En conjunto, estos hallazgos respaldan la posibilidad de que la harina de residuos de café haya actuado como un agente reforzante, contribuyendo a la formación de una estructura más estable y menos susceptible a la disolución.

Tabla 29*Pruebas de Normalidad para SOLUBILIDAD*

<i>Prueba</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Gl</i>	<i>Valor-P</i>
Estadístico W de Shapiro-Wilk - Solubilidad	0.938183	39	0.03315

Nota: La prueba de Shapiro-Wilk está basada en la comparación de los cuartiles de la distribución normal ajustada a los datos.

En la tabla 29 se muestra el análisis de normalidad realizado obteniendo un valor $p = 0.035 < 0.05$, que es el intervalo de confianza; por lo que se rechaza la hipótesis nula y aceptando la hipótesis alterna; se puede rechazar la idea de que la SOLUBILIDAD proviene de una distribución normal con 95% de confianza; no siguieron una distribución normal en las muestras del bioplástico elaborado con almidón de semilla de palta, harina de café y glicerina. En cuanto al supuesto de la homogeneidad de varianzas se tiene los siguientes resultados:

Tabla 30*Prueba de homogeneidad de varianzas para SOLUBILIDAD*

	Prueba	Valor-P
Levene's	1.99775	0.0680

Nota: Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95.0% de confianza.

De acuerdo a la tabla 30 se muestra un valor de $p = 0.0680 > 0.05$ en la solubilidad, por lo que se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alterna, esto evidencia que las mediciones de solubilidad del bioplástico presentaron una dispersión homogénea, permitiendo asumir consistencia en la variación de los datos entre las diferentes formulaciones analizadas, siendo adecuado aplicar un ANOVA.

Tabla 31*Tabla ANOVA para SOLUBILIDAD*

	Gl	Razón-F	Valor-P
Tratamientos	12	3.00	0.0091

En la tabla 31 el análisis de varianza (ANOVA) para la variable solubilidad mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados ($F = 3.00$; $p = 0.0091$). Debido a que el valor p fue inferior a 0.05, se rechazó la hipótesis nula de igualdad de medias, concluyéndose que los tratamientos ejercieron un efecto significativo sobre la solubilidad de los bioplásticos. La prueba de Tukey HSD para la solubilidad en los bioplásticos, presentada en la tabla 32, demostró un efecto significativo, evidenciado por la formación de subgrupos:

Tabla 32*Prueba de Tukey HSD para SOLUBILIDAD*

TRATAMIENTO	Casos	Media	Grupos Homogéneos
11	3	17.2453	X
8	3	17.6147	XX
12	3	18.044	XX
9	3	18.178	XX
10	3	18.6797	XX

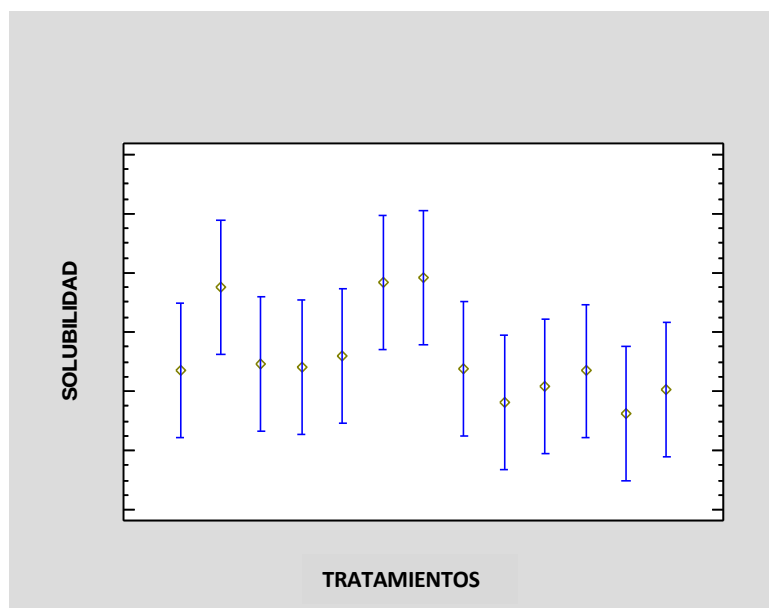
TRATAMIENTO	Casos	Media	Grupos Homogéneos
0	3	18.7233	XX
7	3	18.7367	XX
3	3	18.8217	XX
2	3	18.9407	XX
4	3	19.2123	XX
1	3	21.5017	XX
5	3	21.68	XX
6	3	21.8317	X

Nota: La tabla muestra los resultados obtenidos de la prueba de Tukey HSD para la solubilidad de los tratamientos, arrojado por el programa Statgraphics Centurion

La prueba de Tukey para la variable solubilidad mostró la formación de grupos homogéneos con superposición entre tratamientos, indicando diferencias no significativas entre la mayoría de los tratamientos experimentales ($p > 0.05$). Las medias oscilaron entre 17.2453% (tratamiento 11) y 21.8317% (tratamiento 6), observándose variabilidad moderada en la respuesta sin una separación estadística marcada entre tratamientos.

Figura 24

Gráfico de Medias de opacidad con Intervalos de Confianza del 95% para los 13 Tratamientos



El gráfico de medias mostró diferencias limitadas entre las medias de solubilidad de los tratamientos experimentales. Aunque los tratamientos 5 y 6 presentaron los mayores valores promedio y el tratamiento 11 el menor, el solapamiento de los intervalos de confianza indica similitud estadística entre la mayoría de tratamientos ($p > 0.05$). Se procedió a realizar el ANOVA factorial, para realizar el análisis de varianza en los variables dependientes, como se muestra en la tabla:

Tabla 33

Análisis de varianza para la solubilidad en los tratamientos

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:ALMIDON	45.4928	1	45.4928	18.42	0.0002
B:CAFE	0.590634	1	0.590634	0.24	0.6286
C:GLICERINA	2.10202	1	2.10202	0.85	0.3641
AB	0.48195	1	0.48195	0.20	0.6620
AC	4.04077	1	4.04077	1.64	0.2113
BB	2.04458	1	2.04458	0.83	0.3706
BC	10.2273	1	10.2273	4.14	0.0514
Error total	69.1424	28	2.46937		
Total (corr.)	134.122	35			

Nota: La tabla muestra el análisis de varianza de regresión para la variable solubilidad. El coeficiente de determinación (R^2) indicó que el modelo explicó el 48.45 % de la variabilidad observada en la solubilidad. El análisis de varianza (ANOVA) evidenció que el factor A (almidón de semilla de palta) ejerció un efecto significativo sobre la solubilidad del bioplástico ($F = 18.42$; $p = 0.0002$), indicando que las variaciones en su concentración influyeron significativamente en esta propiedad. B y C con las interacciones AB, AC y BC, así como el efecto cuadrático BB, no presentaron efectos estadísticamente significativos ($p > 0.05$). Aunque la interacción BC mostró un valor próximo al nivel de significancia ($p = 0.0514$), este no fue suficiente para considerarla significativa. Estos resultados indican que la solubilidad dependió principalmente de la concentración de almidón de semilla de palta.

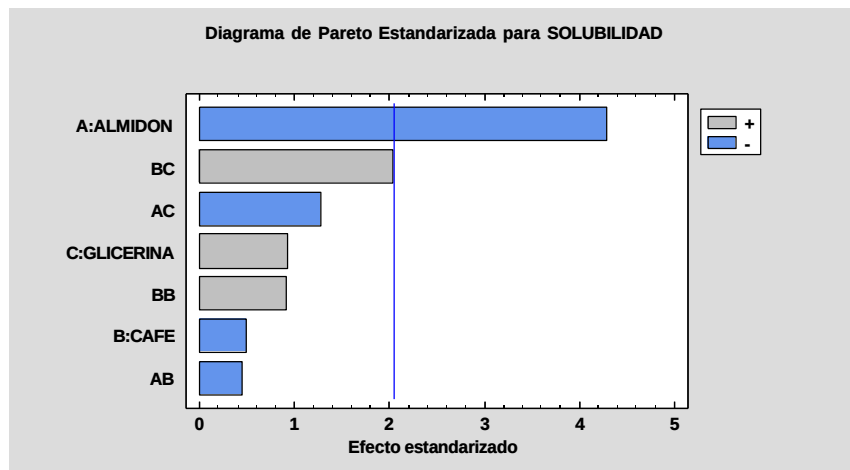
Además, la ecuación de regresión ajustada a los datos presentados en la tabla 25, es la siguiente:

$$\text{SOLUBILIDAD} = 15.0561 + 2.65314 \cdot \text{Almidón} - 4.03281 \cdot \text{Cafe} + 6.36421 \cdot \text{Glicerina} - 0.0708542 \cdot \text{Almidón} \cdot \text{Cafe} - 1.91444 \cdot \text{Almidón} \cdot \text{Glicerina} + 0.126385 \cdot \text{Cafe}^2 + 1.86512 \cdot \text{Cafe} \cdot \text{Glicerina}$$

El diagrama de Pareto estandarizado evidenció que el almidón de semilla de palta (A) fue el único factor con efecto significativo sobre la solubilidad ($p < 0.05$), al superar la línea crítica de referencia. Los demás factores e interacciones (B, C, AB, AC, BC y BB) presentaron efectos estandarizados inferiores al valor crítico, sin influencia estadísticamente significativa sobre la respuesta evaluada.

Figura 25

Diagrama de Pareto del efecto de los factores en la solubilidad



Las superficies de respuesta estimada para la solubilidad evidenciaron un comportamiento no lineal moderado entre los factores evaluados. Se observó que las interacciones entre almidón de semilla de palta, harina de café y glicerina generaron variaciones de la respuesta dentro de un rango aproximado de 17–22%, destacándose una mayor influencia del almidón de semilla de palta, en concordancia con el análisis de Pareto ($p < 0.05$). Las interacciones entre factores mostraron efectos leves a moderados, sin cambios abruptos en la superficie de respuesta.

Figura 26

Superficie de respuesta para la solubilidad



Las formulaciones elaboradas con 7.5 % de almidón presentaron menores porcentajes de solubilidad que aquellas formuladas con 5.5 %. La influencia significativa del almidón puede atribuirse a la formación de una matriz polimérica más densa y cohesiva a medida que aumenta su concentración. Un mayor contenido de almidón favorece las interacciones intermoleculares entre las cadenas de amilosa y amilopectina mediante enlaces de hidrógeno, reduciendo la disponibilidad de grupos hidroxilo libres para interactuar con el agua. Este comportamiento fue reportado por Asikkutlu & Yildirim-Yalcin (2025), quienes observaron que formulaciones con mayor proporción de almidón de semilla de aguacate presentaron menor solubilidad y mejores propiedades de barrera al agua. De manera similar, Martins et al. (2025) señalaron que la elevada proporción de amilosa presente en el almidón de semilla de aguacate favorece la formación de películas más resistentes y menos susceptibles a la acción del agua.

Olusanya et al. (2023) reportaron que la adición de nanopartículas de celulosa aumentó la cristalinidad de los bioplásticos de almidón y redujo su interacción con el agua, mejorando la estabilidad hídrica del material. Respecto a la glicerina, formulados con 2.00 % de glicerina, presentaron los mayores valores de solubilidad. Este comportamiento concuerda con numerosos estudios que atribuyen a la glicerina un efecto plastificante asociado al incremento de la movilidad molecular y a una mayor afinidad por el agua debido a la abundancia de grupos hidroxilo. Investigaciones realizadas en películas de almidón de yuca plastificadas con glicerol reportaron valores de solubilidad comprendidos entre 15.81 y 24.81 %, concluyendo que el aumento del

plastificante incrementa la accesibilidad del agua hacia la matriz polimérica (Rumyaan et al., 2023). De manera similar, películas de almidón de maíz plastificadas con glicerina presentaron solubilidades entre 15.27 y 18.55 %, observándose que las formulaciones con estructuras más compactas exhibieron menores porcentajes de material soluble (Zhang et al., 2024). En consecuencia, los resultados obtenidos demuestran que la reducción de la solubilidad estuvo principalmente asociada al aumento del contenido de almidón, mientras que la harina de residuos de café actuó como agente reforzante complementario y la glicerina moduló la afinidad de la matriz por el agua.

4.4. Propiedades mecánicas del bioplástico

El análisis se centró en la resistencia a la tracción (MPa), la elongación (%) y el módulo de Young (MPa), ya que estos parámetros permiten comparar adecuadamente las propiedades mecánicas de las películas al estar normalizados por el área transversal de las probetas. Por esta razón, no se consideró la fuerza máxima en Newton. Estas variables describen la capacidad de soportar esfuerzos, la flexibilidad y la rigidez del material, respectivamente (Shanbhag et al., 2023; Santhosh et al., 2024).

Tabla 34

Resultados de las propiedades mecánicas evaluadas en los bioplásticos

Tratamientos	Tracción (Mpa)	Elasticidad (%)	Módulo de Young (Mpa)
Control	3.909 ± 0.885	8.878 ± 1.758	256.140 ± 4.912
T1	3.359 ± 0.310	5.850 ± 2.026	235.872 ± 12.782
T2	3.374 ± 1.395	5.735 ± 1.671	247.240 ± 6.410
T3	2.990 ± 0.726	3.748 ± 0.297	218.469 ± 6.742
T4	2.871 ± 0.558	7.792 ± 0.702	244.551 ± 17.782
T5	2.748 ± 0.733	5.992 ± 1.336	235.939 ± 10.118
T6	3.247 ± 0.484	4.356 ± 0.173	219.457 ± 7.104
T7	5.574 ± 0.81	7.644 ± 1.297	234.897 ± 10.929
T8	5.643 ± 0.873	5.809 ± 1.145	217.487 ± 15.893
T9	5.956 ± 1.021	5.212 ± 1.448	205.677 ± 10.153
T10	4.493 ± 1.071	5.917 ± 1.979	204.292 ± 7.559
T11	3.841 ± 0.574	11.393 ± 0.648	200.014 ± 3.196
T12	4.875 ± 0.578	7.832 ± 0.888	192.218 ± 2.172

Nota: Los valores se expresan como media $\pm$ desviación estándar ($n = 3$)

La Tabla 34 presenta los resultados de las propiedades mecánicas de los bioplásticos evaluados. El análisis conjunto de las propiedades mecánicas permitió identificar diferentes comportamientos entre las formulaciones. Los tratamientos T9, T8 y T7, con 7.5% de almidón y 1.65% de glicerina, presentaron las mayores resistencias a la tracción y elongaciones moderadas. Destacó T9 (5.956 MPa), cuya combinación de alta resistencia y rigidez moderada sugiere una adecuada transferencia de esfuerzos dentro de la matriz. Este comportamiento coincide con estudios que reportan mejoras en la resistencia mediante refuerzos lignocelulósicos bien integrados en la matriz polimérica (Muñoz-Gimena et al., 2024; Tassew et al., 2025).

Por otro lado, T11 mostró la mayor elongación (11.393%) y uno de los módulos de Young más bajos, evidenciando una matriz más flexible debido al mayor contenido de glicerina (2.00%). Este resultado concuerda con lo reportado por Tarique et al. (2021) y Santhosh et al. (2024), quienes señalaron que los plastificantes incrementan la movilidad de las cadenas poliméricas y favorecen la deformación. En contraste, el Control presentó el mayor módulo de Young, indicando una mayor rigidez, aunque no la mayor resistencia mecánica. De manera similar, T2 y T4 mostraron módulos elevados sin destacar en resistencia, lo que confirma que una mayor rigidez no necesariamente implica un mejor desempeño mecánico. Según Mäder et al. (2025) y Santhosh et al. (2024), la respuesta mecánica depende de la dispersión y compatibilidad de los refuerzos dentro de la matriz.

En general, las formulaciones con 7.5% de almidón mostraron mejores propiedades de tracción que aquellas con 5.5%. Asimismo, la harina/fibra de café actuó como refuerzo cuando existió suficiente matriz para incorporarla adecuadamente, mientras que el aumento de glicerina favoreció la elongación, pero redujo la resistencia en tratamientos equivalentes, como T9 y T12. Estos resultados evidencian que el equilibrio entre almidón, fibra y plastificante es determinante en el diseño de películas biodegradables con propiedades mecánicas adecuadas (Tarique et al., 2021; Muñoz-Gimena et al., 2024; Martins et al., 2025).

4.4.1. Tracción

Los mayores valores de resistencia a la tracción se obtuvieron en T9 (5.956 MPa), T8 (5.643 MPa) y T7 (5.574 MPa), tratamientos con 7.5% de almidón y 1.65% de glicerina.

Estos resultados indican que una mayor concentración de almidón y un menor contenido de glicerina favorecieron la formación de una matriz más resistente. Asimismo, el incremento de harina/fibra de café de 2 a 6% dentro de este grupo aumentó la resistencia, sugiriendo un efecto de refuerzo asociado a los componentes lignocelulósicos del residuo de café. Resultados similares fueron reportados por Muñoz-Gimena et al. (2024), Tassew et al. (2025), Batista et al. (2023) y Mäder et al. (2025), quienes destacaron el efecto negativo del glicerol sobre la resistencia y el potencial reforzante de materiales ricos en celulosa. El tratamiento T12 presentó una resistencia menor (4.875 MPa) que T9, pese a tener el mismo contenido de almidón y café, lo que evidencia que el aumento de glicerina de 1.65 a 2.00% redujo la resistencia mecánica. Este comportamiento coincide con Tarique et al. (2021), quienes atribuyeron dicho efecto al incremento del volumen libre y a la disminución de las interacciones intermoleculares. El Control alcanzó 3.909 MPa, superando a los tratamientos T1–T6, pero permaneciendo por debajo de aquellos con 7.5% de almidón. La incorporación de café en matrices con 5.5% de almidón no mejoró la resistencia de forma consistente, probablemente por una relación matriz/fibra insuficiente que favoreció la formación de defectos estructurales, tal como señalaron Martins et al. (2025).

Las menores resistencias se registraron en T5 (2.748 MPa), T4 (2.871 MPa) y T3 (2.990 MPa), evidenciando que una baja concentración de almidón combinada con mayores niveles de café o glicerina afecta negativamente las propiedades mecánicas. Estos resultados concuerdan con Santhosh et al. (2024), quienes reportaron que el aumento del plastificante reduce la resistencia de las películas de almidón. Se realizó la prueba de normalidad para los resultados de tracción los cual fue lo siguiente:

Tabla 35

Pruebas de Normalidad para TRACCIÓN

<i>Prueba</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Gl</i>	<i>Valor-P</i>
Estadístico W de Shapiro-Wilk - Tracción	0.973712	39	0.484175

Nota: La prueba de Shapiro-Wilk está basada en la comparación de los cuartiles de la distribución normal ajustada a los datos.

En la tabla 35 la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para la variable tracción mostró un valor de $p = 0.4842$, superior al nivel de significancia de 0.05. Por lo tanto, no se

rechazó la hipótesis de normalidad, indicando que los datos de tracción presentan una distribución normal y cumplen con este supuesto para la aplicación de análisis estadísticos paramétricos. En cuanto al supuesto de la homogeneidad de varianzas se tiene los siguientes resultados:

Tabla 36

Prueba de homogeneidad de varianzas para TRACCIÓN

	Prueba	Valor-P
Levene's	0.991628	0.4823

Nota: Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95.0% de confianza.

De acuerdo a la tabla 36 La prueba de Levene para la variable tracción presentó un valor de $p = 0.4823$, superior al nivel de significancia de 0.05, por lo que no se rechazó la hipótesis de igualdad de varianzas. En consecuencia, se asumió homogeneidad de varianzas entre los tratamientos evaluados, cumpliéndose este supuesto para la aplicación del análisis de varianza (ANOVA).

Tabla 37

Tabla ANOVA para Tracción

	Gl	Razón-F	Valor-P
Tratamientos	12	5.68	0.0001

En la tabla 37 el análisis de varianza (ANOVA) para la variable tracción evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados ($F = 5.68$; $p = 0.0001$). Debido a que el valor p fue inferior a 0.05, se rechazó la hipótesis nula de igualdad de medias, concluyéndose que los tratamientos influyeron significativamente en la resistencia a la tracción de los bioplásticos. La prueba de Duncan para la tracción en los bioplásticos, presentada en la tabla 38 demostró un efecto significativo, evidenciado por la formación de subgrupos:

Tabla 38*Prueba de Duncan para TRACCIÓN*

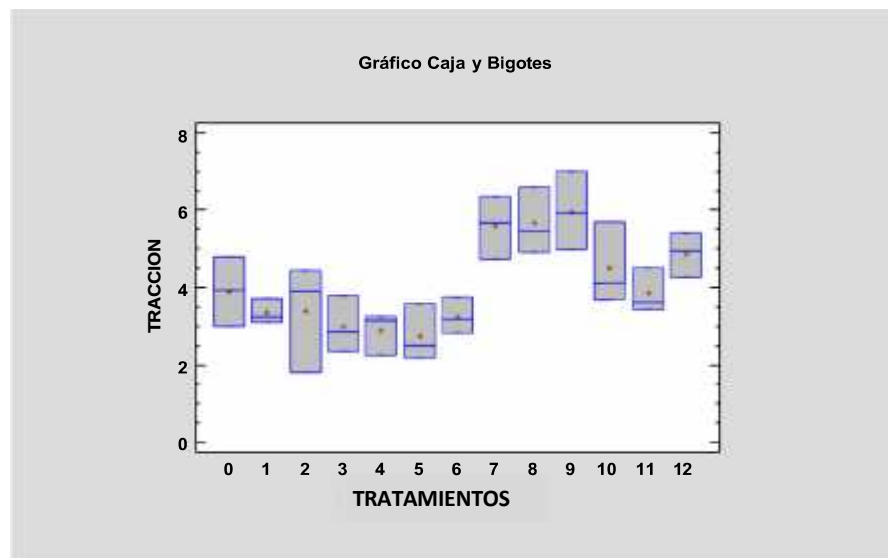
TRATAMIENTO	Casos	Media	Grupos Homogéneos
5	3	2.74767	X
4	3	2.871	X
3	3	2.98967	XX
6	3	3.24733	XX
1	3	3.35867	XXX
2	3	3.37433	XXX
11	3	3.84133	XXX
0	3	3.909	XXX
10	3	4.49267	XXX
12	3	4.87467	XX
7	3	5.574	X
8	3	5.643	X
9	3	5.956	X

Nota: La tabla muestra los resultados obtenidos de la prueba de Duncan para la tracción de los tratamientos, arrojado por el programa Statgraphics Centurion.

La prueba de Duncan mostró diferencias significativas entre los tratamientos para la resistencia a la tracción. El tratamiento control (T0) presentó una media de 3.909 MPa y compartió grupos homogéneos con los tratamientos T1, T2 y T11, por lo que no se observaron diferencias significativas entre ellos ($p > 0.05$). En contraste, los tratamientos T7, T8 y T9 registraron valores de tracción significativamente superiores al control, alcanzando medias de 5.574, 5.643 y 5.956 MPa, respectivamente. Por otro lado, los tratamientos T4 y T5 presentaron las menores resistencias a la tracción, siendo inferiores al control. Estos resultados evidencian que determinadas formulaciones mejoraron significativamente la resistencia mecánica del bioplástico respecto al tratamiento control.

Figura 27

Gráfico de cajas de los tratamientos



El gráfico evidencia una tendencia de incremento en la resistencia a la tracción en los tratamientos T7, T8 y T9 respecto al control (T0), lo que coincide con los resultados obtenidos en el ANOVA y la prueba de Duncan. Además, la dispersión de los datos dentro de cada tratamiento fue relativamente baja, indicando una adecuada reproducibilidad de las mediciones. En contraste, los tratamientos con menores valores de tracción presentaron una menor capacidad de soportar esfuerzos mecánicos, sugiriendo que la composición de la formulación influyó significativamente en esta propiedad. Se procedió a realizar el ANOVA factorial, para realizar el análisis de varianza en los variables dependientes, como se muestra en la tabla:

Tabla 39

Análisis de varianza para la tracción en los tratamientos

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:ALMIDON	34.7687	1	34.7687	56.58	0.0000
B:CAFE	0.223108	1	0.223108	0.36	0.5517
C:GLICERINA	5.81051	1	5.81051	9.46	0.0047
AB	0.214704	1	0.214704	0.35	0.5592
AC	2.4144	1	2.4144	3.93	0.0574

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
BB	0.578529	1	0.578529	0.94	0.3402
BC	0.208321	1	0.208321	0.34	0.5651
Error total	17.2063	28	0.614509		
Total (corr.)	61.4245	35			

Nota: La tabla muestra el análisis de varianza de regresión para la variable tracción

El coeficiente de determinación (R^2) indicó que el modelo explicó el 71.99 % de la variabilidad de la resistencia a la tracción. El ANOVA mostró que el almidón de semilla de palta (A) y la glicerina (C) tuvieron un efecto significativo sobre esta propiedad ($p < 0.05$), siendo el almidón el factor de mayor influencia. En contraste, la harina de café, las interacciones entre factores y el efecto cuadrático BB no presentaron efectos significativos ($p > 0.05$).

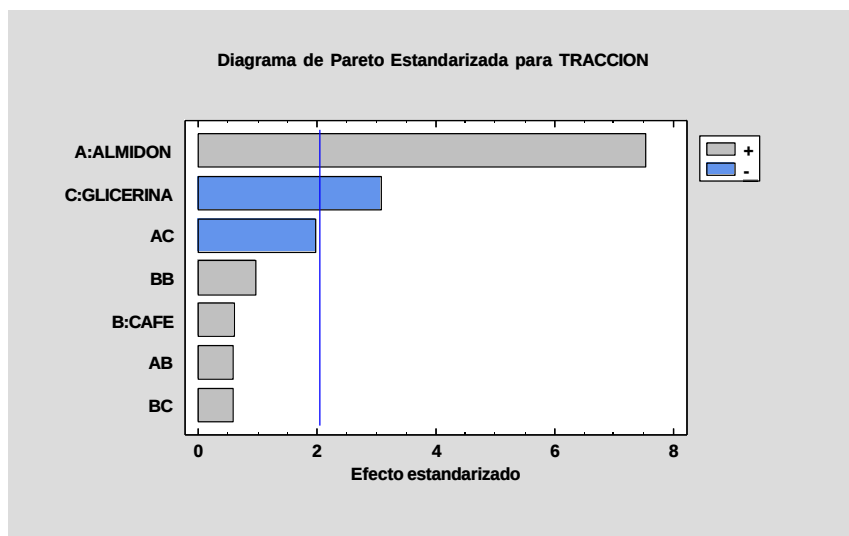
Además, la ecuación de regresión ajustada a los datos presentados en la tabla 25, es la siguiente:

$$\text{TRACCION} = -11.7956 + 3.49429 \cdot \text{Almidón} - 1.28282 \cdot \text{Cafe} + 6.25849 \cdot \text{Glicerina} + 0.0472917 \cdot \text{Almidón} \cdot \text{Cafe} - 1.47984 \cdot \text{Almidón} \cdot \text{Glicerina} + 0.0672292 \cdot \text{Cafe}^2 + 0.26619 \cdot \text{Cafe} \cdot \text{Glicerina}$$

De acuerdo con el diagrama de Pareto, los factores A (almidón de semilla de palta) y C (glicerina) superaron la línea de referencia de significancia, indicando una influencia estadísticamente significativa sobre la resistencia a la tracción. El efecto del almidón fue positivo y de mayor magnitud, mientras que la glicerina presentó un efecto significativo de menor intensidad. En contraste, la harina de café (B), las interacciones AB y BC, y el efecto cuadrático BB no alcanzaron el nivel de significancia, por lo que su influencia sobre la tracción fue limitada.

Figura 28

Diagrama de Pareto del efecto de los factores en la tracción



La superficie de respuesta indica que la resistencia a la tracción se incrementa principalmente con el aumento de la concentración de almidón de semilla de palta, alcanzando los mayores valores en las formulaciones con niveles altos de almidón y harina de café. Este comportamiento coincide con el ANOVA y el diagrama de Pareto, donde el almidón fue identificado como el factor de mayor influencia sobre la tracción. Por el contrario, la harina de café mostró un efecto menor sobre esta propiedad mecánica.

Figura 29

Superficie de respuesta para la Tracción



La resistencia a la tracción de los bioplásticos elaborados a partir de almidón de semilla de palta, harina de residuos de café y glicerina presentó valores entre 2.748 ± 0.733 y

5.956 $\pm$ 1.021 MPa. Estos resultados evidencian que la capacidad del material para soportar esfuerzos de tensión estuvo influenciada principalmente por la concentración de almidón, el contenido de harina de café y la cantidad de plastificante incorporado. Los tratamientos formulados con 7.5% de almidón presentaron, en general, mayores valores de resistencia que aquellos elaborados con 5.5%, lo que sugiere una mayor cohesión de la matriz polimérica. Este comportamiento coincide con lo reportado por Martins et al. (2025), quienes evaluaron películas elaboradas con concentraciones de almidón de semilla de palta entre 2 y 5 g/100 mL y observaron que la resistencia a la tracción aumentó de 6.12 a 6.97 MPa cuando la concentración de almidón se incrementó de 2 a 4 g/100 mL. Los autores atribuyeron este comportamiento a una mejora de las interacciones intermoleculares y a una distribución más eficiente de los esfuerzos dentro de la película.

Asimismo, el incremento de la harina de residuos de café favoreció la resistencia mecánica, especialmente en los tratamientos con menor contenido de glicerina. Este comportamiento es comparable a lo descrito por Muñoz-Gimena et al. (2026), quienes reportaron que la incorporación de nanocristales de almidón desde 0 hasta 3% incrementó la resistencia de 4.2 a 6.8 MPa debido a una mejor transferencia de esfuerzos entre la matriz y el refuerzo. De forma similar, Jeencham et al. (2024) observaron que la adición de celulosa microcristalina desde 1 hasta 5% elevó la resistencia de 3.21 a 11.18 MPa, atribuyendo este efecto a la formación de una red de enlaces de hidrógeno entre la fase reforzante y la matriz polimérica. Asimismo, la harina de residuos de café contribuyó al incremento de la resistencia mecánica, comportamiento similar al descrito por Al Fath et al. (2023), quienes reportaron un efecto reforzante de materiales lignocelulósicos en bioplásticos a base de almidón de semilla de palta.

Por el contrario, el aumento de glicerina de 1.65% a 2.00% tendió a reducir la resistencia a la tracción. Esta tendencia coincide con lo reportado por Machaca (2022), quien observó una disminución de la resistencia de 2.82 a 0.47 MPa al incrementar la cantidad de glicerina. En conjunto, los resultados demuestran que una mayor concentración de almidón y la incorporación de harina de café fortalecieron la estructura del bioplástico, mientras que el incremento de glicerina ejerció un efecto plastificante que redujo su resistencia mecánica.

4.4.2. Elasticidad

La elongación presentó diferencias significativas entre tratamientos (ANOVA, $F = 7.199$; $p < 0.001$). Los mayores valores se observaron en T11 (11.393%), Control (8.878%), T12 (7.832%), T4 (7.792%) y T7 (7.644%), lo que indica una mayor capacidad de deformación antes de la ruptura. Esta propiedad está influenciada por la movilidad de las cadenas poliméricas, favorecida por la glicerina, y por la presencia de fibras, que pueden restringir la deformación cuando aumentan la rigidez de la matriz (Tarique et al., 2021; Santhosh et al., 2024). El T11 presentó la mayor elongación, sugiriendo que la combinación de 7.5% de almidón, 4% de café y 2.00% de glicerina generó un balance adecuado entre flexibilidad y estructura. De manera similar, el Control mostró una elongación elevada, posiblemente debido a la ausencia de partículas de café que actuaran como puntos de ruptura. Estos resultados coinciden con Muñoz-Gimena et al. (2024), quienes reportaron que el glicerol reduce la fragilidad de las películas de almidón.

Aunque T12 tuvo el mismo contenido de almidón y glicerina que T11, su menor elongación sugiere que el incremento de café de 4 a 6% aumentó la rigidez de la matriz. Este comportamiento también fue reportado por Mäder et al. (2025), quienes observaron una disminución de la elongación con mayores contenidos de residuo de café. Por otro lado, T4 presentó alta elongación pese a su baja resistencia, evidenciando el efecto plastificante de la glicerina en matrices con menor contenido de almidón (Dewi et al., 2024; Tarique et al., 2021). En contraste, T3 (3.748%) y T6 (4.356%) mostraron los valores más bajos, lo que indica que una carga elevada de café (6%) redujo la capacidad de deformación de la matriz, resultado consistente con lo señalado por Tassew et al. (2025). En general, los resultados muestran que la elongación depende no solo de la concentración de glicerina, sino también del contenido y la dispersión de la harina/fibra de café dentro de la matriz (Santhosh et al., 2024; Martins et al., 2025). Se realizó la prueba de normalidad para los resultados de elasticidad los cual fue lo siguiente:

Tabla 40

Pruebas de Normalidad para ELASTICIDAD

<i>Prueba</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Gl</i>	<i>Valor-P</i>
Estadístico W de Shapiro-Wilk - Elasticidad	0.940843	39	0.0505

Nota: La prueba de Shapiro-Wilk está basada en la comparación de los cuartiles de la distribución normal ajustada a los datos.

En la tabla 40 la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para la variable elasticidad presentó un valor de $p = 0.0505$, superior al nivel de significancia de 0.05. Por lo tanto, no se rechazó la hipótesis nula de normalidad, concluyéndose que los datos de elasticidad presentan una distribución aproximadamente normal y cumplen con este supuesto para la aplicación de pruebas paramétricas. En cuanto al supuesto de la homogeneidad de varianzas se tiene los siguientes resultados:

Tabla 41

Prueba de homogeneidad de varianzas para ELASTICIDAD

	<i>Prueba</i>	<i>Valor-P</i>
Levene's	1.39549	0.0503

Nota: Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95.0% de confianza.

De acuerdo a la tabla 41 se muestra la prueba de Shapiro-Wilk mostró que los datos de elasticidad presentaron una distribución normal ($p = 0.0505$). Asimismo, la prueba de Levene evidenció homogeneidad de varianzas entre los tratamientos ($p = 0.0503$). En consecuencia, se cumplieron los supuestos requeridos para la aplicación del análisis de varianza (ANOVA).

Tabla 42

Tabla ANOVA para Elasticidad

	<i>Gl</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Tratamientos	12	7.20	0.0001

En la tabla 42 el análisis de varianza (ANOVA) para la variable elasticidad mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados ($F = 7.20$; $p = 0.0001$). Debido a que el valor p fue inferior a 0.05, se rechazó la hipótesis nula de igualdad de medias, concluyéndose que los tratamientos influyeron significativamente en la elasticidad de los bioplásticos.

La prueba de Duncan para la elasticidad en los bioplásticos, presentada en la tabla 43, demostró un efecto significativo, evidenciado por la formación de subgrupos

Tabla 43

Prueba de Duncan para ELASTICIDAD

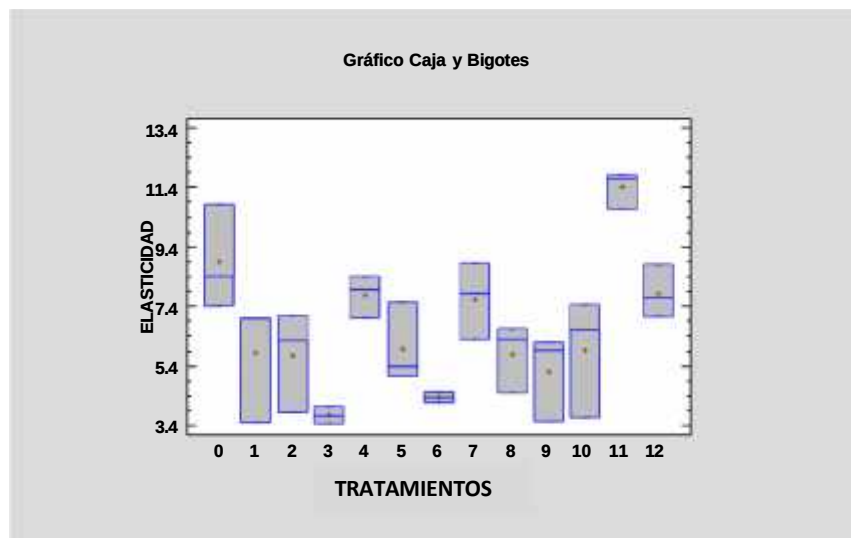
TRATAMIENTO	Casos	Media	Grupos Homogéneos
3	3	3.74833	X
6	3	4.35633	X
9	3	5.21167	XX
2	3	5.73533	XXX
8	3	5.80867	XXX
1	3	5.85	XXX
10	3	5.917	XXX
5	3	5.992	XXX
7	3	7.64367	XXX
4	3	7.79167	XX
12	3	7.832	XX
0	3	8.87733	X
11	3	11.393	X

Nota: La tabla muestra los resultados obtenidos de la prueba de Duncan para la elasticidad de los tratamientos, arrojado por el programa Statgraphics Centurion.

La prueba de Duncan mostró diferencias significativas entre los tratamientos para la elasticidad, tomando como referencia al tratamiento control T0 (8.87733), el cual presentó el mayor valor y fue superior a la mayoría de tratamientos evaluados. En contraste, T3 registró la menor media (3.74833), sin diferencias significativas con T6 (4.35633) ($p > 0.05$). Los tratamientos intermedios (T9, T2, T8, T1, T10 y T5) presentaron valores entre 5.21167 y 5.992, sin diferencias significativas entre ellos y generalmente inferiores al control. En conjunto, los resultados evidencian el mayor desempeño del T0 frente al resto de tratamientos.

Figura 30

Gráfico de cajas de los tratamientos



El gráfico de caja y bigotes evidencia variaciones en la elasticidad entre los tratamientos, tomando como referencia el control T0, el cual presenta uno de los valores más altos y una dispersión moderada de los datos. En general, varios tratamientos muestran valores inferiores al T0, especialmente T3 y T6, que registran las menores elasticidades del conjunto. Por otro lado, los tratamientos T7, T4, T12 y especialmente T11 destacan por presentar valores más altos o cercanos al control, lo que indica un mejor desempeño mecánico en comparación con el resto. Además, la dispersión dentro de cada tratamiento es relativamente baja en la mayoría de casos, lo que sugiere una buena consistencia en las mediciones. En conjunto, se observa que la formulación influye significativamente en la elasticidad del material. Se procedió a realizar el ANOVA factorial, para realizar el análisis de varianza en los variables dependientes, como se muestra en la tabla:

Tabla 44

Análisis de varianza para la elasticidad en los tratamientos

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:ALMIDON	26.6893	1	26.6893	8.98	0.0057
B:CAFE	13.7441	1	13.7441	4.63	0.0403
C:GLICERINA	21.5497	1	21.5497	7.25	0.0118

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
AB	9.45015	1	9.45015	3.18	0.0853
AC	3.37028	1	3.37028	1.13	0.2959
BB	11.2987	1	11.2987	3.80	0.0612
BC	3.40507	1	3.40507	1.15	0.2935
Error total	83.1787	28	2.97067		
Total (corr.)	172.686	35			

Nota: La tabla muestra el análisis de varianza de regresión para la variable elasticidad. El valor de R-cuadrada muestra que el modelo ajustado explica el 51.8324 % de la variabilidad en la elasticidad. El análisis de varianza (ANOVA) para la elasticidad mostró que el factor A (almidón de semilla de palta), el factor B (harina de café) y el factor C (glicerina) ejercieron efectos significativos sobre la variable respuesta (A: $p = 0.0057$; B: $p = 0.0403$; C: $p = 0.0118$), indicando que las variaciones en sus concentraciones influyeron directamente en la elasticidad del bioplástico. En contraste, las interacciones entre factores (AB, AC y BC) y el efecto cuadrático BB no presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$), evidenciando una menor influencia estadística sobre la elasticidad. Estos resultados indican que la elasticidad estuvo determinada principalmente por los efectos individuales de los componentes de la formulación y no por la interacción entre ellos.

Además, la ecuación de regresión ajustada a los datos presentados en la tabla 25, es la siguiente:

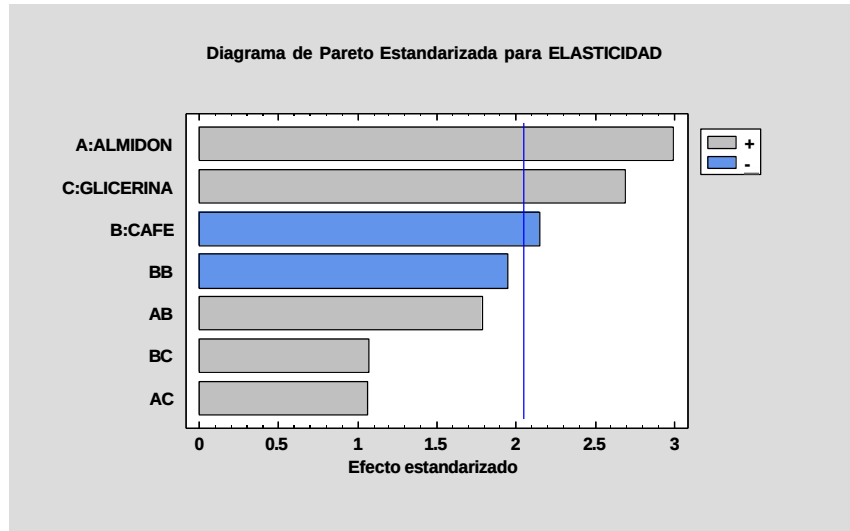
$$\text{ELASTICIDAD} = 27.0811 - 3.58483 \cdot \text{Almidon} - 2.00496 \cdot \text{Cafe} - 11.2483 \cdot \text{Glicerina} + 0.31375 \cdot \text{Almidon} \cdot \text{Cafe} + 1.74841 \cdot \text{Almidon} \cdot \text{Glicerina} - 0.297104 \cdot \text{Cafe}^2 + 1.07619 \cdot \text{Cafe} \cdot \text{Glicerina}$$

El diagrama de Pareto estandarizado mostró que los factores almidón (A) y glicerina (C) presentaron efectos positivos y estadísticamente significativos sobre la elasticidad del bioplástico, al superar el valor crítico de referencia. Esto indica que un incremento en estos factores favorece el aumento de la elasticidad del material. En contraste, la harina de café (B) presentó un efecto negativo significativo, sugiriendo que mayores concentraciones de este componente reducen la elasticidad del bioplástico. Respecto a

las interacciones y efectos cuadráticos evaluados (BB, AB, BC y AC), estas no fueron significativas, dado que no sobrepasaron el límite crítico establecido.

Figura 31

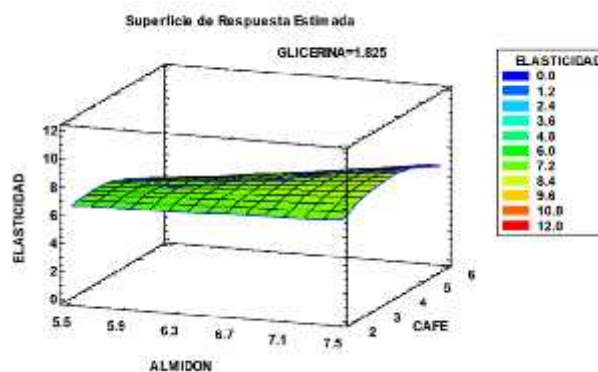
Diagrama de Pareto del efecto de los factores en la elasticidad



La superficie de respuesta estimada para la elasticidad mostró que el incremento del contenido de almidón favoreció un aumento de la elasticidad del bioplástico, evidenciando un efecto positivo sobre la variable respuesta. Por otro lado, el aumento de harina de café presentó una tendencia inversa, disminuyendo ligeramente la elasticidad, lo cual confirma su efecto negativo. Asimismo, la interacción entre ambos factores no mostró variaciones abruptas en la superficie, sugiriendo una baja influencia conjunta sobre la respuesta.

Figura 32

Superficie de respuesta para la elasticidad



La elongación a la rotura de los bioplásticos evaluados presentó valores comprendidos entre 3.748 ± 0.297 y $11.393 \pm 0.648\%$. Este parámetro refleja la capacidad del material para deformarse antes de fracturarse y constituye un indicador importante de su flexibilidad. Los resultados obtenidos evidenciaron que el incremento de la concentración de glicerina favoreció la elongación de las películas. Este comportamiento coincide con lo reportado por Machaca (2022), quien observó que al incrementar la glicerina de 5 a 15 mL la elongación aumentó de 11.45 a 17.62%. De manera similar, Rumyaan et al. (2022) señalaron que el incremento de la concentración de glicerol produjo elongaciones entre 13.33 y 29.00%, atribuyendo este comportamiento a la capacidad del plastificante para reducir las fuerzas intermoleculares y aumentar la movilidad de las cadenas poliméricas. Según estos autores, la glicerina incrementa la distancia entre cadenas de almidón y genera una matriz menos densa y más flexible. Sin embargo, Tassew, et al. (2025) reportaron elongaciones entre 3.23 - 8.27%, observando que el incremento de celulosa y glicerol redujo la capacidad de estiramiento de las películas. Los autores atribuyeron este comportamiento a la aglomeración de partículas de celulosa y a la disminución de la movilidad de las cadenas de almidón, lo que redujo la flexibilidad del material, en nuestro caso por la presencia de harina de residuos de café, cuyas partículas lignocelulósicas restringen parcialmente la movilidad molecular.

En este sentido, Jeencham et al. (2024) reportaron que al incrementar la concentración de celulosa microcristalina de 1 a 5%, la elongación disminuyó de 44.74 a 4.15%, debido a que el refuerzo limita la capacidad de estiramiento de la matriz. Un comportamiento similar parece haber ocurrido en los tratamientos con mayores porcentajes de harina de café, donde la presencia de componentes lignocelulósicos redujo la deformación del material. Por tanto, la elongación observada fue el resultado del equilibrio entre el efecto plastificante de la glicerina y el efecto rigidizante ejercido por la harina de residuos de café.

4.4.3. Módulo de Young

El módulo de Young presentó diferencias significativas entre tratamientos (ANOVA, $F = 12.093$; $p < 0.001$). Los valores más altos se registraron en el Control (256.140 MPa), T2 (247.240 MPa), T4 (244.551 MPa), T5 (235.939 MPa), T1 (235.872 MPa) y T7 (234.897 MPa), indicando una mayor rigidez y menor capacidad de deformación en la

región elástica. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Tarique et al. (2021) y Muñoz-Gimena et al. (2024), quienes señalaron que el incremento de glicerol reduce la rigidez al disminuir las interacciones intermoleculares entre cadenas de almidón. El control presentó el mayor módulo, lo que sugiere una matriz de almidón más continua y cohesiva en ausencia de harina/fibra de café. Asimismo, T1 y T2 mantuvieron módulos elevados, indicando que bajas concentraciones de café pueden contribuir a la rigidez inicial de la matriz; sin embargo, esto no se tradujo necesariamente en una mayor resistencia, posiblemente debido a defectos interfaciales entre matriz y refuerzo (Mäder et al., 2025; Santhosh et al., 2024). De manera similar, T4 y T5 mostraron alta rigidez, aunque con baja resistencia, evidenciando que la presencia de café puede restringir la deformación inicial sin mejorar la cohesión estructural. Batista et al. (2023) señalaron que la respuesta mecánica de películas con residuos de café depende de la compatibilidad entre sus componentes.

Por el contrario, T9, T10, T11 y T12 presentaron los módulos más bajos (192.218–205.677 MPa), lo que refleja matrices más flexibles. En particular, T11 y T12 coincidieron con los mayores valores de elongación, mientras que T9 combinó la mayor resistencia a la tracción con una rigidez moderada, una característica favorable para aplicaciones donde se requiere resistencia y cierta capacidad de deformación. Resultados similares fueron reportados por Tasew et al. (2025) y Mäder et al. (2025), quienes indicaron que la proporción de almidón, glicerol y residuos lignocelulósicos influye simultáneamente en la rigidez y la deformabilidad de los biocompuestos. En conjunto, los resultados evidencian que el módulo de Young debe interpretarse junto con la resistencia y la elongación, ya que una mayor rigidez no implica necesariamente una mayor resistencia mecánica ni un mejor desempeño para aplicaciones flexibles (Shanbhag et al., 2023). Se realizó la prueba de normalidad para los resultados de módulo de young los cual fue lo siguiente:

Tabla 45

Pruebas de Normalidad para MODULO DE YOUNG

<i>Prueba</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Gl</i>	<i>Valor-P</i>
Estadístico W de Shapiro-Wilk – Módulo de Young	0.952372	39	0.0987

Nota: La prueba de Shapiro-Wilk está basada en la comparación de los cuartiles de la distribución normal ajustada a los datos.

En la tabla 45 la prueba de normalidad de Shapiro–Wilk aplicada a los datos del módulo de Young mostró un valor de $p = 0.0987$, superior al nivel de significancia de 0.05, por lo que no se rechazó la hipótesis nula de normalidad. En consecuencia, se concluye que los datos presentan una distribución normal. En cuanto al supuesto de la homogeneidad de varianzas se tiene los siguientes resultados:

Tabla 46

Prueba de homogeneidad de varianzas para MODULO DE YOUNG

	<i>Prueba</i>	<i>Valor-P</i>
Levene's	1.45917	0.2028

Nota: Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95.0% de confianza.

La prueba de homogeneidad de varianzas de Levene mostró un valor de $p = 0.2028$, superior al nivel de significancia de 0.05, por lo que no se rechazó la hipótesis nula. En consecuencia, se concluye que las varianzas entre tratamientos son homogéneas, cumpliéndose el supuesto de homocedasticidad requerido para la aplicación del análisis de varianza (ANOVA).

Tabla 47

Tabla ANOVA para Modulo de Young

	<i>Gl</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Tratamientos	12	12.09	0.0001

En la tabla 47 el análisis de varianza (ANOVA) para el módulo de Young mostró diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($F = 12.01$; $p = 0.0001$), evidenciando que las formulaciones evaluadas influyeron significativamente sobre esta propiedad mecánica del bioplástico. Asimismo, dado que se cumplieron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, se valida la confiabilidad del modelo estadístico empleado.

La prueba de Duncan para módulo de Young en los bioplásticos, presentada en la tabla 48, demostró un efecto significativo, evidenciado por la formación de subgrupos

Tabla 48

Prueba de Duncan para MODULO DE YOUNG

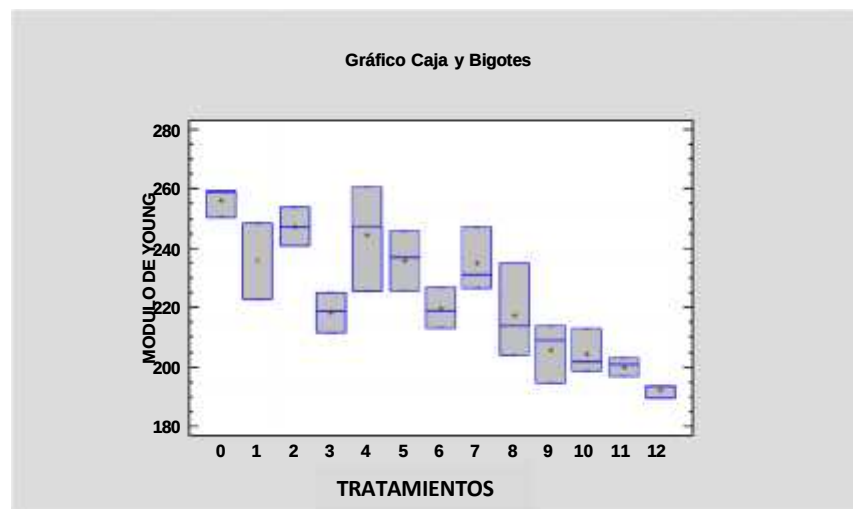
TRATAMIENTO	Casos	Media	Grupos Homogéneos
12	3	192.218	X
11	3	200.014	XX
10	3	204.292	XXX
9	3	205.677	XXX
8	3	217.487	XXX
3	3	218.469	XXX
6	3	219.457	XX
7	3	234.897	XX
1	3	235.872	XX
5	3	235.939	XX
4	3	244.551	XX
2	3	247.24	XX
0	3	256.14	X

Nota: La tabla muestra los resultados obtenidos de la prueba de Duncan para el módulo de young de los tratamientos, arrojado por el programa Statgraphics Centurion

La prueba de comparación múltiple de Duncan evidenció diferencias significativas entre tratamientos para el módulo de Young, agrupando las formulaciones en subconjuntos homogéneos. El tratamiento correspondiente al tratamiento 0 presentó el mayor valor promedio (256.14), mientras que el tratamiento 12 registró el menor valor (192.22), evidenciando variaciones en la rigidez del bioplástico en función de la formulación empleada.

Figura 33

Gráfico de cajas de los tratamientos



El gráfico de caja y bigotes del módulo de Young evidenció diferencias en la distribución de los valores entre tratamientos, observándose mayores valores en los tratamientos 0, 2 y 4, mientras que los tratamientos 11 y 12 presentaron los menores valores. Asimismo, la dispersión reducida entre repeticiones y la ausencia de valores atípicos sugieren una adecuada reproducibilidad experimental y consistencia de las mediciones realizadas.

Tabla 49

Análisis de varianza para el módulo de Young en los tratamientos

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:ALMIDON	5398.13	1	5398.13	45.01	0.0000
B:CAFE	2632.89	1	2632.89	21.95	0.0001
C:GLICERINA	997.654	1	997.654	8.32	0.0075
AB	0.542703	1	0.542703	0.00	0.9468
AC	897.062	1	897.062	7.48	0.0107
BB	263.623	1	263.623	2.20	0.1494
BC	33.5286	1	33.5286	0.28	0.6012
Error total	3358.37	28	119.942		
Total (corr.)	13581.8	35			

Nota: La tabla muestra el análisis de varianza de regresión para la variable de módulo de Young

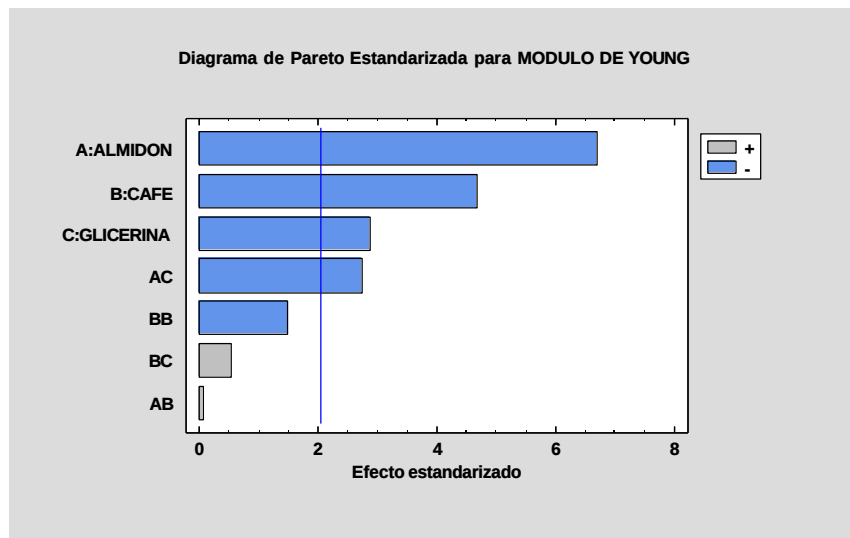
El modelo ajustado explicó el 75.273 % de la variabilidad del Módulo de Young. El análisis ANOVA mostró que el almidón (A), la harina de café (B) y la glicerina (C) tuvieron un efecto significativo sobre esta propiedad ($p < 0.05$), indicando su influencia en la rigidez del bioplástico. Asimismo, la interacción almidón $\times$ glicerina (AC) también fue significativa ($p = 0.0107$), mientras que las interacciones AB, BC y el efecto cuadrático BB no presentaron significancia estadística ($p > 0.05$). En conjunto, estos resultados evidencian que el Módulo de Young estuvo determinado principalmente por los efectos individuales de los componentes y la interacción entre almidón y glicerina. Además, la ecuación de regresión ajustada a los datos presentados en la tabla 49 es la siguiente:

$$\begin{aligned} \text{MODULO DE YOUNG} = & 45.8816 + 39.5116 * \text{Almidon} - 0.40785 * \text{Cafe} + \\ & 141.821 * \text{Glicerina} + \\ & 0.0751875 * \text{Almidón} * \text{Cafe} - 28.5248 * \text{Almidón} * \text{Glicerina} - 1.43511 * \text{Cafe}^2 + \\ & 3.37702 * \text{Cafe} * \text{Glicerina} \end{aligned}$$

El diagrama de Pareto estandarizado para el Módulo de Young mostró que el almidón (A) presentó el mayor efecto sobre la variable respuesta, seguido de la harina de café (B), la glicerina (C) y la interacción almidón $\times$ glicerina (AC), superando el valor crítico de referencia y evidenciando un efecto estadísticamente significativo. Asimismo, se observó que los factores almidón, harina de café y glicerina presentaron un efecto negativo (-) sobre el Módulo de Young, indicando que el incremento de sus concentraciones tendió a disminuir la rigidez del bioplástico. En contraste, las interacciones AB y BC, así como el efecto cuadrático BB, no superaron el límite de significancia, evidenciando una menor influencia estadística sobre esta propiedad mecánica.

Figura 34

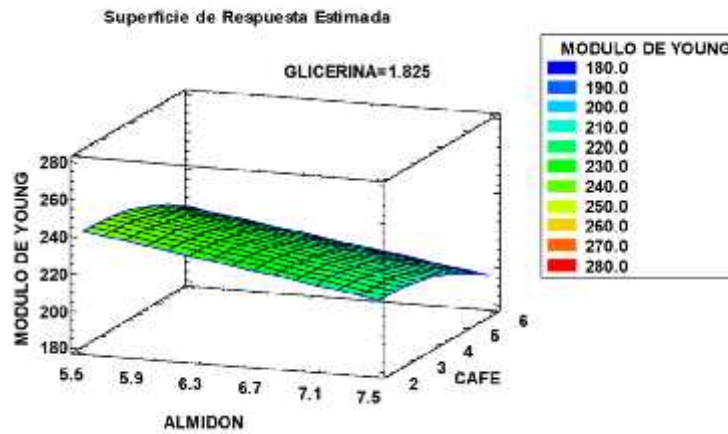
Diagrama de Pareto del efecto de los factores en el módulo de Young



La superficie de respuesta estimada para el módulo de Young mostró una tendencia lineal negativa moderada en función de los factores evaluados. Se observó que el incremento de la concentración de glicerina produjo una disminución gradual del módulo de Young, mientras que las variaciones en el contenido de almidón generaron cambios menos pronunciados en la respuesta. Los valores predichos se distribuyeron aproximadamente entre 220 y 250 MPa, evidenciando una mayor sensibilidad del módulo de Young frente a la concentración de glicerina. Asimismo, la superficie presentó una pendiente suave y uniforme, sin curvaturas marcadas ni cambios abruptos, lo que indica que las interacciones entre los factores evaluados fueron leves dentro del rango experimental estudiado.

Figura 35

Superficie de respuesta para el módulo de Young



El módulo de Young de los bioplásticos obtenidos osciló entre 192.218 ± 2.172 y 256.140 ± 4.912 MPa, Estos resultados indican que las películas desarrolladas presentaron una rigidez moderada, característica importante para materiales destinados a aplicaciones de empaque biodegradable. Los valores obtenidos fueron superiores a los reportados por Martins et al. (2025), quienes encontraron módulos de Young entre 92.97 y 154.88 MPa en películas elaboradas con almidón de semilla de palta. Esta diferencia sugiere que la incorporación de harina de residuos de café contribuyó a incrementar la resistencia a la deformación debido a la presencia de compuestos lignocelulósicos con capacidad reforzante. Un comportamiento similar fue descrito por Muñoz-Gimena et al. (2026), quienes observaron que la incorporación de nanocristales de almidón hasta 3% incrementó el módulo de Young desde 112.9 hasta 188.9 MPa. Los autores atribuyeron este resultado a una mayor interacción entre el refuerzo y la matriz, así como a una restricción de la movilidad de las cadenas de almidón. Del mismo modo, Jeencham et al. (2024) reportaron que el aumento de celulosa microcristalina de 1 a 5% elevó el módulo de Young desde 112.12 hasta 488.89 MPa, demostrando que los materiales lignocelulósicos pueden incrementar significativamente la rigidez de las películas.

No obstante, en la presente investigación se observó una disminución progresiva del módulo de Young conforme aumentó la concentración de glicerina. Este comportamiento coincide con lo descrito por Tassew et al. (2025), quienes señalan que los plastificantes incrementan el volumen libre entre cadenas poliméricas y reducen las

fuerzas de cohesión, facilitando la deformación bajo esfuerzos mecánicos. Como consecuencia, las películas se vuelven menos rígidas y más flexibles.

La relación inversa observada entre elongación y módulo de Young confirma este comportamiento. Los tratamientos con menor rigidez presentaron mayores capacidades de deformación, mientras que aquellos con módulos más elevados mostraron menor elasticidad. En consecuencia, la rigidez de las películas estuvo determinada por el equilibrio entre el efecto reforzante de la harina de residuos de café y la acción plastificante de la glicerina, factores que definieron el comportamiento mecánico final del material.

Mediante la aplicación de la optimización multirrespuesta a través de la función de deseabilidad, se identificó la combinación óptima de factores experimentales que permite optimizar simultáneamente diversas variables de interés. En este estudio, se maximizó el espesor (mm), tracción (MPa), se minimizó la solubilidad (%) y se fijó un valor intermedio para opacidad (%), elasticidad (%) y módulo de Young (Mpa) cada uno con el impacto correspondiente y deseable alcanzando un valor óptimo de deseabilidad de 0.726242 como se observa en la tabla 50. Este análisis se realizó específicamente con los datos obtenidos de los bioplásticos con sus réplicas utilizando un enfoque integral que evaluó las seis variables de respuesta de manera conjunta para determinar las condiciones experimentales para su aplicación en la conservación de uva.

Tabla 50*Optimización de Múltiples Respuestas*

<i>Trat.</i>	<i>Almidón de semilla de palta %</i>	<i>Harina de residuos de café %</i>	<i>Glicerina %</i>	<i>Espesor mm</i>	<i>Opacidad %</i>	<i>Solubilidad %</i>	<i>Tracción MPa</i>	<i>Elasticidad %</i>	<i>Módulo De Young MPa</i>	<i>Deseabilidad Prevista</i>	<i>Deseabilidad Observada</i>
1	5.5	2	1.65	0.162	10.459	22.979	3.109	7.014	236.448	0.389238	0.0
7	7.5	2	1.65	0.153	8.59	18.945	6.341	8.842	247.274	0.631164	0.478874
2	5.5	4	1.65	0.159	12.218	19.444	4.444	6.243	240.933	0.412638	0.0
8	7.5	4	1.65	0.179	8.239	16.886	6.602	6.649	213.895	0.725651	0.68599
3	5.5	6	1.65	0.181	11.215	16.234	2.356	4.056	211.68	0.0	0.340603
9	7.5	6	1.65	0.201	8.425	17.759	4.963	5.912	194.342	0.583144	0.483795
4	5.5	2	2	0.176	11.032	17.11	2.231	7.024	225.546	0.417394	0.490584
10	7.5	2	2	0.195	7.974	17.584	3.658	3.684	198.399	0.597291	0.249344
5	5.5	4	2	0.162	10.859	22.0	2.18	5.073	236.637	0.419541	0.243946
11	7.5	4	2	0.189	7.881	16.545	4.497	11.688	200.668	0.539529	0.0
6	5.5	6	2	0.187	10.258	22.408	3.763	4.529	212.707	0.358935	0.325189
12	7.5	6	2	0.198	8.113	18.458	4.269	7.028	193.554	0.0	0.432315

La optimización multicriterio mediante la función de deseabilidad permitió identificar las condiciones más favorables para la obtención del bioplástico a base de almidón de semilla de palta reforzado con harina de residuos de café. El modelo predijo como formulación óptima una composición de 7.5 % de almidón, 3.87 % de harina de café y 1.65 % de glicerina, evidenciando un equilibrio global adecuado de las propiedades evaluadas. Debido a que esta proporción no coincidió exactamente con un tratamiento experimental, se seleccionó el más cercano dentro del diseño factorial, correspondiente al TRATAMIENTO 8 (7.5 % de almidón, 4 % de harina de café y 1.65 % de glicerina), el cual fue considerado como la formulación óptima experimental para las evaluaciones posteriores de caracterización y conservación de uva.

El comportamiento de la formulación T8 estuvo determinado por la interacción entre las características fisicoquímicas de las materias primas y su efecto conjunto sobre la formación de la matriz biopolimérica. En este sentido, el almidón de semilla de palta, con un contenido de carbohidratos de 80.45 % y una elevada proporción de amilopectina (87.38 %), junto con su temperatura de gelatinización de 79.55 °C, favoreció un proceso eficiente de gelatinización y reorganización de cadenas poliméricas. Estas condiciones promovieron la formación de una red continua y cohesiva, característica fundamental para el desarrollo de biopelículas estables. Tal como señalan Nascimento et al. (2025), los almidones ricos en amilopectina presentan una mayor capacidad de formación de películas homogéneas debido a la generación de estructuras más compactas durante la gelatinización, mientras que Horna et al. (2023) destacan que esta composición incrementa la estabilidad mecánica al potenciar las interacciones intermoleculares dentro de la matriz.

A esta base estructural se incorporó la harina de residuos de café, cuya composición lignocelulósica (56.37 % de fibra cruda, 21.31 % de celulosa y 20.88 % de lignina) actuó como fase de refuerzo dentro del sistema. La presencia de estos componentes no solo contribuyó a la consolidación de la red polimérica, sino que también favoreció una mejor distribución de esfuerzos dentro del material, fortaleciendo su integridad estructural. En concordancia, la incorporación de holocelulosa de residuos de café mejora significativamente la cohesión de biopelículas al optimizar la transferencia de cargas entre matriz y refuerzo, generando estructuras más densas y estables (Bilal et al., 2026; Posada et al., 2026).

La sinergia entre la matriz de almidón, el refuerzo lignocelulósico y el plastificante se reflejó directamente en la conformación física del material, Singh et al. (2022) y Muñoz et al. (2023) coinciden en que concentraciones intermedias de almidón favorecen la formación de películas homogéneas, mientras que niveles elevados incrementan la viscosidad y pueden generar estructuras heterogéneas, porosas o frágiles. Asimismo, Su et al. (2023) indica que el contenido de almidón regula las interacciones entre cadenas poliméricas, afectando directamente la resistencia mecánica y la estabilidad del material. En la formulación T8, el 7.5 % de almidón permitió mantener una matriz continua y equilibrada, optimizada en sinergia con el refuerzo del café y la glicerina. Evidenciada

en la obtención de un espesor de 0.177 mm, indicador de una película continua, uniforme y con adecuada integridad estructural. Este resultado sugiere una correcta compatibilidad entre los componentes del sistema, donde la red polimérica logró organizarse sin discontinuidades significativas, lo cual es consistente con la adecuada interacción entre fases.

Esta estructura interna también se manifestó en las propiedades ópticas del material, donde la opacidad de 8.66 % indica una capacidad moderada de barrera frente a la radiación lumínica. Este comportamiento resulta particularmente relevante para aplicaciones en el envasado de frutas frescas como la uva verde, debido a su potencial para reducir procesos de fotooxidación y deterioro fotoinducido. En esta línea, Godoy-Zúñiga et al. (2024) señalan que los biopolímeros basados en almidón de semilla de palta presentan una capacidad intrínseca de bloqueo de radiación, la cual puede verse reforzada por la presencia de compuestos fenólicos asociados a residuos vegetales.

De manera paralela, la estructura formada influyó en el comportamiento frente al agua, observándose una solubilidad de 17.61 %, lo que refleja una resistencia moderada a la disolución. Este resultado se relaciona con una mayor compactación de la red polimérica y una reducción en la disponibilidad de grupos hidroxilo libres capaces de interactuar con moléculas de agua. Lounis et al. (2024)

explican que la incorporación de materiales lignocelulósicos en matrices de almidón disminuye la hidrofiliacidad del sistema debido al aumento de interacciones internas y a la reducción de sitios activos para la absorción de agua.

Este equilibrio estructural también se trasladó a las propiedades mecánicas, donde la formulación T8 alcanzó una resistencia a la tracción de 5.64 MPa, una elongación de 5.81 % y un módulo de Young de 217.49 MPa, evidenciando un comportamiento balanceado entre rigidez y flexibilidad. Este desempeño es resultado del efecto combinado de los tres componentes del sistema: el almidón como matriz estructural, la harina de café como refuerzo y la glicerina como plastificante. En particular, la glicerina en una concentración de 1.65 % ha sido reportada como un plastificante eficaz en matrices de almidón, capaz de reducir las interacciones intermoleculares entre cadenas poliméricas y aumentar la movilidad molecular, lo que se traduce en una mayor flexibilidad del material (Wang et al., 2022; Paluch et al., 2022). En este contexto, se ha evidenciado que la optimización de plasticificantes influye no solo en

la extensibilidad, sino también en el equilibrio entre rigidez y estabilidad estructural de biopelículas basadas en almidón (Tan et al., 2022). Así, la glicerina actúa como modulador del comportamiento viscoelástico del sistema, regulando la relación entre rigidez y deformabilidad del biopolímero.

Dentro de este sistema, la concentración del 4 % de residuos de café resultó especialmente relevante, ya que permitió alcanzar un punto óptimo entre refuerzo mecánico y homogeneidad de la matriz. Este nivel de incorporación evitó la formación de aglomerados que podrían debilitar la estructura, favoreciendo en cambio una distribución uniforme del refuerzo. Este comportamiento ha sido descrito en biocomposites de almidón reforzados con fibras lignocelulósicas, donde concentraciones intermedias optimizan el desempeño mecánico al mejorar la compatibilidad con la matriz polimérica (Lounis et al., 2024; Bilal et al., 2025). Adicionalmente, la pulpa de café seca molida aporta un valor funcional adicional debido a la presencia de compuestos fenólicos con capacidad antioxidante, lo que sugiere su potencial para aplicaciones en empaques activos. Este tipo de materiales puede contribuir a retardar procesos de oxidación en alimentos, mejorando su vida útil. En concordancia, se ha reportado que los subproductos del café, incluida la pulpa, pueden transferir actividad antioxidante a biopolímeros, incrementando su funcionalidad en aplicaciones alimentarias (Vallejos-Jiménez et al., 2025; Wardana et al., 2025).

En conjunto, la formulación T8 evidenció el mejor equilibrio global entre espesor (0.177 mm), opacidad (8.66 %), solubilidad (17.61 %), resistencia a la tracción (5.64 MPa), elongación (5.81 %) y módulo de Young (217.49 MPa), resultado de la interacción sinérgica entre la capacidad filmógena del almidón de semilla de palta, el efecto reforzante de la harina de residuos de café y la acción plastificante de la glicerina. Este desempeño confirma la eficacia de la optimización multirrespuesta y respalda el potencial de estos subproductos agroindustriales para el desarrollo de bioplásticos biodegradables con aplicaciones en el envasado de alimentos frescos, enmarcados en estrategias de economía circular y valorización de residuos.

4.5. Propiedad de barrera del bioplástico

4.5.1. Permeabilidad de vapor de agua

Tabla 51

PVA de los bioplásticos

Muestras	WVP *10 ⁽⁻¹⁰⁾ (g.m/s.m ² .Pa)	Desv *10 ⁽⁻¹⁰⁾
Bioplástico control	2.315545732	0.05221328
Bioplástico optimo	2.371680174	0.062366729

A continuación, se muestra la prueba de normalidad

Tabla 52

Pruebas de Normalidad para Permeabilidad

<i>Prueba</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Valor-P</i>
W de Shapiro-Wilk – Permeabilidad	0.880	0.2701

Nota: La prueba de Shapiro-Wilk está basada en la comparación de los cuartiles de la distribución normal ajustada a los datos.

En la tabla 52 la prueba de normalidad de Shapiro–Wilk aplicada a los datos de permeabilidad mostró un valor de $p = 0.2701$, superior al nivel de significancia de 0.05, por lo que no se rechazó la hipótesis nula de normalidad. En consecuencia, se concluye que los datos presentan una distribución normal. En cuanto al supuesto de la homogeneidad de varianzas se tiene los siguientes resultados:

Tabla 53

Prueba de homogeneidad de varianzas para Permeabilidad

<i>Prueba</i>	<i>Valor-P</i>
Levene's	0.160974 0.7088

Nota: Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95.0% de confianza.

En la tabla 53 se evaluó la homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene, obteniéndose un valor p de 0.7088, superior al nivel de significancia de 0.05, lo que indica que las varianzas fueron homogéneas entre los tratamientos.

Tabla 54*Prueba t para comparar medias*

Prueba	Valor-P
0.326	0.760

En la tabla 54 la prueba t de Student para muestras independientes indicó que no existieron diferencias significativas entre las medias de permeabilidad de los tratamientos evaluados ($t = 0.327$; $p = 0.760$). Por lo tanto, se aceptó la hipótesis nula de igualdad de medias al nivel de significancia del 5%.

Los valores de permeabilidad al vapor de agua (WVP) obtenidos en este estudio ($2.31\text{--}2.37 \times 10^{-10} \text{ g}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Pa}^{-1}$) se encuentran dentro del rango reportado para biopelículas de almidón de origen vegetal y biocomposites naturales ($\approx 1\text{--}4 \times 10^{-1}$), donde la permeabilidad está fuertemente influenciada por la interacción matriz–refuerzo y la microestructura del film, pudiendo variar según la compatibilidad entre fases y la continuidad estructural del material (Waday & Aklilu, 2023; Mohammed et al., 2023). En sistemas basados en almidón de semilla de palta se ha evidenciado que la incorporación de estructuras altamente ordenadas como nanocristales de almidón permite reducir significativamente la WVP ($\sim 1 \times 10^{-1}$), debido a la formación de matrices más compactas y con mayor tortuosidad en la difusión del vapor de agua, mientras que los valores intermedios obtenidos en este estudio reflejan una estructura menos densificada, característica de biocomposites convencionales con refuerzos naturales (Muñoz-Gimena et al., 2025).

De manera consistente, en biopelículas de almidón de semilla de palta reforzadas con celulosa se han reportado valores entre 1.5 y 3.8×10^{-1} , donde el desempeño como barrera depende principalmente de la dispersión del refuerzo dentro de la matriz, ya que una distribución homogénea mejora la tortuosidad del camino de difusión, mientras que la aglomeración puede generar discontinuidades que incrementan la permeabilidad, lo cual es coherente con el ligero aumento observado en la formulación óptima del presente estudio (Tassew et al., 2025). Asimismo, en sistemas funcionalizados con aceites esenciales o compuestos fenólicos se ha observado que, aunque estos aditivos pueden mejorar propiedades bioactivas del material, también incrementan la polaridad del

sistema y favorecen ligeramente la difusión del vapor de agua, manteniendo valores de WVP en el rango de $2-4 \times 10^{-1}$, comportamiento que concuerda con el uso de compuestos fenólicos presentes en la harina de residuos de café utilizada en este estudio, la cual puede incrementar la hidrofiliidad y generar microdiscontinuidades en la matriz (Martins et al., 2025; Waday & Aklilu, 2023).

En este sentido, el efecto observado en la formulación óptima puede atribuirse a la incorporación de harina de café, rica en compuestos fenólicos y fracciones fibrosas, lo que habría incrementado ligeramente la interacción con el agua y alterado la continuidad estructural del biopolímero. Finalmente, en estudios de modificación química del almidón de semilla de palta, como la acetilación, se ha reportado una reducción significativa de la WVP debido a la disminución de grupos hidroxilo disponibles, lo que contrasta con sistemas basados en almidón nativo reforzado con materiales vegetales, como el presente estudio, donde la permeabilidad depende principalmente de la microestructura formada durante el procesamiento (Navarrete et al., 2023).

En conjunto, el bioplástico desarrollado a base de almidón de semilla de palta y reforzado con harina de residuos de café presenta una WVP característica de biocomposites con refuerzos naturales, ubicándose dentro del rango reportado en la literatura, aunque sin alcanzar los niveles de baja permeabilidad propios de sistemas nanoestructurados o químicamente modificados, lo que evidencia un comportamiento intermedio, estable y coherente con su naturaleza hidrofílica.

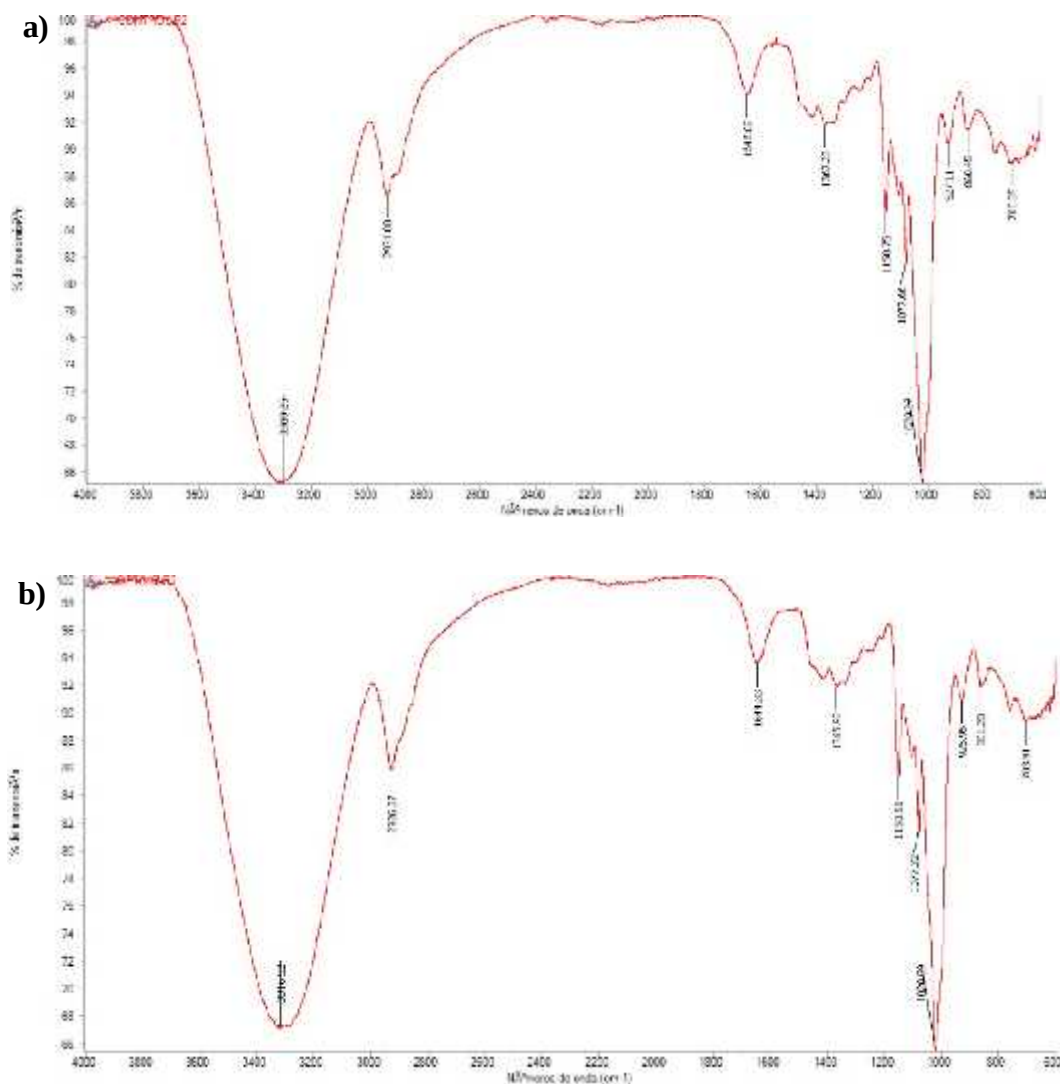
4.6. Propiedad química del bioplástico

4.6.1. FTIR

Los análisis FTIR de los bioplásticos ayudaron a identificar las posibles interacciones del almidón de semilla de palta, el residuo de café y el insumo (glicerina). La Figura 36 muestra las principales bandas espectrales del tratamiento control que es sin residuo de café y el tratamiento óptimo T8; muestran grupos funcionales similares, lo que dio lugar a bandas ubicadas en posiciones similares y, en consecuencia, a espectros similares.

Figura 36

Espectros de FTIR de los bioplásticos de a) almidón de semilla de palta 5.5% y glicerina 1.65% (T0 o control), b) almidón de semilla de palta 7.5%, residuos de café 4% y glicerina 1.65% (T8).



Los espectros FTIR-ATR de la película control (almidón de semilla de palta + glicerina) y de la película óptima (almidón de semilla de palta + residuo de café + glicerina) mostraron el perfil característico de un biopolímero polisacárido plastificado con glicerina: bandas O-H ($\sim 3300\text{ cm}^{-1}$), C-H ($\sim 2930\text{ cm}^{-1}$), C-O-C ($\sim 1150\text{ cm}^{-1}$) y del anillo de anhidroglucosa ($\sim 1020\text{-}928\text{ cm}^{-1}$), junto con las bandas a ~ 927 y $\sim 860\text{ cm}^{-1}$ correspondientes a las vibraciones del anillo piranósico y al enlace glicosídico $\alpha\text{-}1,4$. La ausencia de diferencias sustanciales en la posición de estas bandas del esqueleto del almidón confirma que la estructura base del biopolímero se conservó tras la

incorporación del residuo de café, y su posición coincide con lo reportado para almidón de semilla de palta por Dewi et al. (2024), quienes ubicaron el -OH entre 3273 y 3647 cm^{-1} y el C-H entre 2902 y 2954 cm^{-1} en este mismo tipo de almidón, así como con la asignación detallada de Jeencham et al. (2024) para sistemas almidón-glicerina.

El hallazgo más relevante fue el desplazamiento moderado de la banda O-H hacia mayores números de onda al incorporar el residuo de café (de 3300.25 a 3316.52 cm^{-1} , $\Delta \approx 16 \text{ cm}^{-1}$), lo cual confirma el efecto plastificante de la glicerina sobre la matriz. En esta línea, Sirbu et al. (2024) demostraron que el incremento de la concentración de este plastificante modifica principalmente la intensidad y el ancho de la banda O-H debido al aumento de los puentes de hidrógeno, sin generar nuevas bandas de absorción. Esta interpretación coincide con lo reportado por Tassew et al. (2025) para películas de almidón de semilla de palta reforzadas con celulosa de ensete, quienes identificaron una banda O-H entre 3000 y 3600 cm^{-1} (con máximo en 3290 cm^{-1}), una banda C-H alrededor de 2930 cm^{-1} y señales entre 1150 y 1000 cm^{-1} muy similares a las obtenidas en este estudio (3300.25-3316.52, 2931.00-2926.27 y 1150.75-1020.27 cm^{-1}) y

atribuyeron la menor higroscopicidad del material a la incorporación de celulosa como barrera física. Los autores señalaron que la ausencia de nuevas bandas demuestra que el refuerzo interactúa mediante puentes de hidrógeno y no por reacciones químicas, un comportamiento consistente con los resultados obtenidos para el bioplástico reforzado con residuo de café. Jeencham et al. (2024) encontraron que la celulosa microcristalina reduce el contenido de humedad de películas de almidón de yuca porque los grupos -OH libres disminuyen al quedar comprometidos en nuevos puentes de hidrógeno con la carga, restando disponibilidad para interactuar con el agua; los autores atribuyeron los ligeros desplazamientos observados a la formación de estos puentes de hidrógeno entre la matriz de almidón y la celulosa, interpretación que también explica el comportamiento observado tras la incorporación del residuo de café. La ausencia de bandas nuevas, por su parte, no implica falta de interacción, sino compatibilidad de tipo físico: en sistemas de almidón de palta con quitosano (Susilowati et al., 2025) la interacción por puentes de hidrógeno entre grupos amino e hidroxilo se manifiesta como el desplazamiento de una banda existente y no como la aparición de un grupo funcional nuevo, tal como confirmó el estudio de nanoquitosano-almidón de palta mediante el corrimiento del carbonilo de amida (de 1646.6 a 1550.0 cm^{-1}). Este mismo

rincipio espectral respalda que el cambio observado en la banda O-H, aunque de magnitud moderada, refleja una interacción real entre el café y la matriz. En la misma dirección, Mohammed et al. (2023) encontraron en biocompuestos de almidón de trigo/PVA reforzados con fibras de palma azucarera una banda O-H cercana a 3270-3300 cm^{-1} , una banda C-H en 2928 cm^{-1} y señales características del polisacárido entre 1140 y 1020 cm^{-1} , observando únicamente ligeros desplazamientos conforme aumentó el contenido de fibra. De manera semejante, Oluwasina et al. (2024) reportaron bandas en 3320 cm^{-1} , 2927 cm^{-1} y 1030 cm^{-1} en bioplásticos de almidón reforzados con celulosa tratada y óxido de grafeno, y concluyeron que los cambios espectrales obedecen al fortalecimiento de las interacciones intermoleculares y no a la formación de nuevos grupos funcionales. La proximidad entre estas bandas y las obtenidas en este estudio confirma que las pequeñas variaciones observadas en la posición e intensidad de las señales O-H y C-O-C responden al establecimiento de nuevas interacciones por puentes de hidrógeno entre el almidón, la glicerina y los componentes lignocelulósicos del residuo de café.

En conjunto, la evidencia respalda que el residuo de café es física y estructuralmente compatible con la matriz almidón-glicerina: actúa como un agente de refuerzo físico que favorece la formación de puentes de hidrógeno con el almidón y la glicerina, sin alterar el esqueleto polisacárido base ni la estructura química fundamental del bioplástico.

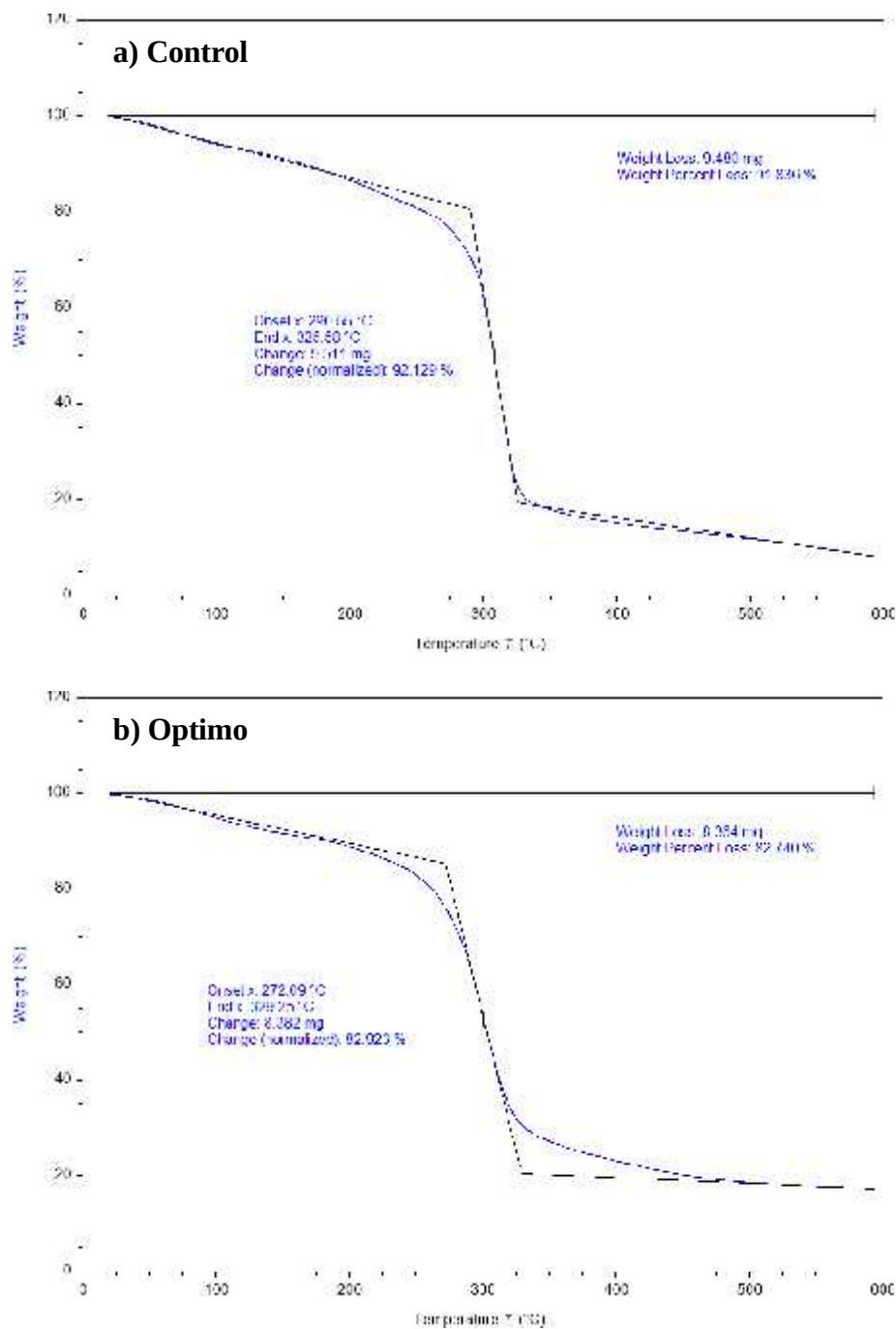
4.7. Propiedad térmica del bioplástico

4.7.1. TGA

Los análisis de termogravimetría (TGA) de los bioplásticos permitieron evaluar su comportamiento térmico y la estabilidad de los materiales formulados con almidón de semilla de palta, residuo de café y glicerina. La Figura 37 presenta las curvas termogravimétricas correspondientes al tratamiento control (sin residuo de café) y al tratamiento óptimo (T8). Ambas muestras exhibieron perfiles de degradación térmica similares, lo que indica que comparten un comportamiento general frente al incremento de la temperatura; sin embargo, las diferencias observadas en las etapas de pérdida de masa reflejan la influencia de la incorporación del residuo de café sobre la estabilidad térmica del bioplástico.

Figura 37

Análisis de termogravimetría (TGA) de los bioplásticos de a) almidón de semilla de palta 5.5% y glicerina 1.65% (T0 o control), b) almidón de semilla de palta 7.5%, residuos de café 4% y glicerina 1.65% (T8).



El análisis termogravimétrico evidenció diferencias en la estabilidad térmica entre el bioplástico control (T0), formulado con 5.5 % de almidón de semilla de palta y 1.65 % de glicerina, y el bioplástico óptimo (T8), compuesto por 7.5 % de almidón de semilla

de palta, 4 % de residuos de café y 1.65 % de glicerina. El tratamiento T0 presentó una temperatura de inicio de degradación de 290.55 °C, superior a la de T8 (272.09 °C), indicando una mayor estabilidad térmica inicial. Sin embargo, T8 registró una menor pérdida total de masa (82.74 %) respecto al control (91.84 %) y un mayor residuo final (≈ 17 % frente a ≈ 8 %), lo que evidencia una mayor estabilidad durante la degradación térmica, mejor cohesión estructural y mayor resistencia al calentamiento.

Estos resultados son comparables con los reportados por Sirbu et al. (2024), quienes obtuvieron temperaturas máximas de degradación entre 300 y 313 °C y pérdidas de masa entre 81.59 y 84.41 %, valores muy cercanos a la pérdida de masa observada en T8 y menores que la del control. Los autores atribuyeron este comportamiento al fortalecimiento de las interacciones intermoleculares entre el plastificante y la matriz de almidón. En este estudio, aunque la concentración de glicerina permaneció constante, el incremento del contenido de almidón y la incorporación de residuos de café probablemente favorecieron una matriz más compacta, reduciendo la pérdida de masa durante la degradación. De manera similar, Muñoz-Gimena et al. (2024) reportaron que la degradación principal de películas de almidón de semilla de aguacate ocurrió entre 250 y 330 °C, mientras que la incorporación de nanocristales incrementó la temperatura máxima de degradación de 307.4 a 314.2 °C debido al aumento de la cristalinidad. Aunque T8 presentó una temperatura inicial inferior, mostró un residuo cercano al 17 %, superior al 10 % informado por estos autores, lo que sugiere una mayor formación de carbón asociada a los compuestos lignocelulósicos y fenólicos presentes en los residuos de café.

Los resultados también coinciden con Mohammed et al. (2023), quienes observaron una degradación principal alrededor de 302.3 °C y residuos finales entre 23.3 y 24.6 %, atribuidos al alto contenido de lignina de las fibras vegetales. Aunque el residuo de T8 fue menor, los residuos de café también contienen lignina, celulosa y hemicelulosa, componentes que favorecen la carbonización y explican el incremento del residuo respecto al control. Asimismo, Martins et al. (2025) describieron tres etapas de degradación en películas de almidón de semilla de aguacate, con una degradación principal entre 250 y 400 °C, concluyendo que todas las formulaciones presentaron estabilidad térmica suficiente para empaques alimentarios. Del mismo modo, ambos bioplásticos evaluados comienzan a degradarse por encima de 270 °C, temperatura muy

superior a las condiciones de almacenamiento y transporte de uva fresca (<40 °C), confirmando su viabilidad para esta aplicación.

Finalmente, Oluwasina et al. (2024) demostraron que la incorporación de materiales de refuerzo mejora la estabilidad térmica de bioplásticos a base de almidón al reducir la pérdida de masa durante la degradación. De manera similar, la adición del 4 % de residuos de café disminuyó la pérdida de masa de 91.84 % a 82.74 %, confirmando el efecto estabilizante de este refuerzo vegetal. En conjunto, aunque T0 presentó una mayor temperatura de inicio de degradación, T8 exhibió una menor pérdida de masa y un mayor residuo carbonoso, lo que evidencia una mayor estabilidad térmica global y respalda su selección como la formulación más adecuada para empaques biodegradables destinados a la conservación de uva fresca.

4.8. Evaluación fisicoquímica de la conservación de uva con película multifuncional óptima

4.8.1. *Peso*

Se muestra la tabla con los resultados de la evaluación de la pérdida de peso de las uvas envasadas con tratamiento control y con el tratamiento adecuado.

Tabla 55

Evaluación de la pérdida de peso (%) con el paso de los días

Propiedades	Tratamientos	DIAS					
		1	4	6	8	11	13
Pérdida de peso	Control	0.36	0.88	1.24	1.69	2.01	2.50
	Optimo	1.80	2.46	3.14	4.05	4.89	5.62

A continuación, se muestra la prueba de normalidad y homogeneidad:

Tabla 56

Pruebas de Normalidad para pérdida de peso(%)

<i>Prueba</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Valor-P</i>
W de Shapiro-Wilk – Peso	0.945	0.5655

Nota: La prueba de Shapiro-Wilk está basada en la comparación de los cuartiles de la distribución normal ajustada a los datos.

Tabla 57

Prueba de homogeneidad de varianzas para Permeabilidad

	<i>Prueba</i>	<i>Valor-P</i>
Levene's	3.4520	0.0928

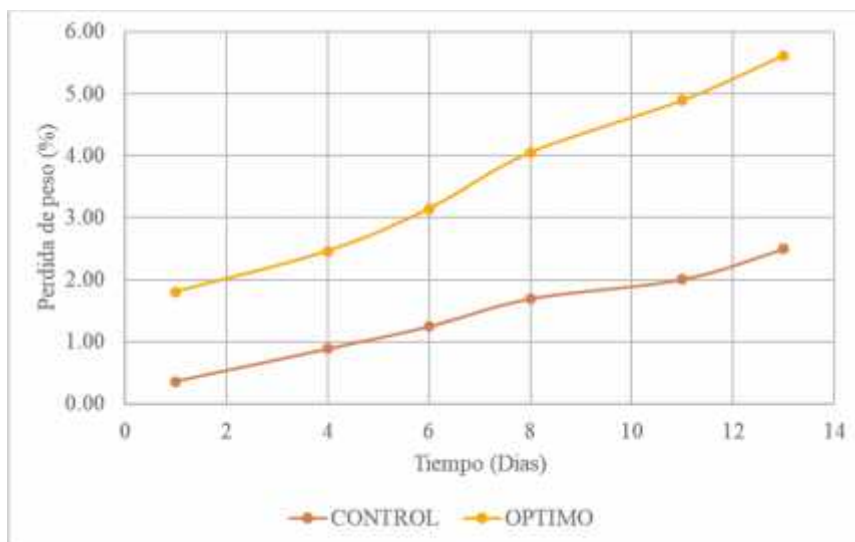
Nota: Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95.0% de confianza.

Para la variable pérdida de peso, la prueba de Shapiro-Wilk indicó que los datos presentaron distribución normal ($p > 0.05$). Asimismo, la prueba de Levene evidenció homogeneidad de varianzas entre los tratamientos ($p > 0.05$). Sin embargo, debido a la ausencia de réplicas experimentales para cada combinación de tratamiento y día, no fue posible realizar un análisis de varianza, por lo que los resultados fueron evaluados de manera descriptiva.

La variable pérdida de peso fue evaluada mediante una única unidad experimental por tratamiento y tiempo de almacenamiento, por lo que no fue posible realizar análisis de varianza. En consecuencia, los resultados se presentan de forma descriptiva.

Figura 38

Pérdida de peso (%) vs días



La pérdida de peso de las uvas verdes sin semilla aumentó progresivamente durante el almacenamiento en ambos tratamientos; sin embargo, el bioplástico registró una pérdida final de 5.62 %, mientras que el plástico convencional alcanzó 2.50 %, lo que indica que las uvas envasadas con el bioplástico perdieron aproximadamente 2.25 veces más peso

durante el mismo periodo. Esta diferencia se atribuye principalmente a las propiedades de barrera del material de empaque y a la fisiología poscosecha del fruto. Los bioplásticos a base de almidón poseen un carácter hidrofílico debido a la abundancia de grupos hidroxilo en las cadenas de amilosa y amilopectina, lo que favorece la adsorción y difusión de moléculas de agua a través de la matriz polimérica, incrementando la permeabilidad al vapor de agua y, en consecuencia, la transpiración del fruto (Silva et al., 2024; Singh et al., 2022).

Este comportamiento coincide con lo reportado por Khalil et al. (2023), quienes señalaron que la pérdida de peso en uvas de mesa se incrementa continuamente durante el almacenamiento como resultado de la transpiración y la respiración, procesos fisiológicos que disminuyen la turgencia celular y afectan la calidad comercial. Después de la cosecha, las uvas continúan metabólicamente activas y pierden agua principalmente por transpiración a través de la epidermis y el raquis,

mientras que la respiración basal consume reservas de carbohidratos, favoreciendo una reducción gradual de la masa fresca. Debido a que la cutícula de las bayas constituye una barrera limitada frente a la pérdida de humedad, un material de empaque con mayor permeabilidad al vapor de agua intensifica este proceso, promoviendo una mayor deshidratación del fruto (Gidado et al., 2024). En contraste, el plástico convencional utilizado como control presentó una menor pérdida de peso debido a su elevada capacidad de barrera frente al vapor de agua. Según Karnwal et al. (2025), los polímeros sintéticos poseen una estructura apolar con mayor cristalinidad, lo que reduce considerablemente la difusión de humedad y limita la transpiración del producto. Por el contrario, la estructura ramificada de la amilopectina dificulta el reordenamiento cristalino del almidón, generando un mayor volumen libre entre las cadenas poliméricas y aumentando la permeabilidad al vapor de agua (Singh et al., 2022), lo que explica el comportamiento observado en el bioplástico desarrollado. Desde el punto de vista fisiológico, las uvas son frutos no climatéricos, por lo que, aunque no presentan un incremento brusco de la respiración tras la cosecha, continúan perdiendo agua y consumiendo reservas mediante la respiración basal (Wu et al., 2023). En este estudio, el almacenamiento a 5 °C contribuyó a ralentizar estos procesos metabólicos, prolongando la vida útil del fruto; sin embargo, no evitó completamente la pérdida de humedad. En este sentido, Owoyemi et al. (2024) señalaron que temperaturas cercanas

a 5 °C retrasan la senescencia y mantienen la calidad poscosecha, aunque la pérdida de turgencia y el pardeamiento del raquis continúan progresando durante el almacenamiento.

A pesar de la mayor pérdida de peso, el valor registrado con el bioplástico (5.62 %) se mantuvo dentro del rango aceptable para uvas de mesa, ya que pérdidas superiores al 5–8 % suelen asociarse con marchitez visible y disminución de la aceptabilidad comercial (Romero et al., 2020). Además, el bioplástico incorporó pulpa de café en forma de polvo como material de refuerzo, la cual presentó una capacidad antioxidante de 31.43 μmol Trolox/g. Aunque su incorporación no tuvo como finalidad principal aportar actividad antioxidante, este componente podría contribuir a retardar los procesos oxidativos asociados a la senescencia del fruto, otorgando al material un potencial adicional como empaque activo y favoreciendo la valorización de un residuo agroindustrial (Islam et al., 2026).

4.8.2. Físicoquímicos (pH, acidez y brix)

En la siguiente tabla se presentan las propiedades físicoquímicas de la uva verde, ambos envueltos con un bioplástico elaborado de cáscara de almidón de semilla de palta, residuos de café y glicerina. Estas propiedades fueron evaluadas en durante 13 días de almacenamiento.

Tabla 58

Propiedades físicoquímicas de la uva verde con el bioplástico control y óptimo.

Propiedades	Tratamientos	Días					
		1	4	6	8	11	13
pH	Control	3.48	3.56	3.57	3.52	3.60	3.59
	Óptimo	3.47	3.44	3.39	3.41	3.37	3.34
Acidez	Control	0.78	0.82	0.78	0.80	0.82	0.84
	Óptimo	0.79	0.90	0.91	0.90	0.94	0.96
Brix °	Control	14.63	14.50	14.57	15.03	15.07	14.97
	Óptimo	15.03	14.80	14.90	15.17	15.23	15.80

Se procedió a realizar el análisis estadístico de cada uno de los análisis físicoquímicos, por lo que se procedió a evaluar la normalidad.

Tabla 59*Pruebas de Normalidad*

Prueba	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	Valor-P
pH	Control	0.892	0.0421
	Optimo	0.972	0.8413
Acidez	Control	0.964	0.6849
	Optimo	0.874	0.0207
Brix °	Control	0.910	0.0855
	Optimo	0.898	0.0523

Nota: La prueba de Shapiro-Wilk está basada en la comparación de los cuartiles de la distribución normal ajustada a los datos.

En la tabla 59 La prueba de Shapiro-Wilk mostró que algunas variables no cumplieron el supuesto de normalidad, ya que presentaron valores de p inferiores a 0.05, como el pH del tratamiento control ($p = 0.0421$) y la acidez del tratamiento óptimo ($p = 0.0207$). Debido a ello, se procedió a evaluar la normalidad de los residuos del modelo para verificar el cumplimiento de los supuestos requeridos para la aplicación del ANOVA.

Tabla 60*Pruebas de Normalidad de los residuos pH y Acidez*

Prueba	Estadístico	Valor-P
W Shapiro-Wilk – RESIDUOS pH	0.70	0.4251
W Shapiro-Wilk – RESIDUOS acidez	0.980	0.7497

Nota: Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95.0% de confianza.

La Tabla 60 presenta los resultados de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk aplicada a los residuos de las variables pH y acidez. Los valores de p obtenidos fueron superiores a 0.05 para ambas variables (pH: $p = 0.4251$; acidez: $p = 0.7497$), indicando que los residuos siguen una distribución normal. Por lo tanto, se cumple el supuesto de normalidad requerido para continuar con el análisis estadístico.

Tabla 61*Prueba de homogeneidad de varianzas*

<i>Análisis</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Valor-P</i>
pH	0.0916	0.7640
Acidez	3.5437	0.0674
Brix	0.2698	0.6068

La Tabla 61 muestra los resultados de la prueba de homogeneidad de varianzas de Levene para las variables pH, acidez y °Brix. En todos los casos se obtuvieron valores de p superiores a 0.05 (pH: p = 0.7640; acidez: p = 0.0674; °Brix: p = 0.6068), lo que indica que las varianzas son homogéneas entre los tratamientos evaluados. Por lo tanto, se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas requerido para la aplicación del análisis de varianza (ANOVA).

Se muestra el siguiente ANOVA en la siguiente tabla para el pH

Tabla 62*Tabla ANOVA para pH según tratamiento y día*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:tratamiento	0.198025	1	0.198025	1516.79	0.0000
B:días	0.00584722	5	0.00116944	8.96	0.0001
AB	0.0573583	5	0.0114717	87.87	0.0000
RESIDUOS	0.00313333	24	0.000130556		
TOTAL	0.264364	35			

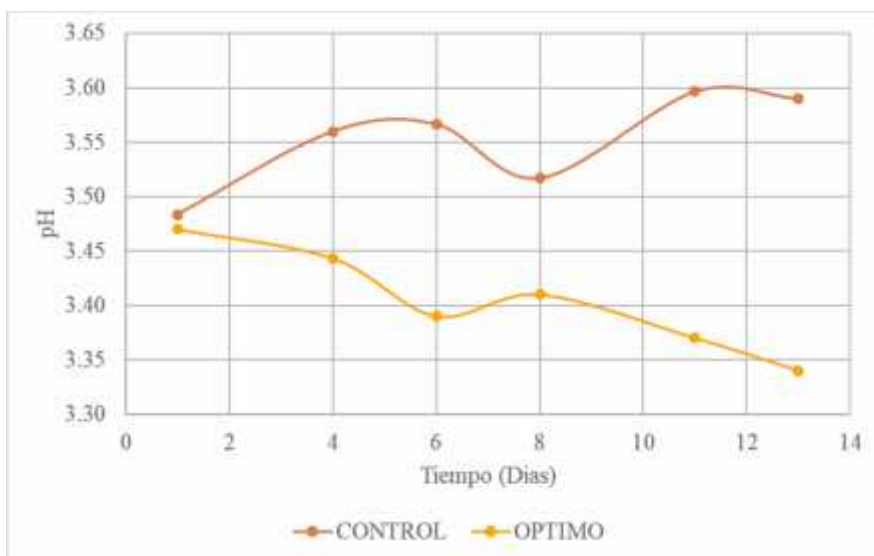
(CORREGIDO)

La Tabla 62 presenta los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para la variable pH en función del tratamiento (control y optimo) y los días de almacenamiento. Se observaron diferencias altamente significativas para el factor tratamiento (p = 0.0000), indicando que el tipo de empaque influyó significativamente sobre los valores de pH. Asimismo, el factor días de almacenamiento presentó un efecto significativo (p = 0.0001), evidenciando cambios en el pH durante el periodo de evaluación. De igual manera, la interacción tratamiento × días resultó altamente significativa (p = 0.0000), lo

que indica que el comportamiento del pH a lo largo del almacenamiento dependió del tratamiento aplicado. Estos resultados demuestran que tanto los factores individuales como su interacción influyeron significativamente en la variación del pH de las uvas evaluadas.

Figura 39

pH vs días



Los resultados del pH evidenciaron un comportamiento diferente entre los tratamientos durante los 13 días de almacenamiento en refrigeración. Mientras que la uva empacada con plástico convencional (control) presentó un ligero incremento del pH, de 3.48 a 3.60, la uva empacada con el bioplástico elaborado a partir de almidón de semilla de palta y residuos de café mostró una disminución progresiva, de 3.47 a 3.34. Debido a que ambos tratamientos fueron conservados bajo las mismas condiciones de refrigeración, las diferencias observadas pueden atribuirse principalmente al efecto del material de empaque sobre la estabilidad fisicoquímica del fruto.

El incremento del pH registrado en el tratamiento control coincide con el comportamiento fisiológico descrito para las uvas de mesa durante el almacenamiento postcosecha. Dogan & Uyak (2022) reportaron que, aun bajo almacenamiento a 1 °C y 85–90 % de humedad relativa, el pH aumenta gradualmente durante la maduración debido al consumo de ácidos orgánicos, principalmente tartárico y málico, los cuales son utilizados como sustratos en el metabolismo del fruto, por lo tanto, al consumirse estos ácidos, disminuye la concentración de iones hidrogeno por ello el pH aumenta. De manera similar, Khalil et al. (2023) señalaron que las modificaciones bioquímicas posteriores a la cosecha

favorecen un incremento gradual del pH durante el almacenamiento. Estos resultados también son consistentes con lo informado por Jiang et al. (2024), quienes demostraron que la refrigeración disminuye la velocidad de los cambios fisicoquímicos en comparación con el almacenamiento a temperatura ambiente, aunque no los detiene completamente. En conjunto, estas evidencias explican el ligero incremento del pH observado en las uvas empacadas con plástico convencional.

En contraste, las uvas empacadas con el bioplástico presentaron una disminución sostenida del pH durante el periodo de evaluación, lo que indica un comportamiento diferente al observado en el tratamiento control. Aunque en la presente investigación no se evaluó la respiración ni el intercambio gaseoso, este resultado sugiere que las propiedades de barrera del bioplástico pudieron contribuir a mantener una mayor estabilidad del ambiente interno del envase durante el almacenamiento refrigerado. En este sentido, Tong et al. (2024) encontraron que el empleo de películas microporosas combinadas con 1-MCP redujo la tasa respiratoria y favoreció la conservación de la acidez titulable de las uvas almacenadas a 4 °C, evidenciando que las características del material de empaque influyen en la evolución de los parámetros químicos del fruto. De forma similar, Rusliman et al. (2025) reportaron que las películas biodegradables elaboradas con alginato de sodio y glucomanano mejoraron la conservación de la calidad química de los alimentos al actuar como barreras frente al intercambio de gases y vapor de agua. Asimismo, Matera et al. (2024) demostraron que los sistemas de empaque con atmósfera modificada permitieron mantener una mayor estabilidad del pH de las uvas durante el almacenamiento refrigerado. En conjunto, estos antecedentes respaldan los resultados obtenidos y sugieren que el bioplástico desarrollado complementó el efecto de la refrigeración, favoreciendo una mayor estabilidad del pH en comparación con el plástico convencional.

Se muestra el siguiente ANOVA en la siguiente tabla para la acidez

Tabla 63

Tabla ANOVA para acidez según tratamiento y día

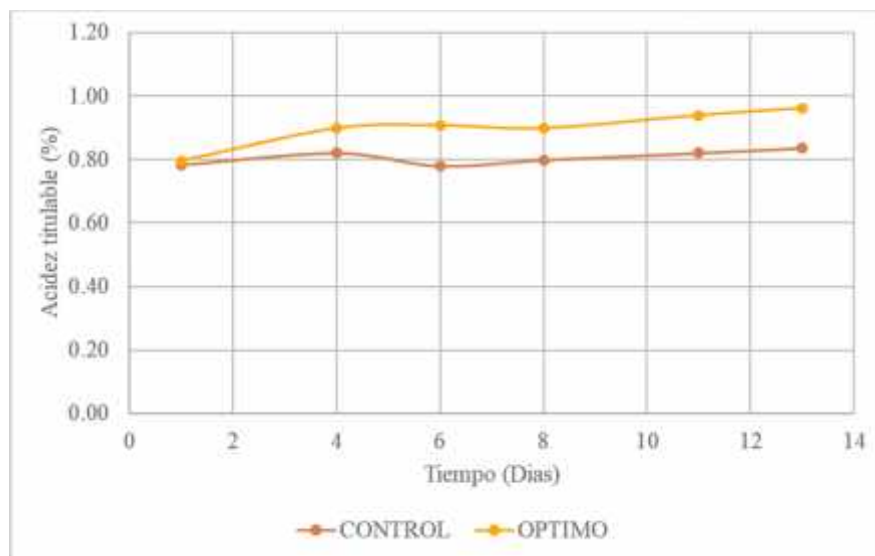
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:tratamiento	0.0765444	1	0.0765444	501.02	0.0000
B:días	0.0412667	5	0.00825333	54.02	0.0000
AB	0.0149222	5	0.00298444	19.53	0.0000

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
RESIDUOS	0.00366667	24	0.000152778		
TOTAL	0.1364	35			
(CORREGIDO)					

El análisis de varianza mostró diferencias significativas en la acidez debido al tratamiento ($p = 0.0000$), los días de almacenamiento ($p = 0.0000$) y la interacción tratamiento $\times$ días ($p = 0.0000$). Estos resultados indican que ambos factores influyeron significativamente en la variación de la acidez durante el almacenamiento.

Figura 40

Acidez titulable (%) vs días



La acidez titulable de las uvas verdes sin pepa presentó un incremento progresivo durante los 13 días de almacenamiento refrigerado en ambos tratamientos. En el tratamiento control aumentó de 0.78 a 0.84 %, mientras que en el tratamiento con el bioplástico elaborado a partir de almidón de semilla de palta y residuos de café el incremento fue mayor, alcanzando valores de 0.79 a 0.96 %. Dado que ambas muestras fueron almacenadas bajo las mismas condiciones de refrigeración, las diferencias observadas pueden atribuirse principalmente al efecto del material de empaque sobre la evolución de las propiedades fisicoquímicas del fruto.

Al reducirse el contenido de agua de la uva, los ácidos orgánicos presentes en el jugo quedan contenidos en un menor volumen y, por tanto, aumenta su concentración. Este fenómeno explicaría que la acidez titulable del tratamiento con bioplástico alcanzara 0.96 % al final del almacenamiento. La interpretación se encuentra respaldada por el comportamiento de los sólidos solubles, los cuales aumentaron de 15.03 a 15.80 °Brix en este tratamiento. El incremento simultáneo de la acidez titulable y de los sólidos solubles, acompañado de una mayor pérdida de peso, evidencia un efecto de concentración de los componentes solubles ocasionado por la deshidratación parcial

del fruto.

Los resultados obtenidos sugieren que el incremento de la acidez titulable estuvo relacionado con un efecto de concentración derivado de la pérdida de agua durante el almacenamiento. Esta interpretación se sustenta en que el tratamiento con bioplástico presentó la mayor pérdida de peso (5.62 %) respecto al control (2.50 %), acompañada de un incremento de los sólidos solubles hasta 15.80 °Brix. La disminución del contenido de agua favorece la concentración de los compuestos solubles presentes en la baya, incluidos los ácidos orgánicos, lo que incrementa la acidez titulable expresada en porcentaje. Desde un punto de vista fisiológico, Iglesias-Sánchez et al. (2026) señalan que la respiración del fruto está estrechamente vinculada con el metabolismo del carbono y de los ácidos orgánicos, y que cualquier factor que modifique el estado hídrico o el equilibrio metabólico puede alterar la composición química del fruto durante el almacenamiento. Atci et al. (2026) observaron que los cambios de la acidez titulable durante la conservación deben interpretarse conjuntamente con el contenido de humedad y los sólidos solubles, ya que la pérdida o ganancia de agua modifica la concentración de los ácidos presentes en la pulpa. Asimismo, indicaron que el efecto amortiguador de los ácidos orgánicos puede mantener relativamente estable el equilibrio químico del fruto aun cuando ocurren modificaciones en otros parámetros fisicoquímicos.

El incremento leve de acidez en el control puede explicarse por un efecto de concentración asociado a la pérdida natural de agua durante el almacenamiento. Tong et al. (2024) trabajaron a 4 °C con uva empacada bajo distintos materiales barrera y encontraron que la pérdida de peso durante el almacenamiento refrigerado varía según las propiedades del empaque, lo que afecta directamente la concentración de solutos incluidos los ácidos orgánicos en el jugo de la baya a medida que esta pierde agua por transpiración. Asimismo, el tipo de empaque influye sobre el microambiente que rodea al fruto, regulando el intercambio de gases y vapor de agua, factores que condicionan la intensidad de la respiración y la evolución de los parámetros fisicoquímicos. En este sentido, la revisión realizada por Buhle et al. (2026) destaca que los sistemas de envasado y la cadena de frío actúan de manera conjunta sobre la pérdida de humedad, la difusión de gases y la estabilidad química de las uvas durante la postcosecha, determinando la evolución de parámetros como la acidez titulable, los sólidos solubles y la calidad global del fruto, mientras que Rusliman et al. (2025) señalaron que las películas biodegradables contribuyen a preservar la calidad química de los alimentos

gracias a sus propiedades de barrera frente al intercambio de gases y vapor de agua.

En consecuencia, el mayor incremento de la acidez titulable observado en el tratamiento con bioplástico puede explicarse principalmente por un efecto de concentración asociado con la pérdida de agua. Este tratamiento registró una pérdida de peso de 5.62 %, superior al 2.50 % obtenido con el plástico convencional. Debido a que la acidez titulable se expresa en función de la cantidad de ácidos neutralizables presentes en la muestra, la disminución del contenido de agua incrementa proporcionalmente la concentración de los ácidos orgánicos en el jugo, aun cuando no necesariamente exista una síntesis de nuevos ácidos durante el almacenamiento.

Se muestra el siguiente ANOVA en la siguiente tabla para el brix

Tabla 64

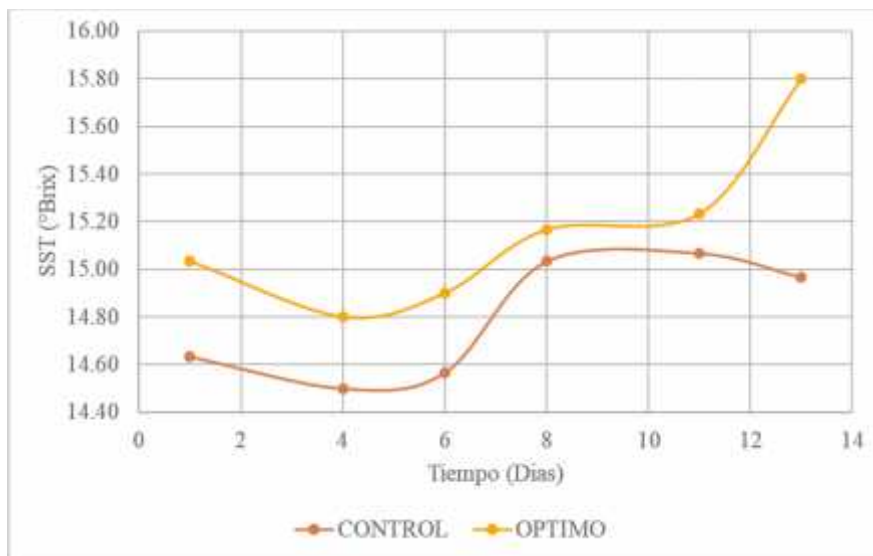
Tabla ANOVA para el brix según tratamiento y día

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:tratamiento	1.17361	1	1.17361	45.92	0.0000
B:días	2.3825	5	0.4765	18.65	0.0000
AB	0.478056	5	0.0956111	3.74	0.0120
RESIDUOS	0.613333	24	0.0255556		
TOTAL	4.6475	35			
(CORREGIDO)					

El análisis de varianza mostró diferencias significativas en los sólidos solubles totales (°Brix) debido al tratamiento ($p = 0.0000$), los días de almacenamiento ($p = 0.0000$) y la interacción tratamiento $\times$ días ($p = 0.0120$). Estos resultados indican que ambos factores influyeron significativamente en la variación del contenido de °Brix durante el almacenamiento.

Figura 41

Brix vs días



Los sólidos solubles totales (°Brix) constituyen uno de los principales indicadores de la calidad de la uva, ya que reflejan principalmente la concentración de azúcares solubles, como glucosa y fructosa, además de pequeñas cantidades de ácidos orgánicos, aminoácidos y otros compuestos solubles presentes en la baya. He et al. (2025) destacan que los sólidos solubles, junto con la acidez titulable y el pH, constituyen los principales indicadores internos de calidad durante el almacenamiento, debido a que responden directamente a las modificaciones metabólicas y a la estabilidad fisiológica del fruto.

En la presente investigación, los °Brix mostraron un ligero incremento durante el almacenamiento refrigerado en ambos tratamientos. El tratamiento control pasó de 14.63 a 14.97 °Brix, mientras que el tratamiento con el bioplástico elaborado a partir de almidón de semilla de palta y residuos de café aumentó de 15.03 a 15.80 °Brix, evidenciando un incremento más pronunciado. Este comportamiento coincide con lo reportado por Zhu et al. (2023), quienes observaron que las uvas 'Shine Muscat' sometidas a almacenamiento presentaron un incremento gradual de los sólidos solubles como consecuencia de los cambios fisiológicos ocurridos después de la cosecha. Los autores explican que, aunque la uva es un fruto no climatérico y posee una limitada acumulación de azúcares tras la cosecha, los cambios en el contenido de agua y el metabolismo de los carbohidratos favorecen un aumento de la concentración de sólidos solubles.

Los resultados también concuerdan con lo descrito por Islam et al. (2024), quienes evaluaron el efecto de recubrimientos y empaques para uvas almacenadas en refrigeración, encontrando que los sólidos solubles aumentaron progresivamente durante la conservación. Los autores señalaron que este comportamiento está asociado con la pérdida de agua y con la transformación de carbohidratos de reserva en azúcares simples, procesos que modifican la composición química del fruto durante el almacenamiento. Asimismo, Khalil et al. (2023) señalaron que el contenido de sólidos solubles depende no solo del estado de madurez al momento de la cosecha, sino también de las modificaciones fisiológicas que ocurren durante el almacenamiento, las cuales afectan el equilibrio entre azúcares y ácidos orgánicos.

En la presente investigación, el mayor incremento de los °Brix observado en el tratamiento con bioplástico estuvo acompañado por una mayor pérdida de peso (5.62 %) en comparación con el tratamiento control (2.50 %). Esta relación sugiere que el aumento de los sólidos solubles estuvo influenciado por un efecto de concentración derivado de la deshidratación parcial del fruto, más que por una síntesis adicional de azúcares después de la cosecha. Este comportamiento ha sido descrito por Islam et al. (2024), quienes señalaron que el incremento de los sólidos solubles durante el almacenamiento está estrechamente relacionado con la deshidratación del fruto y con la concentración de los componentes solubles del jugo. Además, como lo menciona Navarro-Calderón et al., (2023), encontraron que, hacia el final del almacenamiento en frío, los niveles de ABA (ácido abscísico) suben junto con la tasa de respiración y el contenido de sacarosa. Esto sugiere que el ABA está activando la maquinaria celular que moviliza carbohidratos almacenados (como el almidón residual o reservas de polisacáridos de la pared celular) y los convierte en azúcares simples, lo que puede elevar el °Brix incluso sin que haya una "maduración" real en curso es más bien un signo de que la fruta se está empezando a deteriorar internamente.

En conjunto, el almacenamiento refrigerado permitió mantener relativamente estables los sólidos solubles en ambos tratamientos; sin embargo, el bioplástico presentó un mayor incremento de los °Brix, probablemente asociado a la mayor pérdida de agua durante el almacenamiento, lo que evidencia la influencia de la deshidratación y del metabolismo poscosecha sobre este parámetro.

V. CONCLUSIONES

- J Se obtuvo un bioplástico a partir de almidón de semilla de palta (*Persea americana*) (5.5 – 7.5%) reforzado con harina de residuos de café (*Coffea arabica* L.) (2 – 4%) y glicerina (1.65 – 2%), obteniéndose una formulación con propiedades físicas, mecánicas, de barrera, estructurales y térmicas adecuadas para su potencial aplicación como material biodegradable destinado a la conservación de uva. |
- J Se extrajo el almidón de semilla de palta se caracterizaron sus propiedades fisicoquímicas donde se reportó una humedad en base seca de 6.66%; 0.30% de ceniza; 4.45% proteína, 1.09% de grasa, 7.97% de fibra y carbohidratos con 86.23 %, una composición de 12.62 % de amilosa y 87.38 % de amilopectina, así como una temperatura de gelatinización de 79.55 °C, propiedades que favorecieron la formación de una matriz polimérica continua y estable. Asimismo, se obtuvo la harina de residuos de café la cual presentó una humedad en base seca de 8.78%; 8.97% de ceniza; 16.32% proteína, 1.63% de grasa y 61.39% de proteína y carbohidratos con 11.66 %, 21.31 % de celulosa, 20.88 % de lignina y una capacidad antioxidante de 31.43 $\mu\text{mol Trolox/g}$, evidenciando su potencial como material reforzante y fuente de compuestos bioactivos para el desarrollo de bioplásticos funcionales. |
- J Se formulo el bioplástico mediante el método de casting permitió obtener películas homogéneas a partir de almidón de semilla de palta, harina de residuos de café y glicerina obteniendo los tratamientos T1 hasta el T13, los cuales se evaluaron en cuanto a sus propiedades físicas y mecánicas, eligiendo al mejor tratamiento para su posterior aplicación en uva. |
- J La formulación de los bioplásticos mediante el método de casting permitió obtener películas homogéneas, observándose que el incremento del contenido de almidón incrementó significativamente el espesor, mientras que la glicerina reguló la flexibilidad de la matriz y la incorporación de harina de residuos de café favoreció el reforzamiento estructural. Entre las propiedades físicas de cada uno de los tratamientos teniendo un espesor variando de (0.162 - 0.199 mm), una opacidad de (8.16 – 12.04 %) y una solubilidad de (17.27 – 21.83%), valores que reflejan una adecuada integridad estructural y una resistencia moderada al agua para aplicaciones en empaques biodegradables. |

-) En cuanto a las propiedades mecánicas estuvieron influenciadas significativamente por las concentraciones de almidón, harina de residuos de café y glicerina. Las formulaciones mostraron una resistencia a la tracción variando de (2.74 - 5.95 Mpa), una elongación de (3.74 – 11.39 %) y un módulo de Young de (192.21 – 244.55 Mpa), evidenciando un equilibrio entre rigidez y flexibilidad, se determinó como formulación óptima experimental el tratamiento T8, constituido por 7.5 % de almidón, 4 % de harina de residuos de café y 1.65 % de glicerina evidenciando el mejor equilibrio entre las propiedades evaluadas.]
-) La formulación óptima del bioplástico (T8) presentó propiedades de barrera, estructurales y térmicas que respaldan su potencial aplicación como material de envasado biodegradable. En cuanto a la propiedad de barrera, registró una permeabilidad al vapor de agua de $2.37 \times 10^{-1} \text{ g} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}$, valor característico de biocompuestos reforzados con fibras naturales. El análisis FTIR confirmó que la incorporación del 4 % de harina de residuos de café no alteró la estructura química de la matriz de almidón, evidenciando únicamente interacciones por puentes de hidrógeno. Asimismo, el análisis TGA mostró una mayor estabilidad térmica de la formulación óptima, con una pérdida de masa de 82.74 % y un residuo carbonoso aproximado del 17| %, confirmando el efecto reforzante de la harina de residuos de café. Finalmente, durante la conservación de uva bajo refrigeración, el bioplástico mantuvo la calidad fisicoquímica del fruto; aunque presentó una mayor pérdida de peso (5.62 %) respecto al plástico convencional (2.50 %), este valor se mantuvo dentro del rango aceptable para uvas de mesa, preservando el pH, la acidez titulable y los sólidos solubles.

VI. RECOMENDACIONES

- J) Evaluar concentraciones superiores e inferiores de harina de residuos de café y otros plastificantes naturales con la finalidad de optimizar simultáneamente las propiedades mecánicas y disminuir la permeabilidad al vapor de agua del bioplástico. |
- J) Complementar la caracterización del bioplástico mediante análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM), calorimetría diferencial de barrido (DSC) y biodegradabilidad con el propósito de comprender mejor la relación entre microestructura y comportamiento funcional. |
- J) Evaluar el efecto antioxidante y antimicrobiano del bioplástico mediante la incorporación de extractos naturales obtenidos de los propios residuos de café u otras fuentes vegetales, con el objetivo de desarrollar empaques activos que prolonguen la vida útil de alimentos altamente perecibles. |
- J) Promover investigaciones orientadas a la valorización integral de residuos agroindustriales mediante el desarrollo de biomateriales sostenibles que contribuyan a reducir el uso de plásticos derivados del petróleo y fomenten estrategias de economía circular en la industria alimentaria. |

VII. REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

- Ahmad, A., Ayub, H. (2022). Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) Technique for Food Analysis and Authentication. In: Pathare, P.B., Rahman, M.S. (eds) Nondestructive Quality Assessment Techniques for Fresh Fruits and Vegetables . Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-5422-1_6
- Ahmed, S., Rehman, H., & Ahmed, N. (2024). Potato starch extraction: Techniques, challenges, and future opportunities. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 13(4), 512-524.
- Ahsan, W. A., Hussain, A., Lin, C., & Nguyen, M. K. (2023). Biodegradation of different types of bioplastics through composting—a recent trend in green recycling. *Catalysts*, 13(2), 294.
- Al Fath, M. T., Ayu, G. E., Lubis, M., Hasibuan, G. C. R., & Dalimunthe, N. F. (2023). Mechanical and thermal properties of starch avocado seed bioplastic filled with cellulose nanocrystal (CNC) as filler and potassium chloride (KCl) as dispersion agent. *Rasayan J Chem*, 16(3), 1630-6.
- Al Fath, MT, Ayu, GE, Hasibuan, GCR, Dalimunthe, NF y Alexander, V. (2024). Efecto de la adición de glicerol y almidón de sagú en las características de bioplásticos a base de pectina de cáscara de naranja: Artículo científico original. *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly* , 30 (4), 359-365.
- Alemu, N., Balakrishnan, S., & Debtera, B. (2022). *Extraction and characterization of avocado seed starch and its blend with enset cellulose*. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, 9908295. <https://doi.org/10.1155/2022/9908295>
- Ali, W., Ali, H., Souissi, S. *et al.* (2023). Are bioplastics an ecofriendly alternative to fossil fuel plastics? *Environ Chem Lett* 21, 1991–2002. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01601-6>
- Almeida, S., Ozkan, S., Gonçalves, D., Paulo, I., Queirós, C. S. G. P., Ferreira, O., Bordado, J., & Galhano dos Santos, R. (2023). A Brief Evaluation of Antioxidants, Antistatics, and Plasticizers Additives from Natural Sources for Polymers Formulation. *Polymers*, 15(1), 6. <https://doi.org/10.3390/polym15010006>
- Alonso-González, M., Felix, M., & Romero, A. (2022). Influence of the plasticizer on rice bran-based eco-friendly bioplastics obtained by injection moulding. *Industrial Crops and*

Products, 180, 114767.

- Alonso-González, M., Felix, M., & Romero, A. (2024). Development of rice bran-based bioplastics via injection molding: Influence of particle size and glycerol ratio. *Resources, Conservation and Recycling*, 208, 107713.
- Alves, E. P. R., Salcedo-Puerto, O., Nuncira, J., Emebu, S., & Mendoza-Martinez, C. (2023). Renewable energy potential and CO₂ performance of main biomasses used in Brazil. *Energies*, 16(9), 3959.
- Amensisa, Y. E., Demsash, H. D., & Tefera, M. E. (2024). Extraction and Characterization of Cellulose from Coffee Husk and Brewery's Spent Grain Fibers Using Alkali-Hydrogen Peroxide Treatment Method. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2024(1), 5101871.
- AOAC (2005) Official methods of analysis of Association the Official Agricultural Chemists. 18th ed. Vol:1-2
- Araújo, R. G., Rodríguez-Jasso, R. M., Ruiz, H. A., Govea-Salas, M., Rosas-Flores, W., Aguilar-González, M. A., ... & Aguilar, C. N. (2020). Hydrothermal–microwave processing for starch extraction from Mexican avocado seeds: operational conditions and characterization. *Processes*, 8(7), 759.
- Asikkutlu, A. G., & Yildirim-Yalcin, M. (2025). Optimization of mechanical and water barrier properties of avocado seed starch based film and its application as smart pH indicator by adding blue butterfly pea flower extract. *Food Chemistry: X*, 25, 102155. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102155>
- ASTM International. (2018). *ASTM D882-18. Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting*. West Conshohocken, PA: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0882-18>
- ASTM International. (2023). *ASTM D1746-23: Standard Test Method for Transparency of Plastic Sheeting*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D1746-23>
- ASTM International. (2023). *ASTM F2251-13(2023), Standard Test Method for Thickness Measurement of Flexible Packaging Material*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/F2251-13R23>
- Atci, S., McGraw, V. S., Bermeo, G. P., McHugh, T., Rubinsky, B., Powell-Palm, M. J., & Bilbao-Sainz, C. (2026). Isochoric Cold Storage for Postharvest Preservation of Green

- Grapes. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2026(1), 9470620.
- Avellán, A., Díaz, D., Mendoza, A., Zambrano, M., Zamora, Y. Y Riera, M.A., 2020. Obtención de bioplástico a partir de almidón de maíz (*Zea mays* L.). *Revista Colón Ciencias, Tecnología y Negocios* [en línea], vol. 7(1), pp. 1-11. <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/215/215974004/215974004.pdf>
- Babaremu, K., Oladijo, O. P., & Akinlabi, E. (2023). Biopolymers: A suitable replacement for plastics in product packaging. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 6(4), 333-340.
- Bangar, S. P., Dunno, K., Dhull, S. B., Siroha, A. K., Changan, S., Maqsood, S., & Rusu, A. V. (2022). Avocado seed discoveries: Chemical composition, biological properties, and industrial food applications. *Food Chemistry: X*, 16, 100507.
- Barragán-Condori, M., Carrión-Sánchez, H. M., Pumacallahui-Salcedo, E., Casafranca-Vásquez, R., Márquez-Romero, F. R., Quispe-Gutiérrez, U. S., & Huamaní-Meléndez, V. J. (2023). Influencia de la variedad y del método de conservación en los compuestos bioactivos de la pulpa y cáscara de cereza de café (*Coffea arabica*). *Investigación Agraria*, 25(2), 57-63.
- Batista, M. J. P. A., Marques, M. B. F., Franca, A. S., & Oliveira, L. S. (2023). Development of films from spent coffee grounds' polysaccharides crosslinked with calcium ions and 1,4-phenylenediboronic acid: A comparative analysis of film properties and biodegradability. *Foods*, 12(13), 2520. <https://doi.org/10.3390/foods12132520>
- Benitez, J., Florido-Moreno, Porras-Vázquez, J., Tedeschi, G., Heredia-Guerrero, J & Guzman-Puyol, S. (2024). Transparent, plasticized cellulose-glycerol bioplastics for food packaging applications, *International Journal of Biological. Macromolecules*, Volume 273, Part 2,132956, ISSN 0141-8130, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132956>.
- Bilal, M., Ali, M., Shaukat, F., Ullah, S., Arslan, M., Li, Z., ... & Ahmed, Z. F. (2026). Plant-Based Biopolymer Composites for Smart and Sustainable Food Packaging: Global Insights, Recent Advances, and Future Research Directions. *Food Frontiers*, 7(2), e70229.
- Boey, JY, Lee, CK y Tay, GS (2022). Factores que afectan las propiedades mecánicas de los bioplásticos reforzados: una revisión. *Polymers* , 14 (18), 3737.
- Borja Espín, D., And Goetschel Gómez, M. L. (2022). Subproductos del aguacate (*Persea americana*) Hass y Fuerte: estudio fitoquímico y proximal. In: MOSQUERA, T., ed.

- Productos naturales: investigación y perspectivas en Ecuador [online]. Quito: Editorial Abya-Yala, pp. 29-50. ISBN: 978-9978-10-620-4. <https://doi.org/10.7476/9789978108260.0003>.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. L. W. T. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food science and Technology*, 28(1), 25-30.
- Brizga, J., Hubacek, K., & Feng, K. (2020). The unintended side effects of bioplastics: carbon, land, and water footprints. *One Earth*, 3(1), 45-53.
- Buhle Maphosa, Thalente Mpanza, Elke Crouch, Alemayehu Ambaw Tsige; Packaging and cold chain optimization for quality preservation in the table grape supply chain: a review. *Sustainable Food Technol.* 2026; <https://doi.org/10.1039/d6fb00142d>
- Cangussu, L. B., Melo, J. C., Franca, A. S., & Oliveira, L. S. (2021). Chemical characterization of coffee husks, a by-product of coffea arabica production. *Foods*, 10(12), 3125.
- Carvajal-Flórez, E., & Oakley, S. M. (2023). Coffee pulp characterization and treatment as adsorbent material for heavy metal removal from landfill leachates. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(8), 8241-8260.
- Castro Garcia, P. G. (2020). Biopelículas Bioreticuladas Obtenidas de la Semilla del Aguacate Hass [Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo]. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/bitstream/DGB_UMICH/8238/1/FIQ-L-2020-0694.pdf
- Chakraborty, I., N, P., Mal, S. S., Paul, U. C., Rahman, M. H., & Mazumder, N. (2022). An insight into the gelatinization properties influencing the modified starches used in food industry: A review. *Food and Bioprocess Technology*, 15(6), 1195-1223.
- Charles, A. L., Motsa, N., & Abdillan, A. A. (2022). A comprehensive characterization of biodegradable edible films based on potato peel starch plasticized with glycerol. *Polymers*, 14(17), 3462.
- Chauhan, K., Kaur, R., & Chauhan, I. (2024). Sustainable bioplastic: a comprehensive review on sources, methods, advantages, and applications of bioplastics. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 63(8), 913-938.
- Cheikhyyoussef, N., & Cheikhyyoussef, A. (2022). Avocado (*Persea americana*) wastes: Chemical composition, biological activities and industrial applications. In M. F. Ramadan, & M. A. Farag (Eds.), *Mediterranean fruits bio-wastes* (pp. 699–719). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-84436-3_30

- Clara Dione, N., Lestari, P., Yuni Susanti, D., Evi Masithoh, R., Labiba Azzahra, R., Marsa Chairani, A., & Shiba Dhiyaul Rohma, A. (2025). Cellulose Extraction from Robusta Coffee Husk (*Coffea canephora*) as Alternative Material from Sustainable Agricultural Waste Utilization. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1438, No. 1, p. 012073). IOP Publishing.
- Cortes M., S., Aristofeles O., L. & Ramirez, A.,S. (2021). Determination of antioxidant in coffee products produced and marketed in Risaralda (Colombia). [Universidad tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia]. Repositorio Institucional UTP
- De Almeida Leal, H., Babetto, A. S., & Bonse, B. C. (2020). Properties of lignocellulosic composites of coffee husk filled polypropylene. *AIP Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1063/1.5142987>
- De Dios Avila, N., Tirado-Gallegos, J. M., Rios-Velasco, C., Luna Esquivel, G., Estrada Virgen, M. O., & Cambero Campos, O. J. (2023). Propiedades composicionales, estructurales y fisicoquímicas de las semillas de aguacate y sus potenciales usos agroindustriales. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 24(1), e2607. https://doi.org/10.21930/rcta.vol24_num1_art:2607
- De Dios-Avila, N., Tirado-Gallegos, J. M., Rios-Velasco, C., Luna-Esquivel, G., Isiordia-Aquino, N., Zamudio-Flores, P. B., Estrada-Virgen, M. O., & Cambero-Campos, O. J. (2022). Physicochemical, Structural, Thermal and Rheological Properties of Flour and Starch Isolated from Avocado Seeds of Landrace and Hass Cultivars. *Molecules*, 27(3), 910. <https://doi.org/10.3390/molecules27030910>
- De Lima Silva, ID, de Moraes, LEPT, Caetano, VF, De Andrade, MF, Hallwass, F., Brito, AMSS y Vinhas, GM (2021). Desarrollo de películas de PVA con activos antioxidantes con extracto vegetal de *Caesalpinia ferrea* Martius. *Lwt* , 144 , 111215.
- Delgado-Santillán, L. Y., Cardenas-Toro, F. P., Quispe-Sanchez, L., Mena-Chacon, L. M., Oblitas-Delgado, R., Vargas, L., & Yoplac, I. (2026). Optimization of starch extraction from three varieties of avocado seeds (*Persea americana* Mill.): Physicochemical Characterization and Application in Bio-based Packaging Materials. *Journal of Agriculture and Food Research*, 102996.
- Dewi, R., et al. (2024). The optimization of avocado-seed-starch-based degradable plastic synthesis with a polylactic acid (PLA) blend using response surface methodology (RSM). *Polymers*, 16(16), 2384. <https://doi.org/10.3390/polym16162384>

- Días, J. F., & Acuña, J. G. (2022). Uso de almidón para el desarrollo de bandejas biodegradables. *Journal of Agro-Industry. Sciences*, 4(2), 69–77.
- Díaz Alarcón, B. N., & López Farfán, K. E. (2024). *Efecto de la concentración de almidón de semilla de palta (Persea americana Mill.) en la obtención de biopelículas* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. Repositorio Institucional UNPRG. <https://hdl.handle.net/20.500.12893/13317>
- Dogan, A., & Uyak, C. (2022). Biochemical changes in some table grape cultivars through the ripening process. *Acta Scientiarum Polonorum. Hortorum Cultus*, 21(3).
- Dorantes-Fuentes, M.-G., López-Méndez, M. C., Martínez-Castellanos, G., Meléndez-Armenta, R. Á., & Jiménez-Martínez, H.-E. (2024). Starch Extraction Methods in Tubers and Roots: A Systematic Review. *Agronomy*, 14(4), 865. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040865>
- Dos Santos, É. M., de Macedo, L. M., Ataíde, J. A., Delafiori, J., de Oliveira Guarnieri, J. P., Rosa, P. C. P., ... & Mazzola, P. G. (2024). Antioxidant, antimicrobial and healing properties of an extract from coffee pulp for the development of a phytocosmetic. *Scientific reports*, 14(1), 4453.
- Dutta, D., & Sit, N. (2024). A comprehensive review on types and properties of biopolymers as sustainable bio-based alternatives for packaging. *Food Biomacromolecules*, 1(2), 58-87.
- Enríquez, K. X. H., Gómez, R. F. A., & Carrasco, J. D. S. (2024). Bioplásticos a partir de residuos agrícolas: Una revisión sistemática, tendencias y oportunidades actuales. *Ciencia Latina: Revista Multidisciplinar*, 8(5), 8997-9012.
- Eslami, Z., Elkoun, S., Robert, M., & Adjallé, K. (2023). A Review of the Effect of Plasticizers on the Physical and Mechanical Properties of Alginate-Based Films. *Molecules*, 28(18), 6637. <https://doi.org/10.3390/molecules28186637>
- Espinoza Ñaupari, E. V., & Oscco Villegas, C. R. (2022). Efecto de glicerina y melamina sobre las propiedades físico-mecánicas del bioplástico de almidón en semilla de *Persea americana* mill. “Palta” [UNIVERSIDAD PERUANA LOS ANDES]. <https://repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/3625>
- Falua, K. J., Pokharel, A., Babaei-Ghazvini, A., Ai, Y., & Acharya, B. (2022). Valorization of starch to biobased materials: A review. *Polymers*, 14(11), 2215.
- Fathurohman, V., Alisaputra, D., & Sedyadi, E. (2020). The Effect of Addition of Avocado

- Fruit Seeds On Bioplastic Biodegradation. Proceeding International Conference on Science and Engineering, 3, 137–145. <https://doi.org/10.14421/icse.v3.547>
- Fauziah, A. N., Adriana, R., Hayati, A. T., Marlina, A., Yustinah, & Ndruru, S. T. C. L. (2025). Physical performance of glycerol-plasticized cassava peel starch-carboxymethyl cellulose bioplastic. *Emergent Materials*, 1-19.
- Flóres, M., Cazón, P., & Vázquez, M. (2023). Procesamiento y aplicaciones de biopolímeros seleccionados: una revisión. *Polymers* , 15 (3), 641. <https://doi.org/10.3390/polym15030641>
- Frangopoulos, T., Marinopoulou, A., Goulas, A., Likotrafiti, E., Rhoades, J., Petridis, D., & Karageorgiou, V. (2023). Optimizing the functional properties of starch-based biodegradable films. *Foods*, 12(14), 2812.
- Frasson, S. F., Nunes, G. T., Biduski, B., Mendonça, C. R. B., & Colussi, R. (2023). Extraction and characterisation of avocado seed starch (*Persea americana* Miller) and application in aerogels. *International Journal of Food Science and Technology*, 58(10), 5388-5397.
- Friday Etuk, I., & Ekwere InClara, U. (2023). Applications of Various Plasticizers in the Plastic Industry - Review. *International Journal Of Engineering And Modern Technology (IJEMT)*, 10(1), 38-55. <https://doi.org/10.56201/ijemt.v10.no1>.
- Gamage, A. , A. Liyanapathiranage , A. Manamperi , C. Gunathilake , S. Mani , O. Merah y T. Madhujith . 2022 . " Aplicaciones de los biopolímeros de almidón para una agricultura moderna sostenible ". *Sostenibilidad* 14, núm. 10 : 6085. <https://doi.org/10.3390/su14106085>
- García Salcedo, I. N. (2025). *Elaboración y caracterización de una película biodegradable proveniente del mucílago de nopal, almidón de papa, glicerol y ácido acético para la sustitución de plásticos convencionales* [Trabajo de grado, Fundación Universidad de América]. Repositorio Institucional Universidad de América.
- Gargate Saavedra, G. J., & Campos Cabrejos, C. E. (2024). *Estudio comparativo del proceso de extracción del aceite esencial de dos variedades de palta* [Tesis de grado, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. Repositorio Institucional UNJFSC.
- Getino, L., Revilla-Gómez, J. A., Ariza-Carmona, L. M., Thijs, S., Didierjean, C., & Chamizo-Ampudia, A. (2025). Biodegradation of petrochemical plastics by microorganisms:

- toward sustainable solutions for plastic pollution. *Bacteria*, 4(3), 44.
- Ghosh, S., & Roy, A. (2022). Optical and structural properties of starch films formed on drying droplets of gelatinized starch solutions. *arXiv preprint arXiv:2212.14298*.
- Ghoshal, G., & Kaur, M. (2023). Optimization of extraction of starch from sweet potato and its application in making edible film. *Food Chemistry Advances*, 3, 100356.
- Gidado, M. J., Gunny, A. A. N., Gopinath, S. C., Ali, A., Wongs-Aree, C., & Salleh, N. H. M. (2024). Challenges of postharvest water loss in fruits: Mechanisms, influencing factors, and effective control strategies—A comprehensive review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 17, 101249.
- Gómez Rosales Z., Solano JK, Orjuela D., Rodrigo Ilarri J., Rodrigo Clavero ME, (2022). Síntesis y caracterización de una mezcla de almidón de yuca (manihot esculenta) y pulpa de café seca para producir biopelículas, *Química Transacciones de ingeniería*, 92, 439-444 DOI:10.3303/CET2292074
- Grace, M. R. (1977). *Elaboración de la yuca*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Granda, D. N. (2024). *Advancements of Shutdown Dose Rate Analysis Tools for Accelerator-Driven Systems* (Doctoral dissertation, The University of Wisconsin-Madison).
- He K, Su Y, He L, Hu C, Xing J and Alisher N (2025) Modeling of table grape soluble solids content, titratable acidity and pH prediction during storage based on Vis-NIR spectroscopy. *Front. Plant Sci.* 16:1723949. doi: 10.3389/fpls.2025.1723949
- Hernando, H., Marpongahtun, Julianti, E., Nuryawan, A., Amaturrahim, S. A., Piliang, A. F. R., Yanhar, M. R., Goei, R., Soykeabkaew, N., Saputra, A. M. A., & Gea, S. (2024). *Impact of glycerol on oil palm trunk starch bioplastics enhanced with citric-acid epoxidized palm oil oligomers*. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10, 100839. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100839>
- Horn, M. M., Martins, V. C., & Plepis, A. M. (2023). Effect of amylopectin content on mechanical, barrier and thermal properties of plasticized Starch/Chitosan films. *Polysaccharides*, 4(3), 208-218. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128034>
- Iglesias-Sanchez, A., García-Carbonell, S., Fernie, A. R., Pujol, M., & Florez-Sarasa, I. (2026). Fruit respiration: putting alternative pathways into perspective. *New Phytologist*, 250(1), 54-73.

- Ilyas, R. A., Sapuan, S. M., & Norrrahim, M. N. F. (Eds.). (2023). *Nanocellulose-Reinforced Thermoplastic Starch Composites: Sustainable Materials for Packaging*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- Imoisili, P. E., & Jen, T.-C. (2021). *Synthesis and characterization of bioplastic films from potato peel starch; effect of glycerol as plasticizer*. *Bioresources and Bioprocessing*, 8, 45. <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00389-4>
- Indarti, E., Nurlaila, Muzaifa, M., Noviasari, S., Rozali, Z. F., & Yusup, E. M. (2022, January). Characteristics of avocado (*Persea americana*) and kluwih (*Artocarpus camansi*) seeds starch with different extraction methods. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 951, No. 1, p. 012095). IOP Publishing.
- Instituto Tecnológico de la Producción. (2023). *Boletín informativo OM-001-2023: Compuestos activos a partir de residuos de palta (Persea americana) y su aplicación industrial*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5431155/4852573-boletin-vei-om-001-2023-compuestos-activos-a-partir-de-residuos-de-palta.pdf>
- Iriondo-DeHond, A., Iriondo-DeHond, M., & del Castillo, M. D. (2020). Applications of compounds from coffee processing by-products. *Biomolecules*, 10(9), 1219. <https://doi.org/10.3390/biom10091219>
- Islam, M., Malakar, S., Rao, M. V., Kumar, N., & Sahu, J. K. (2023). Recent advancement in ultrasound-assisted novel technologies for the extraction of bioactive compounds from herbal plants: a review. *Food Science and Biotechnology*, 32(13), 1763-1782.
- Islam, M., Sinha, A. S. K., & Prasad, K. (2026). PLA/starch bi-layer films reinforced with rice straw cellulose nanofibers and functionalized with organosolv–lignin nanoparticles and grapefruit bioactives for shelf life extension of green grapes. *Sustainable Food Technology*.
- Islam, S., Shakil, M., Hossain Sarker, M. S., Nayem, M. F., Akter, T., Sachcha, I. H., & Yasmin, S. (2024). Effect of coating and coated paperboard packaging on the quality of grapes and apple during storage. *Journal of Food Quality*, 2024(1), 9983828.
- Jeencham, R., Chiaoketwit, N., Numpaisal, P. O., & Ruksakulpiwat, Y. (2024). Study of biocomposite films based on cassava starch and microcrystalline cellulose derived from cassava pulp for potential medical packaging applications. *Applied Sciences*, 14(10), 4242.
- Jiang, Z., Li, X., Peng, S., Li, X., Zhou, C., & Zhao, X. (2025). Effects of temperature on the

- physicochemical properties and volatile profiles of ‘Shine Muscat’ grape during postharvest storage. *Food Chemistry*, 469, 142546.
- Jiménez, R., Sandoval-Flores, G., Alvarado-Reyna, S., Alemán-Castillo, S. E., Santiago-Adame, R., & Velázquez, G. (2022). Extraction of starch from Hass avocado seeds for the preparation of biofilms. *Food Science And Technology*, 42. <https://doi.org/10.1590/fst.56820>
- Johansen, M. R., Christensen, T. B., Ramos, T. M., & Syberg, K. (2022). A review of the plastic value chain from a circular economy perspective. *Journal of Environmental Management*, 302, 113975.
- Karnwal, A., Rauf, A., Jassim, A. Y., Selvaraj, M., Al-Tawaha, A. R. M. S., Kashyap, P., ... & Malik, T. (2025). Advanced starch-based films for food packaging: Innovations in sustainability and functional properties. *Food Chemistry: X*, 29, 102662.
- Khalil, U., Rajwana, I. A., Razzaq, K., Farooq, U., Saleem, B. A., & Brecht, J. K. (2023). Quality attributes and biochemical changes in white and colored table grapes as influenced by harvest maturity and ambient postharvest storage. *South African Journal of Botany*, 154, 273-281.
- Kidanu, B. T., Tizazu, B. Z., Sibhatu, A. K., & Gemechu, F. G. (2026). Comparative experimental investigations of alkaline reagents on the delignification efficiency and cellulose recovery from Ethiopian coffee pulp waste. *Industrial Crops and Products*, 245, 123263.
- Kringel, D. H., Dias, A. R. G., Zavareze, E. d. R., & Gandra, E. A. (2020). Fruit Wastes as Promising Sources of Starch: Extraction, Properties, and Applications. *Starch- Stärke*, 72(3-4), 1900200.
- Kumari, S., Rao, A., Kaur, M., & Dhanial, G. (2025). Fabrication and characterization of eco-friendly bioplastics from potato peel starch and sugarcane bagasse cellulose. *Journal of Applied & Natural Science*, 17(4).
- Lacerda, L. D., da Silveira, N. P., Bondam, A. F., & Hoffmann, J. F. (2024). Starch gelatinization behavior: The impact of granular structure. *Starch-Stärke*, 76(7-8), 2300143.
- Landrigan, P. J., Raps, H., Cropper, M., Bald, C., Brunner, M., Canonizado, E. M., Charles, D., Chiles, T. C., Donohue, M. J., Enck, J., Fenichel, P., Fleming, L. E., Ferrier-Pages, C., Fordham, R., Gozt, A., Griffin, C., Hahn, M. E., Haryanto, B., Hixson, R., Ianelli, H.,

- ... Dunlop, S. (2023). The Minderoo-Monaco Commission on Plastics and Human Health. *Annals of global health*, 89(1), 23. <https://doi.org/10.5334/aogh.4056>
- Lestari, W., Hasballah, K., Listiawan, M. Y., & Sofia, S. (2023). Antioxidant and phytometabolite profiles of ethanolic extract from the cascara pulp of *Coffea arabica* collected from Gayo Highland: A study for potential anti-photoaging agent. *F1000Research*, 12, 12.
- Lieu, M. D., Phuong, T. V., Nguyen, T. T. B., Dang, T. K. T., & Nguyen, T. H. (2024). A review of preservation approaches for extending avocado fruit shelf-life. *Journal of Agriculture and Food Research*, 16, 101102.
- Lin, X., & Li, Z. (2024). Key components and multiple health functions of avocado oil: A review. *Journal of Functional Foods*, 122, 106494.
- Liu, S., Yu, D., Chen, Y., Shi, R., Zhou, F., & Mu, T. (2022). High-resolution thermogravimetric analysis is required for evaluating the thermal stability of deep eutectic solvents. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(38), 14347-14354.
- Liu, Y., Caratenuto, A., Zhang, X., Mu, Y., Jeyar, Y., Antezza, M., & Zheng, Y. (2025). Ultrawhite structural starch film for sustainable cooling. *Journal of Materials Chemistry A*, 13, 10792–10800.
- Lounis, F. M., Benhacine, F., & Hadj-Hamou, A. S. (2024). Improving water barrier properties of starch based bioplastics by lignocellulosic biomass addition: Synthesis, characterization and antibacterial properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 283, 137823.
- Lubis, M., Harahap, M., Ginting, M., Sartika, M. & Azmi, H. (2019). Production of Bioplastic from Avocado Seed Starch Reinforced with Microcrystalline Cellulose from Sugar Palm Fibers.
- Macena, J., De Souza, J., Camilloto, G., & Cruz, R. (2020). Physicochemical, morphological and technological properties of the avocado (*Persea americana* mill. cv. hass) seed starch. *Ciencia e Agrotecnologia*, 44. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202044001420>
- Machaca Ramos, C. E. (2022). Obtención de bioplástico a partir de almidón de la semilla de palta (*Persea americana*) variedad Hass y determinación de la biodegradabilidad [Universidad Nacional De Moquegua]. <https://repositorio.unam.edu.pe/items/ae00fa73-a788-443a-a711-43483dfecd6a>

- Mäder, G., et al. (2025). Utilizing spent coffee grounds as sustainable fillers in biopolymer composites: Influence of particle size and content. *Sustainable Food Technology*. <https://doi.org/10.1039/D5FB00187K>
- Majeed, T., Zubair, U., Asim, F., Sarwar, K., & Kaleem, S. (2023). *Seaweed selection: Exploring best type for bioplastic production*. *National Journal of Biological Sciences*, 4(2).
- Malarat, S., Khongpun, D., Limtong, K., Sinthuwong, N., Soontornapaluk, P., Sakdaronnarong, C., & Posoknistakul, P. (2023). Preparación de nanocelulosa a partir de pulpa de café y su potencial como refuerzo de polímeros. *ACS omega* , 8 (28), 25122-25133.
- Mamauod, M. I., Hassan, M. H. A., & Mamauod, S. N. L. (2024). The Effect of Glycerol Concentration on Starch-Based Bioplastics Derived from Banana Peels (*Musa acuminata*). *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 28(5), 1003-1011.
- Mangal, M., Rao, C. V., & Banerjee, T. (2023). Bioplastic: an eco-friendly alternative to non-biodegradable plastic. *Polymer International*, 72(11), 984-996.
- Martins, S. H. F., Pontes, K. V., Filgueiras, C. T., Nogueira, G. F., Fialho, R., & Fakhouri, F. M. (2025). Development and characterization of starch films extracted from avocado (*Persea americana* mill) seeds incorporated with avocado (*Persea Gratissima*) essential oil. *International journal of biological macromolecules*, 146624.
- Martins, S., Pontes, K., Fialho, R., & Fakhouri, F. (2022). Extraction and characterization of the starch present in the avocado seed (*Persea americana* mill) for future applications. *Journal Of Agriculture And Food Research*, 8, 100303. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100303>
- Matera, A., Altieri, G., Genovese, F., Scarano, L., Genovese, G., Pinto, P., & Di Renzo, G. C. (2024). Impact of the pre-harvest biocontrol agent and post-harvest massive modified atmosphere packaging application on organic table grape (cv. 'Allison') quality during storage. *Applied Sciences*, 14(7), 2871.
- Matos Medina, Ivonne Yadira, & Díaz Milla, Jackeline Brilly. (2022). *Caracterización de bandejas biodegradables de almidón y fibra de semilla de Persea americana y almidón de Mangifera indica* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Santa].
- Meira, G. R., & Gugliotta, L. M. (2022). *Polímeros: Introducción a su caracterización y a la ingeniería de la polimerización* (1.ª ed.). Ediciones UNL.
- Merino, D., Bertolacci, L., Paul, U. C., Simonutti, R., & Athanassiou, A. (2021). Avocado Peels

- and Seeds: Processing Strategies for the Development of Highly Antioxidant Bioplastic Films. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 13(32), 38688–38699. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c09433>
- MIDAGRI (2024) Las exportaciones agrarias del Perú en el 2023. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego.
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2024). *Problemática de los residuos plásticos en el Perú*. Gobierno del Perú.
- Miranda Urrutia, J. C. (2025). *Caracterización y evaluación de la biodegradación de microplásticos provenientes de fangos de humedal artificial mediante ensayos en microcosmos con distintas condiciones bióticas* [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València].
- Mohammed, A. A., Hasan, Z., Omran, A. A. B., Elfaghi, A. M., Ali, Y. H., Akeel, N. A., ... & Sapuan, S. M. (2023). Effect of sugar palm fibers on the properties of blended wheat starch/polyvinyl alcohol (PVA)-based biocomposite films. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 1043-1055.
- Muñiz-Márquez, D.B.a , Veana, F.b , Reyes, A.a , Wong-Paz, J.E.a. (2023). Valorización de desechos de café a través de su incorporación en el desarrollo de biopelículas de alimentos-Revisión. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*.https://riiit.com.mx/apps/site/files_v2450/bio-empaque_c._valles._7_riiit_div_may-jun_2023_v1.pdf
- Muñoz-Gimena, P. F., Aragón-Gutiérrez, A., Blázquez-Blázquez, E., Arrieta, M. P., Rodríguez, G., Peponi, L., & López, D. (2024). Avocado Seed Starch-Based Films Reinforced with Starch Nanocrystals. *Polymers*, 16(20), 2868. <https://doi.org/10.3390/polym16202868>
- Muñoz-Gimena, P. F., del Prado Abellán, A., Rodríguez, G., Aragón-Gutiérrez, A., Peponi, L., & López, D. (2026). Sustainable Bioactive Films From Avocado Seed Starch: Biodegradable Extruded Materials Reinforced With Starch Nanocrystals for Active Packaging. *eFood*, 7(2), e70130.
- Muñoz-Gimena, P. F., Oliver-Cuenca, V., Peponi, L., & López, D. (2023). A review on reinforcements and additives in starch-based composites for food packaging. *Polymers*, 15(13), 2972.

- Nakamura, Y., & Kainuma, K. (2022). On the cluster structure of amylopectin. *Plant Molecular Biology*, 108(4), 291-306.
- Nanda, S., Patra, B. R., Patel, R., Bakos, J., & Dalai, A. K. (2022). Innovations in applications and prospects of bioplastics and biopolymers: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(1), 379-395.
- Nascimento, A. P. S., Duarte, M. E. M., Rocha, A. P. T., & Barros, A. N. (2025). Bioactive Compounds, Technological Advances, and Sustainable Applications of Avocado (*Persea americana* Mill.): A Critical Review. *Foods*, 14(15), 2746. <https://doi.org/10.3390/foods14152746>
- Navarrete-Tumbaco, C. J., Mezones-Santana, J. A., Ponce, W., Brito, B., Viera, W., Mosquera, A. C., & Riera, M. A. (2023). Obtención y caracterización de bioplásticos a partir de almidón acetilado de semillas de aguacate. *Avances en Química*, 18(1).
- Navarro-Calderon, A., Falagan, N., Terry, L. A., & Alamar, M. C. (2023). Biomarkers of postharvest resilience: unveiling the role of abscisic acid in table grapes during cold storage. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1266807.
- Nolasco, A., J. Squillante, S. Velotto, G. D'auria, P. Ferranti, G. Mamone, ME Errico, et al. 2022. "Valorización del CaféResiduos industriales: Caracterización fisicoquímica integral de la cáscara plateada del café y su reciclaje multiusos.Aplicaciones." *Revista de Producción Más Limpia* 370:133520. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133520>
- Nwaka, E., Akomah, U. C., Maduoma, T. U., Ezeokolie, E. D., Menankiti, D. T., Osarenren, E., Donatus, U. D., Orji, C. H., Ekwem, C. H., & Oduaro, I. J. (2025). Optimizing the production of biodegradable chitosan-glycerol bioplastics from potato starch. *European Journal of Sustainable Development Research*, 9(3), em0309. <https://doi.org/10.29333/ejosdr/16354>
- Oliveira, G.; Passos, C.P.; Ferreira, P.; Coimbra, M.A.; Gonçalves, I. (2021).Coffee By-Products and Their Suitability for Developing Active Food Packaging Materials. *Foods*, 10, 683. <https://doi.org/10.3390/foods10030683>
- Olusanya, J. O., Mohan, T. P., & Kanny, K. (2023). Effect of nanoclay (NC) on mechanical and thermal properties of cellulose nanoparticles (CNPs) filled cornstarch bioplastic film. *Journal of Polymer Research*, 30(7), 262.
- Oluwasina, O., Aderibigbe, A., Ikupoluyi, S., Oluwasina, O., & Ewetumo, T. (2024). Physico-

- electrical properties of starch-based bioplastic enhanced with acid-treated cellulose and graphene oxide fillers. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 6, 100093.
- Onyeaka, H., Obileke, K., Makaka, G., & Nwokolo, N. (2022). Current Research and Applications of Starch-Based Biodegradable Films for Food Packaging. *Polymers*, 14(6), 1126. <https://doi.org/10.3390/polym14061126>
- Ortega-Rubio, Á. B., Balderas-López, J. A., & Jaime-Fonseca, M. R. (2026). *Microstructural and Thermo-Optical Properties of Cassava and Gellan Gum Films: A Photoacoustic Study*. **Polymers**, 18(3), 313. <https://doi.org/10.3390/polym18030313>
- Owoyemi, A., Balaklav, M., Kochanek, B., Porat, R., Koenigstein, N., Salzer, Y., & Lichter, A. (2024). Deviations from optimal storage temperature and its impact on postharvest quality of table grape cv. Scarlotta Seedless. *Postharvest Biology and Technology*, 215, 113013.
- Paluch, M., Ostrowska, J., Tyński, P. *et al.* Propiedades estructurales y térmicas del almidón plastificado con una mezcla de glicerol/urea. *J Polym Environ* 30 , 728–740. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02235-x>
- Pástor, P. G. M., Ulloa, K. E. V., & Pástor, J. A. M. (2025). Bioplásticos y su impacto ambiental: Producción a partir de fuentes renovables y comparación con plásticos convencionales. *Ciencia Latina: Revista Multidisciplinar*, 9(1), 10318-10334.
- Periyasamy, A. P. (2024). Recent advances in the remediation of textile-dye-containing wastewater: prioritizing human health and sustainable wastewater treatment. *Sustainability*, 16(2), 495.
- Rahman, M., & Bhoi, P. (2021). An overview of non-biodegradable bioplastics. *Journal of Cleaner Production*, 294(126218). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126218>
- Pooja, N., & Shashank, S. (2024). Advancing sustainable bioplastics: chemical and physical modification of starch films for enhanced thermal and barrier properties. *RSC advances*, 14(33), 23943-23951.
- Posada, N. C., Peña-Venegas, C. P., & Castellanos, D. A. (2026). Reinforcement Materials and Processing of Starch-Based Composites for Rigid and Semi-Rigid Food Packaging. *Journal of Food Process Engineering*, 49(2), e70381.
- Preedalikit, W., Chittasupho, C., Leelapornpisid, P., Potprommanee, S., & Kiattisin, K. (2023). Comparación de las actividades biológicas y los efectos protectores sobre el daño oxidativo inducido por HAP de diferentes extractos de pulpa de cereza de

- café. *Foods* , 12 (23), 4292.
- Prosky, L., Asp, N. G., Schweizer, T. F., Devries, J. W., & Furda, I. (1988). Determination of insoluble, soluble, and total dietary fiber in foods and food products: interlaboratory study. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists*, 71(5), 1017-1023.
- Punia Bangar S et al (2022) Enzymatic modification of starch: a green approach for starch applications. *Carbohydr Polym* 287:119265. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119265>
- Ranote, S., Kowalczyk, M., Guzenko, N., Duale, K., Chaber, P., Musioł, M., ... & Kumar, K. (2024). Hacia películas bioplásticas escalables y degradables a partir de goma de Moringa oleifera/poli(alcohol vinílico) como material de embalaje. *International Journal of Biological Macromolecules* , 269 , 132219.
- Rashwan, A. K., Younis, H. A., Abdelshafy, A. M., Osman, A. I., Eletmany, M. R., Hafouda, M. A., & Chen, W. (2024). Plant starch extraction, modification, and green applications: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 22(5), 2483-2530.
- Rebolledo-Hernández, M. V., Cocotle-Ronzón, Y., Hernández-Martínez, E., Morales-Zarate, E., & Acosta-Domínguez, L. (2023). Physicochemical, functional and flow properties of a coffee husk flour. *Ciencia ergo sum*, 30(3).
- Reichembach, L. H., Guerrero, P., de Oliveira Petkowicz, C. L., & de la Caba, K. (2024). Valorization of pectins from coffee wastes for the development of pectin-chitosan films. *Carbohydrate Polymers*, 334, 122057.
- Rengifo Reyes, D. A. y Téllez Espinosa, E. P. (2023) Elaboración de biopelícula a partir de la semilla de aguacate variedad Lorena. [Trabajo de grado, Fundación Universidad de América] Repositorio Institucional Lumieres. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/9145>
- Requelme Heredia, B. (2023). *Propuesta de economía circular del cultivo de café en productores de Ñunya Jalca, distrito Bagua Grande, 2021* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas]. Repositorio Institucional UNTRM.
- Rizal,+ S.; Abdul Khalil, H.; Hamid, S.A.; Ikramullah, I.; Kurniawan, R.; Hazwan, C.M.; Muksin, U.; Aprilia, S.; Alfatah, T. Coffee Waste Macro-Particle Enhancement in Biopolymer Materials for Edible Packaging. *Polymers* 2023, 15, 365. <https://>

doi.org/10.3390/polym15020365

- Rizkiansyah, R. R., Mardiyati, Y., Hariyanto, A., & Dirgantara, T. (2023). Arabica Coffee pulp cellulose: isolation, morphology, and its capabilities to be modified into cellulose nitrate. In *BIO Web of Conferences* (Vol. 77, p. 01001). EDP Sciences.
- Rodríguez-Martínez, B., Román, A., Eibes, G., Garrote, G., Gullón, B., & Del Río, P. G. (2022). Potential and prospects for utilization of avocado by-products in integrated biorefineries. *Bioresource Technology*, 364, 128034.
- Rodriguez-Quiroz, E. S., Olivares-Xometl, O., Santacruz-Vázquez, V., Santacruz-Vázquez, C., Arellanes-Lozada, P., & Rubio-Rosas, E. (2023). Production of Cellulosic Microfibers from Coffee Pulp via Alkaline Treatment, Bleaching and Acid Hydrolysis. *Materials*, 16(24), 7607.
- Rohaya, S., Anwar, S. H., Amhar, A. B., Sutriana, A., & Muzaiifa, M. (2023, June). Antioxidant activity and physicochemical composition of coffee pulp obtained from three coffee varieties in Aceh, Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1182, No. 1, p. 012063). IOP Publishing.
- Rojas Medina, G. (2021). Análisis preliminar en procesos de almidón termoplástico para la generación de bioplástico a partir de tres semillas aguacate, mango y tamarindo. [Universidad Antonio Nariño]. <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/5008>.
- Rojas-Orduña E, Hernández-Carrión M, Gómez-Franco JD, Narváez-Cuenca C-E and Sánchez-Camargo AP (2023) Utilization of red and yellow Coffea arabica var. Caturra pulp: macronutrient analysis, carotenoid extraction, and encapsulation for dairy product enrichment. *Front. Nutr.* 10:1231049. doi: 10.3389/fnut.2023.1231049
- Romero, I., Vazquez-Hernandez, M., Maestro-Gaitan, I., Escribano, M. I., Merodio, C., & Sanchez-Ballesta, M. T. (2020). Table grapes during postharvest storage: A review of the mechanisms implicated in the beneficial effects of treatments applied for quality retention. *International journal of molecular sciences*, 21(23), 9320.
- Rumyaan, M., Polnaya, F. J., & Tuhumury, H. C. (2022). Characteristics of edible film made from bitter cassava starch with glycerol. *AGRITEKNO: Jurnal Teknologi Pertanian*, 11(2), 102-107.
- Rusdianto, A. S., Usman, M., Lindriati, T., Ruriani, E., & Mahardika, N. S. (2022). The Characterization of Biodegradable Plastics from Cassava Starch with Varried Addition of Robusta Coffee Skin (*Coffea canefora*) and Glycerol. *International Journal on Food*,

- Agriculture and Natural Resources*, 3(3), 34-38.
- Rusliman, D., Aflaha, R., Muna, A., Salsabila, S., Triyana, K., Rianjanu, A., ... & Wasisto, H. S. (2026). Self-healable and biodegradable konjac-glucomannan-blended sodium alginate films for food packaging. *Sustainable Food Technology*, 4(3), 2953-2966.
- Salazar Maco, E. (2023). *Propuesta de reducción de residuos plásticos en el Perú* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio PUCP
- Salazar-Lopez, ´ N.J., Domínguez-Avila, J.A., Yahia, E.M., Belmonte-Herrera, B.H., WallMedrano, A., Montalvo-Gonz´ alez, E., Gonzalez-Aguilar, ´ G.A., 2020. Avocado fruit and by-products as potential sources of bioactive compounds. *Food Res. Int.* 138 <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109774>.
- Salort Sansaloni, M. (2025). *Desarrollo de bioplásticos a partir de residuos orgánicos agrícolas: Revisión crítica de materias primas, métodos de obtención y viabilidad ambiental* [Trabajo de fin de grado, Universitat Politècnica de València].
- Sánchez, H., Ponce, W., Brito, B., Viera, W., Baquerizo, R., & Riera, M. (2022). Biofilms production from avocado waste. *Ingenieria y Universidad*, 25. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iued25.bpaw>
- Santhosh, R., Ahmed, J., Thakur, R., & Sarkar, P. (2024). Starch-based edible packaging: Rheological, thermal, mechanical, microstructural, and barrier properties—A review. *Sustainable Food Technology*, 2, 307–330. <https://doi.org/10.1039/D3FB00211J>
- Sares, L. A. C., Cabrera, G. A., Toro, D. A., & Bravo, V. P. B. (2023). Efecto del glicerol como plastificante en películas de almidón de maíz modificado. *Journal of Science and Research: Revista Ciencia e Investigación*, 8(4), 186-204.
- Schutz, G.F., Alves, R.M.V. & Vieira, R.P. (2023). Development of Starch-Based Films Reinforced with Coffee Husks for Packaging Applications. *J Polym Environ* 31, 1955–1966. <https://doi.org/10.1007/s10924-022-02733-6>
- Semple, K., Zhou, C., Rojas, O., Nkeuwa, W., & Dai, C. (2022). Moulded pulp fibers for disposable food packaging: A state-of-the-art review. *Food Packaging and Shelf Life*, 33(100908). <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100908>
- Sethi, S., Choudhary, P., Nath, P., & Chauhan, O. P. (2022). Starch gelatinization and modification. In *Advances in food chemistry: Food components, processing and preservation* (pp. 65-116). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Shafqat, A., Al-Zaqri, N., Tahir, A., & Alsalmeh, A. (2021). Synthesis and characterization of

- starch based bioplastics using varying plant-based ingredients, plasticizers and natural fillers. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(3), 1739-1749.
- Shahar, F., Balakrishnan, T., & Thariq, M. (2025). The evolution and environmental prospects of renewable bioplastics: types, production methods, and sustainability. *Journal of Renewable Materials*, 13(6), 1071.
- Shanbhag, C., Shenoy, R., Bhat, S., & Kalmakar, A. (2023). Formulation and characterization of starch-based novel biodegradable edible films for food packaging. *Journal of Food Science and Technology*, 60, 3194–3204. <https://doi.org/10.1007/s13197-023-05803-2>
- Sharma, M. K., Bhuvaneswari, S., Lautre, H. K., Sundramurthy, V. P., Mohanasundaram, S., Khaled, J. M., & Thiruvengadam, M. (2025). Cellulose fortified bio-composite film preparation using starch isolated from waste avocado seed: starch properties and film performance. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(19), 26267-26284.
- Shen, L., & Worrell, E. (2024). Plastic recycling. In *Handbook of recycling* (pp. 497-510). Elsevier.
- Silva, MDO, Honfoga, JNB, Medeiros, LLD, Madruga, MS, & Bezerra, TKA (2020). Obtención de compuestos bioactivos de la cáscara de café (*Coffea arabica* L.) utilizando diferentes métodos de extracción. *Molecules*, 26 (1), 46.
- Silva, R. J., de Aguiar, A. C., Simões, B. M., da Silva, S. C., Higuchi, M. T., Roberto, S. R., & Yamashita, F. (2024). Biodegradable polymer packaging system for ‘Benitaka’ table grapes during cold storage. *Polymers*, 16(2), 274.
- Singh, G. P., Bangar, S. P., Yang, T., Trif, M., Kumar, V., & Kumar, D. (2022). Effect on the properties of edible starch-based films by the incorporation of additives: a review. *Polymers*, 14(10), 1987.
- Sirbu, E. E., Dinita, A., Tănase, M., Portoacă, A. I., Bondarev, A., Enascuta, C. E., & Calin, C. (2024). Influence of plasticizers concentration on thermal, mechanical, and physicochemical properties on starch films. *Processes*, 12(9), 2021.
- Skorupa A, Worwąg M, Kowalczyk M. Coffee Industry and Ways of Using By-Products as Bioadsorbents for Removal of Pollutants. *Water*. 2023; 15(1):112. <https://doi.org/10.3390/w15010112>
- Solomakou, N., Loukri, A., Tsafrakidou, P., Michaelidou, A. M., Mourtzinis, I., & Goula, A. M. (2022). Recovery of phenolic compounds from spent coffee grounds through optimized extraction processes. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 25, 100592.

- Songtipya, P., Prodpran, T., Songtipya, L., & Sengsuk, T. (2024). Synergism of Zinc Oxide/Organoclay-Loaded Poly (lactic acid) Hybrid Nanocomposite Plasticized by Triacetin for Sustainable Active Food Packaging. *Journal of Renewable Materials*, 12(5).
- Su, C. Y., Li, D., Wang, L. J., & Wang, Y. (2023). Biodegradation behavior and digestive properties of starch-based film for food packaging—a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(24), 6923-6945.
- Suhartini, Solihat, I., Foliatini, Setyawati, S.R., Nurdiani, Sulistiawaty, L., & Khoirurrizal, M.F. (2023). Synthesis and characterization of nano chitosan- avocado seed starch as edible films. *Jurnal Kimia Riset*. <https://e-journal.unair.ac.id/JKR/article/view/43394/25046>
- Susilowati, S., Putra, G. A., Ni'am, H. M., & Nurherdiana, S. D. (2025). Impact of Plasticizer Type and Volume on the Properties of Bio-Plastics from Avocado Seed Starch with Chitosan Filler. *Jurnal Kimia Riset*, 10(2), 178.
- Tabassum, Z., Girdhar, M., Anand, A., Kumari, N., Sood, B., Malik, T., ... & Mohan, A. (2025). Trash to treasure: advancing resource efficiency using waste-derived fillers as sustainable reinforcing agents in bioplastics. *Materials Advances*, 6(2), 527-546.
- Tafa, K. D., Satheesh, N., & Abera, W. (2023). Mechanical properties of tef starch based edible films: Development and process optimization. *Heliyon*, 9(2), e13160. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13160>
- Tan, S. X., Andriyana, A., Ong, H. C., Lim, S., Pang, Y. L., & Ngoh, G. C. (2022). A Comprehensive Review on the Emerging Roles of Nanofillers and Plasticizers towards Sustainable Starch-Based Bioplastic Fabrication. *Polymers*, 14(4), 664. <https://doi.org/10.3390/polym14040664>
- Tan, S. X., Ong, H. C., Andriyana, A., Lim, S., Pang, Y. L., Kusumo, F., & Ngoh, G. C. (2022). Characterization and Parametric Study on Mechanical Properties Enhancement in Biodegradable Chitosan-Reinforced Starch-Based Bioplastic Film. *Polymers*, 14(2), 278. <https://doi.org/10.3390/polym14020278>
- Tarique, J., Sapuan, S. M., & Khalina, A. (2021). Effect of glycerol plasticizer loading on the physical, mechanical, thermal, and barrier properties of arrowroot (*Maranta arundinacea*) starch biopolymers. *Scientific Reports*, 11, 13900. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93094-y>
- Tassew, N. A., Andualem, T. L., D M, R. P., Endeshaw, M. A., & Ramesh, R. (2025). Avocado

- seed starch bioplastic film reinforced with enset cellulose for sustainable packaging. *Scientific Reports*, 15, 41075. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-24935-3>
- Temesgen, S. , M. Rennert , T. Tesfaye y M. Nase . (2021). Revisión sobre el hilado de fibras de biopolímeros a partir de almidón . *Polymers* 13 , n.º 7 : 1121. <https://doi.org/10.3390/polym13071121>
- Tesfaye, T., Ayele, M., Ferede, E., Gibril, M., Kong, F., & Sithole, B. (2021). A techno-economic feasibility of a process for extraction of starch from waste avocado seeds. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23(2), 581-595.
- Tkachenko, Y., & Niedzielski, P. (2022). FTIR as a method for qualitative assessment of solid samples in geochemical research: A review. *Molecules*, 27(24), 8846.
- Tomé, A. E. S., Camilo, Y. B., Santos, N. C., Rosendo, P. P. D., de Oliveira, E. A., Matias, J. G., Morais, S. K. Q., Gusmão, T. A. S., Gusmão, R. P. d., Gomes, J. P., & Rocha, A. P. T. (2026). Effect of Fluidized Bed Drying on the Physicochemical, Functional, and Morpho-Structural Properties of Starch from Avocado cv. Breda By-Product. *Processes*, 14(1), 122. <https://doi.org/10.3390/pr14010122>
- Tong, X., Song, H., Chen, Y., Shi, N., Shi, P., Yu, L., ... & Luo, H. (2024). 1-MCP combined with laser microporous film packaging maintains the quality and prolongs the storage period of Xiahei grapes. *International Journal of Food Science and Technology*, 59(3), 1550-1559.
- Tran, T. M. K., Akanbi, T. O., Kirkman, T., Nguyen, M. H., & Vuong, Q. V. (2022). Recovery of phenolic compounds and antioxidants from coffee pulp (*Coffea canephora*) waste using ultrasound and microwave-assisted extraction. *Processes*, 10(5), 1011.
- Trejo Cuevas, K., Rodríguez Castillejos, G., Reyes Gallardo, J., Lizarazo Ortega, C., & Hernández Jiménez, C. (2024). Almidón, una plataforma versátil en la industria de alimentos. *Revista Boliviana de Química*, 41(1), 59-66.
- Tsioptsias, C. (2022). On the latent limit of detection of thermogravimetric analysis. *Measurement*, 204, 112136.
- Vallejos-Jiménez, A., Cadena-Chamorro, EM, Santa, JF *et al.* Desarrollo de nuevas películas a base de pectina a partir de residuos de café: mucílago y pulpa. *Waste Biomass Valor* 16 , 5503–5518 (2025). <https://doi.org/10.1007/s12649-025-02926-9>
- Van Nguyen, D., Duong, C. T. T., Vu, C. N. M., Nguyen, H. M., Pham, T. T., Tran-Thuy, T.

- M., & Nguyen, L. Q. (2023). Data on chemical composition of coffee husks and lignin microparticles as their extracted product. *Data in Brief*, 51, 109781.
- Villar, J., Roncal Huaman, I. P., Bazán, D. L., Teran Hilaes, R., & Brambilla Rodrigues, R. D. C. L. (2026). Hydrothermal–Membrane Valorization of Coffee Pulp for Xylooligosaccharide Production. *Processes*, 14(1), 153.
- Vivas, E. A., Castillo, H. S. V., & Acosta, E. G. (2025). Physicochemical and structural characterization of coffee husks for sustainable applications in biodegradable materials. *Journal of Natural Fibers*, 22(1), 2453489.
- Waday, Y. A., & Aklilu, E. G. (2023). ANN and RSM modeling for the synthesis of avocado seed starch combined orange peel extract antimicrobial packaging film. *International Journal of Polymer Science*, 2023(1), 8877598.
- Wahyudi, M. N., Hartanti, A., Saria, D. A., Hakim, M. F., & Aeni, A. R. (2025). Bioplastics from Avocado Seed Starch: Effects of Chitosan and PVA on Mechanical Properties, Water Resistance, and Biodegradability. *Journal of Chemical Process Engineering*, 10(1), 30-39.
- Wang, B., Xu, X., Fang, Y., Yan, S., Cui, B., & Abd El-Aty, A. M. (2022). Effect of Different Ratios of Glycerol and Erythritol on Properties of Corn Starch-Based Films. *Frontiers in Nutrition*, 9, 882682. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.882682>
- Wang, J., Li, Y., Jin, Z., & Cheng, Y. (2022). Physicochemical, Morphological, and Functional Properties of Starches Isolated from Avocado Seeds, a Potential Source for Resistant Starch. *Biomolecules*, 12(8), 1121. <https://doi.org/10.3390/biom12081121>
- Wang, J., Xu, X., Cui, B., Wang, B., & Abd El-Aty, A. M. (2024). Changes in the properties of the corn starch glycerol film in a time-dependent manner during gelatinization. *Food Chemistry*, 458, 140183.
- Wang, Q., Chen, W., Zhu, W., McClements, D. J., Liu, X., & Liu, F. (2022). A review of multilayer and composite films and coatings for active biodegradable packaging. *npj Science of Food*, 6(1), 18.
- Wang, Y., Ou, X., Al-Maqtari, Q. A., He, H. J., & Othman, N. (2024). Evaluation of amylose content: Structural and functional properties, analytical techniques, and future prospects. *Food Chemistry: X*, 24, 101830.
- Wardana, A. A., Febrianto, N. A., Marcellino, V., Wigati, L. P., Nkede, F. N., Tanaka, F., &

- Tanaka, F. (2025). Potency of coffee by-products as sustainable added material in bio/edible film development. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1667255.
- Williams, R.; Wu, W Grace.; Tsai, Y.; Bates, G. (1958). Varietal differences in amylose content of rice starch. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 6: 47-48
- Wu, W., Jiang, B., Liu, R., Han, Y., Fang, X., Mu, H., ... & Gao, H. (2023). Structures and functions of cuticular wax in postharvest fruit and its regulation: A comprehensive review with future perspectives. *Engineering*, 23, 118-129.
- Yan, X., McClements, D. J., Luo, S., Liu, C., & Ye, J. (2024). Recent advances in the impact of gelatinization degree on starch: Structure, properties and applications. *Carbohydrate Polymers*, 340, 122273.
- Yiga, V., Pagel, S., Lubwama, M., Epple, S., Olupot, P., & Bonten, C. (2020). Development of fiber-reinforced polypropylene with NaOH pretreated rice and coffee husks as fillers: Mechanical and thermal properties. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*;33(9):1269-1291. doi: 10.1177/0892705718823255
- Yildirim-Yalcin, M., Ceyhan, T., Olcay, H. S., Ozmen, D., & Toker, O. S. (2026). Characterization of the properties of modified avocado seed starches by heat-moisture treatment, cross-linking and oxidation and their applications in packaging film. *International Journal of Biological Macromolecules*, 150100.
- Zelege, N. M., Sinha, D. K., & Mengesha, G. A. (2022). Chemical composition and extraction of micro crystalline cellulose from outer skin isolated coffee husk. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022(1), 7163359.
- Zhiguang, C., Haixia, Z., Min, C. *et al.* (2025). The fine structure of starch: a review. *npj Sci Food* 9, 50. <https://doi.org/10.1038/s41538-025-00414-x>
- Zhong, Y., Tai, L., Blennow, A., Ding, L., Herburger, K., Qu, J., ... & Liu, X. (2023). High-amylose starch: Structure, functionality and applications. *Critical reviews in food science and nutrition*, 63(27), 8568-8590.
- Zhu, S., Liu, J., Yang, Q., Jin, Y., Zhao, S., Tan, Z., ... & Zhang, H. (2023). El impacto de la compresión mecánica en la calidad poscosecha de las uvas 'Shine Muscat' durante el almacenamiento a corto plazo. *Agronomía* , 13 (11), 2836.
- Zúniga, M. M. G., Ding, R., Oh, E., Nguyen, T. B., Tran, T. T., Nam, J. D., & Suhr, J. (2024).

Avocado seed starch utilized in eco-friendly, UV-blocking, and high-barrier polylactic acid (PLA) biocomposites for active food packaging applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 265, 130837.

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Materias primas

Recolección de Palta Var. Fuerte



Recolección de residuos generados en la producción de café.



Anexo 2. Extracción de almidón

Semillas de palta



Pesado de semilla de palta.



Preparación de solución desinfectante



Lavado de semillas de palta



Pelado de las semillas de palta



Pesado de las semillas de palta sin cascara



Cortado de las semillas de palta



Adición de agua y licuado de las semillas



Filtrado de la mezcla licuada



Sedimentación del almidón



Secado del almidón de semilla de palta



Molido de almidón seco con la ayuda de un mortero.



Tamizado del almidón de semilla de palta



Almidón obtenido de las semillas de palta Var. Fuerte



Anexo 3. Obtención de harina de residuos de café

Secado de residuos de café



Pesado de los residuos de café



Uso de molienda



Harina obtenida de los residuos de café



Tamizado de la harina



Harina tamizada de residuos de café.



Anexo 4. Análisis de humedad

Pesado de las placas a utilizar.



Pesado de harina de café.



Pesado de muestra de almidón



Secado de las muestras en la estufa



Pesado de las muestras de la estufa.



Anexo 5. Analisis contenido de amilosa y amilopectina

Reactivos (etanol al 99%, solución de hidróxido de sodio 1M, ácido acético 1M y solución de yodo)



Pesado de la muestra en el matraz.



Adición del etanol y solución de hidróxido de sodio.



La solución de muestra se mezcló y calentó x 10 min.



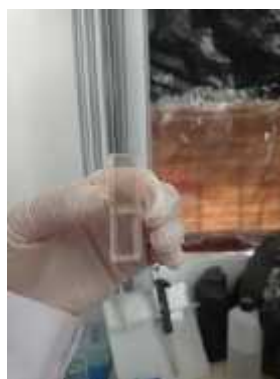
Adición de ácido acético y solución de yodo.



Se enraso hasta 100 ml.



Preparación de las muestras en las celdas.



Lectura en el espectrofotómetro.



Anexo 6. *Lectura de las muestras en el espectrofotómetro.*

Muestra	Abs	620 nm
Blanco		0.0000
Almidón R1	0.2546	0.2546
Almidón R2	0.1614	0.1614
Almidón R3	0.2028	0.2028
Promedio	0.2063	0.2063

Anexo 7. *Lectura de las muestras en el espectrofotómetro.*

Muestra	Amilosa %	Amilopectina %
Blanco	0.006	99.994
Almidón R1	15.582	84.418
Almidón R2	9.878	90.122
Almidón R3	12.411	87.589
Promedio	12.624	87.376
Desviación estándar*	2.858%	2.858%

Nota: Esto indica que las muestras tienen una variabilidad relativamente baja y un equilibrio claro entre los contenidos de amilosa y amilopectina.

Por lo tanto, de la tabla presentada tenemos:

- Blanco: Representa un valor de cero para la amilosa (0.006%) y todo como amilopectina (99.994%). Esto confirma que es el control y no contiene almidón significativo.
- Almidón de semilla de palta (promedio): Tiene 12.624% de amilosa y 87.376% de amilopectina.

Anexo 8. Prueba de gelatinización

Pesado del almidón de semilla de palta



Calentamiento del almidón de semilla de palta



Almidón de semilla de palta gelatinizado



Anexo 9. Análisis de proteínas

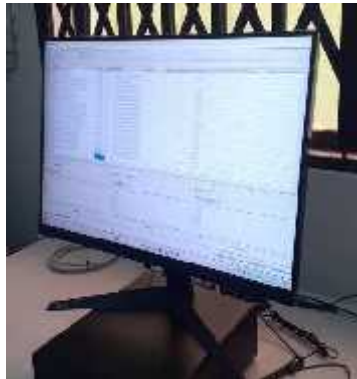
Pesado de las muestras a utilizar



Preparación de las muestras



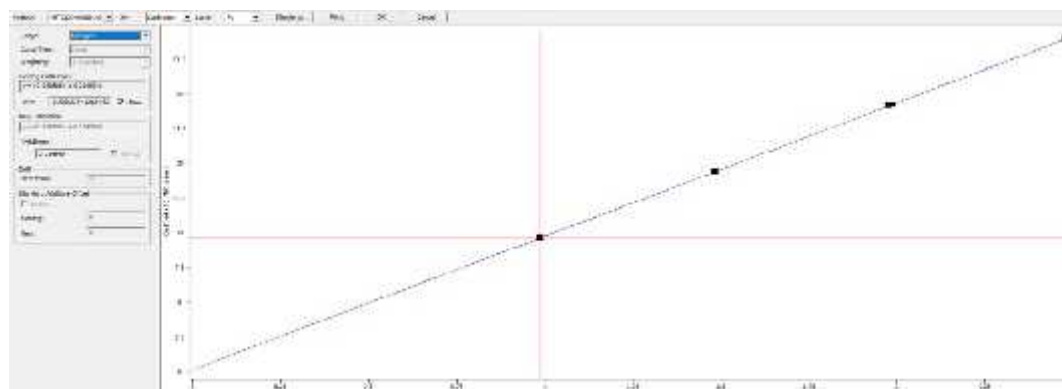
Configuración del equipo y datos de las muestras



Equipo para el método DUMAS



Análisis de proteína del almidón de semilla de palta y harina de residuos de café



Anexo 10. Análisis de grasa

Pesado de los balones



Pesado de las muestras a utilizar



Muestras pesadas y listas para extracción.



Método de extracción por Soxhlet



Grasa extraída en balón



Pesado de los balones



Anexo 11. Análisis de cenizas

Pesado de los crisoles



Pesado de las muestras a utilizar



Quemado de las muestras.



Ingreso de muestras a la mufla



Muestras calcinadas



Pesado de las muestras calcinadas



Anexo 12. Análisis de contenido de fibra

Pesado de muestras desgrasadas



Buffer fosfato pH 6 más enzima α -amilasa



Frascos a baño maría



Ajustamos pH y agregamos amilogrucasidasa



Luego del baño maría se agrega alcohol



Se humedece el celite y se monta el equipo se lavan los residuos con alcohol y acetona



Se lleva a la estufa por 12 h a 105°C



Muestras a pesar para determinar fibra



Anexo 13. Preparación de muestra para medir capacidad antioxidante

Peso de la harina de residuos de café.



Filtrado

Agitación en baño maría ultrasonido.



Centrifugado de extracto x 10 min.



Precipitado.



Separación del precipitado.



Acondicionamiento de la muestra.



Anexo 14. Determinación de contenido de celulosa y lignina

Se pesa 1 g de harina de café



Se mezcla con 120 ml de agua a 100°C x 1h



Se filtra y el residuo se seca en la estufa



Se prepara 100 ml de H₂SO₄ a 0.5M



Peso del residuo después de la estufa



Se mezcla con H₂SO₄ 0.5M a 100°C x1h.



Se filtro y se obtuvo residuo



Se coloco residuo a secar en la estufa



Peso de residuo seco



Se preparo 10 ml de H_2SO_4 AL 72%



Se agito el residuo con el acido x 4h



Se filtro para obtener residuo para secarlo



Peso del residuo seco



Peso del crisol que ira con la muestra



Mufla a 550°C x 3 h



Abertura de la mufla para enfriar



Peso del residuo final



Anexo 15. Análisis DPPH

Metanol



DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidracilo) y Trolox
(6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman)



Pesado de Dpph.



Disuelto en 50 ml de metanol.



Pesado de trolox.



Aforado con 50 ml de metanol.



Preparación de los reactivos.



Preparación de la curva de calibrado.



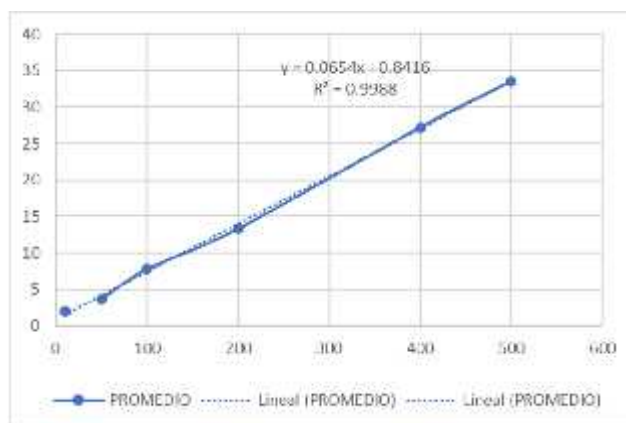
Muestras diluidas.



Lectura de las muestras en el equipo.



Anexo 16. Curva de calibración de Trolox mediante el método DPPH para el análisis de capacidad antioxidante del extracto de polvo de café.



Anexo 17. Tabla de resultados – capacidad antioxidante extracto de harina de residuos de café.

Muestra	%DDPPH REDUCIDO			uMol trolox			uMol trolox/g			Prom.	Desv.
Extracto	46.030	46.755	47.803	690.951	702.045	718.069	30.773	31.282	32.237	31.431	0.775

Anexo 18. Preparación de películas

Pesado del almidón, harina de residuos de café y glicerina.



Adición del almidón y harina de residuos de café.



Agitación de la mezcla.



Calentamiento hasta alcanzar gelatinización.



Enfriado y adición de la glicerina.



Peso del contenido a verter en el molde.



Solución vertida en el molde



Secado de los tratamientos.



Bioplástico de almidón de semilla de palta y harina de residuos de café



Anexo 19. Medición de espesor de bioplásticos

Micrómetro digital para medir espesor

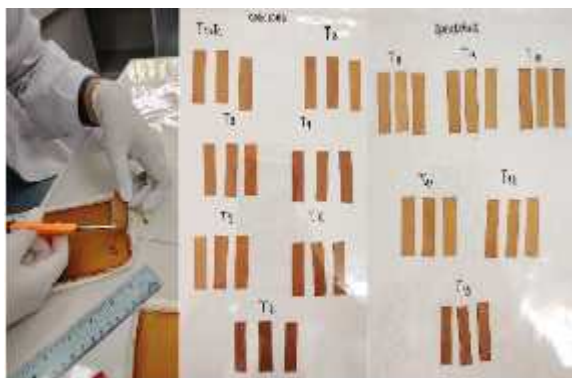


Medición en 6 puntos al azar



Anexo 20. Medición de opacidad de bioplásticos

Se corta las tiras a lectura de todos los tratamientos



Se lectura el blanco a 560 nm en el espectrofotómetro



Se colocan las muestras en las celdas y se lectura

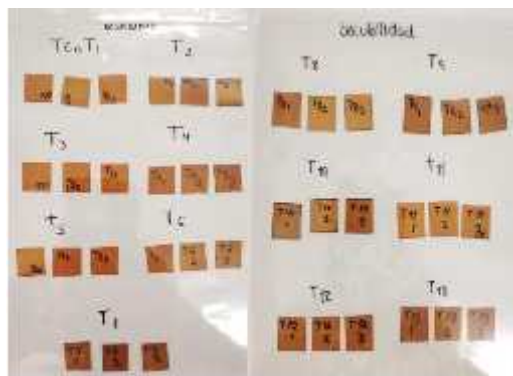


Resultado de cada tratamiento con repetición



Anexo 21. Determinación de solubilidad en bioplásticos

Tratamientos recortados 1.5 x 1.5 cm



Muestras se colocan en placa Petri



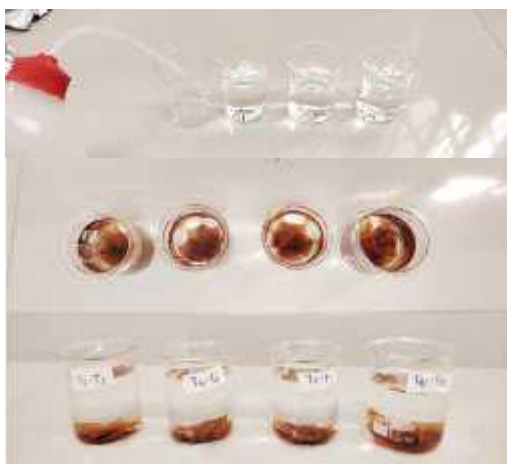
Se coloca en la estufa a 105°C x 24 h



Luego de enfriar se procede a pesar



Se sumergen en agua destilada por 24 h



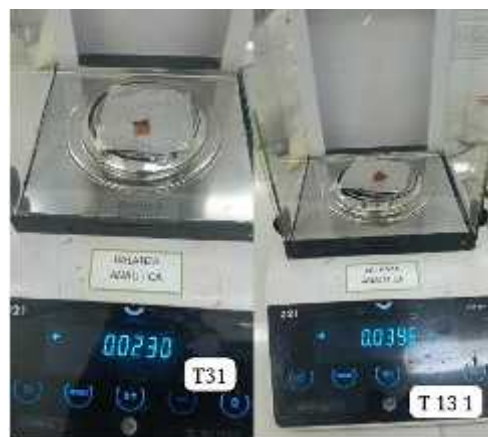
Para el exceso de agua se coloca en papel filtro



Se vuelve a secar a 105°C x 24 hr



Se mide el peso final

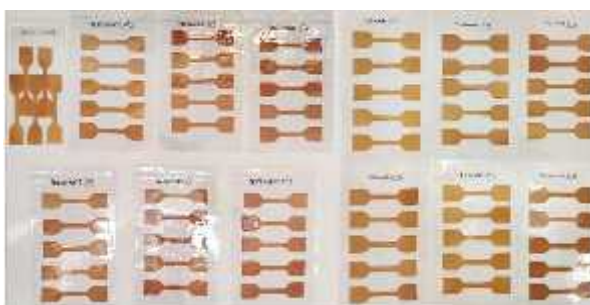


Anexo 22. Análisis de Texturometría en bioplásticos

Se coloca el molde y se recorta



Muestras de cada uno de los tratamientos



Se acondiciona el equipo y se coloca muestra



Resultados de la medición en el texturometro



Anexo 23. Resultados mecánicos de los bioplásticos

Trat.	espesor	Tracción (Mpa)			% Elasticidad			Módulo de Young (Mpa)		
TR1.1	0.148	2,673 N	3.01		8.409			259.034		
TR1.2	0.148	3,947 N	3.938	0.88	3.909	7.403	1.76	8.8783	258.918	4.91 256.14
TR1.3	0.153	4.388 N	4.779			10.82			250.469	
TR2.1	0.154	3,424 N	3.705			3.511			248.357	
TR2.2	0.172	3.366 N	3.262	0.31	3.3587	7.025	2.03	5.85	222.812	12.78 235.872
TR2.3	0.162	3.022 N	3.109			7.014			236.448	
TR3.1	0.151	3.517 N	3.882			7.094			253.748	
TR3.2	0.155	1.671 N	1.797	1.39	3.3743	3.869	1.67	5.7353	247.039	6.41 247.24
TR3.3	0.159	4.240 N	4.444			6.243			240.933	
TR4.1	0.17	2.888 N	2.831			3.725			225.163	
TR4.2	0.175	3.971 N	3.782	0.73	2.9897	3.464	0.30	3.7483	218.565	6.74 218.469
TR4.3	0.181	2.559 N	2.356			4.056			211.68	

Trat.	espesor	Tracción (Mpa)				% Elasticidad			Módulo de Young (Mpa)			
TR5.1	0.155	2.911 N	3.13			7.95			247.324			
TR5.2	0.147	2.868 N	3.252	0.56	2.871	8.401	0.70	7.7917	260.784	17.78	244.551	
TR5.3	0.176	2.276 N	2.231			7.024			225.546			
TR6.1	0.156	3.346 N	3.575			5.379			245.689			
TR6.2	0.187	2.538N	2.488	0.73	2.7477	7.524	1.34	5.992	225.49	10.12	235.939	
TR6.3	0.162	2.119 N	2.18			5.073			236.637			
TR7.1	0.169	2.841 N	2.802			4.184			226.869			
TR7.2	0.175	3.336 N	3.177	0.48	3.2473	4.356	0.17	4.3563	218.795	7.10	219.457	
TR7.3	0.187	4.064 N	3.763			4.529			212.707			
TR8.1	0.183	5.739 N	5.659			6.267			226.575			
TR8.2	0.166	4.703 N	4.722	0.81	5.5741	7.822	1.30	7.6437	230.843	10.93	234.897	
TR8.3	0.153	5.898 N	6.3412			8.842			247.274			
TR9.1	0.158	5.313 N	5.433			4.505			234.868			
TR9.2	0.195	5.521 N	4.894	0.87	5.643	6.272	1.14	5.8087	203.697	15.89	217.487	
TR9.3	0.179	7.091 N	6.602			6.649			213.895			
TR10.1	0.183	7.690 N	7.003			3.547			208.749			
TR10.2	0.179	6.339 N	5.902	1.02	5.956	6.176	1.45	5.2117	213.939	10.15	205.677	
TR10.3	0.201	5.867 N	4.963			5.912			194.342			
TR11.1	0.18	6.156 N	5.7			6.611			212.814			
TR11.2	0.19	4.697 N	4.12	1.07	4.4927	7.456	1.98	5.917	201.663	7.56	204.292	
TR11.3	0.195	4.237 N	3.658			3.684			198.399			
TR12.1	0.189	3.886 N	3.427			11.841			202.832			
TR12.2	0.197	4.212 N	3.6	0.57	3.8413	10.65	0.65	11.393	196.541	3.20	200.014	
TR12.3	0.189	5.153 N	4.497			11.688			200.668			
TR13.1	0.198	6.439 N	5.42			7.683			193.389			
TR13.2	0.202	5.981 N	4.935	0.58	4.8747	8.785	0.89	7.832	189.712	2.17	192.218	
TR13.3	0.198	5.071 N	4.269			7.028			193.554			

Anexo 24. Análisis de permeabilidad de los bioplásticos

Acondicionamiento de la campana



Se recorta el bioplástico al tamaño



Se agrego 9 gr de gel de sílice en la copa



Se coloca el bioplástico y se sella



Copas dentro de la campana por 7 hr

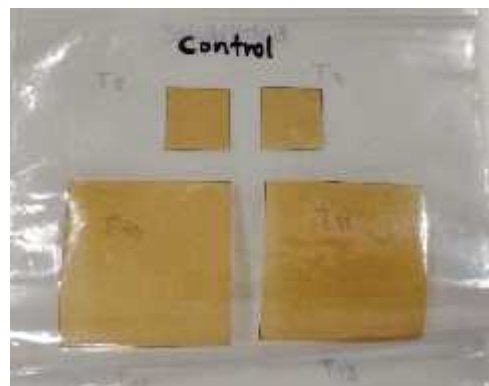


Se controla peso en intervalos de 1 hora

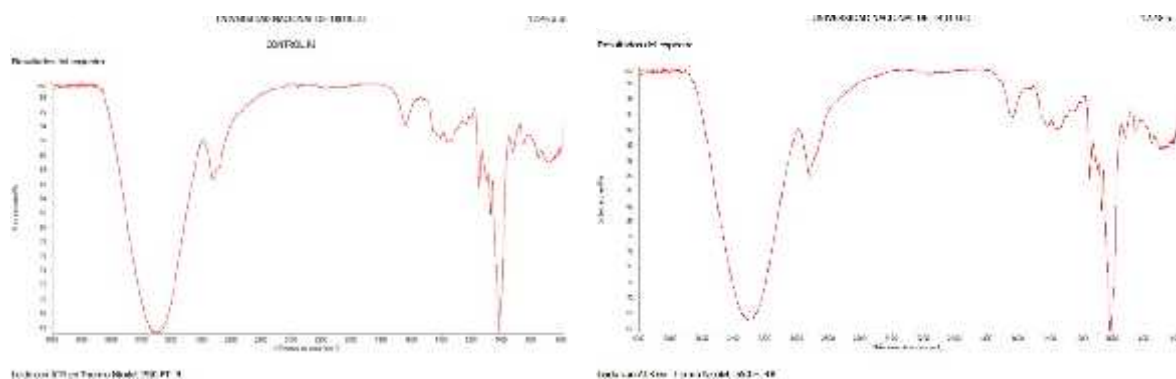


Anexo 25. Análisis de FTIR y TGA de los bioplásticos

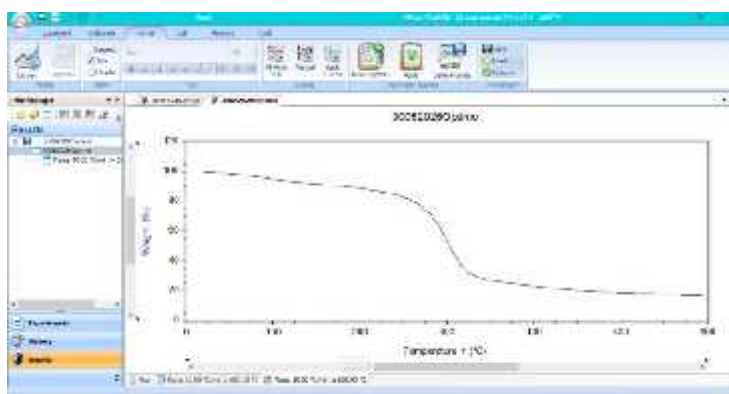
Se cortaron los bioplásticos con las medidas respectivas para en análisis de FTIR y TGA



Reporte grafico de los bioplásticos en análisis de FTIR



Reporte grafico de los bioplásticos en análisis de TGA



Anexo 26. Acondicionamiento de la uva

Lavado y desinfección



Peso de uvas para embolsar



Sellado y envasado



Muestras listas para refrigerar



Almacenamiento



Anexo 27. Caracterización de la uva

Pesar las muestras embolsadas



Extracción y filtrado de jugo de uva



Medición de pH



Disolución para medir acidez añadimos fenolftaleína



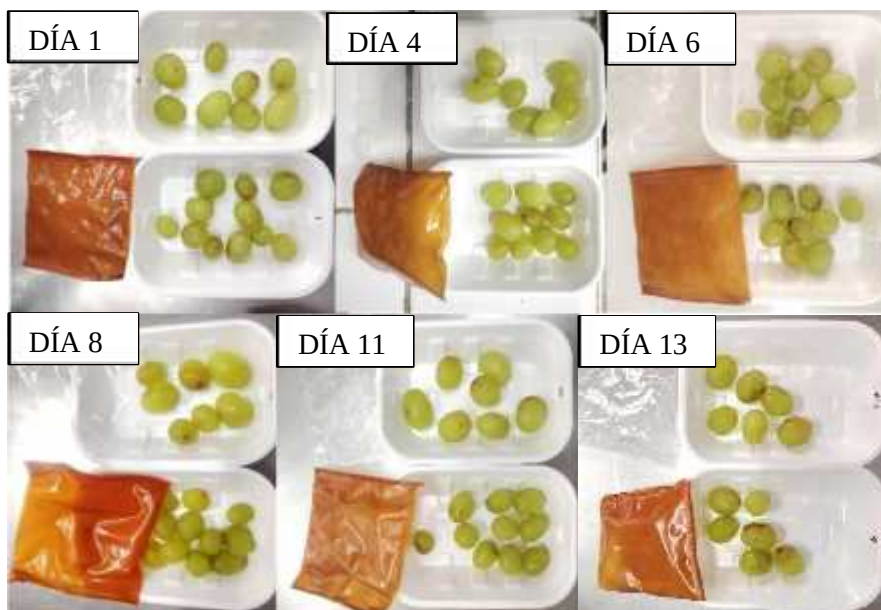
Verificar gasto de NaOH



Medición de grados brix



Aspecto visual de almacenamiento del 1 al 13°avo. día



Anexo 28. Resultados fisicoquímicos de la uva

Propiedades	Tratamientos	Días					
		1	4	6	8	11	13
Pérdida de peso	Control	40.382	40.291	40.885	40.102	40.508	30.454
	Control	40.237	39.935	40.376	39.423	39.695	29.693
	Optimo	40.713	40.508	40.387	40.852	40.922	30.342
	Optimo	39.980	39.511	39.118	39.198	38.919	28.638
Ph		3.49	3.57	3.55	3.52	3.6	3.6
	Control	3.48	3.55	3.57	3.51	3.59	3.59
		3.48	3.56	3.58	3.52	3.6	3.58
		3.47	3.43	3.4	3.41	3.38	3.36
	Optimo	3.46	3.46	3.38	3.42	3.37	3.32
		3.48	3.44	3.39	3.4	3.36	3.34
Acidez		0.77	0.84	0.79	0.80	0.81	0.83
	Control	0.79	0.82	0.77	0.79	0.83	0.85
		0.80	0.80	0.78	0.81	0.82	0.83
		0.78	0.89	0.90	0.89	0.93	0.96
	Optimo	0.79	0.89	0.91	0.90	0.94	0.96
		0.82	0.91	0.90	0.90	0.95	0.97
Brix		14.7	14.4	14.5	14.8	14.9	14.8
	Control	14.6	14.4	14.6	15	15	14.8
		14.6	14.7	14.6	15.3	15.3	15.3
		15	14.7	14.9	15	15.2	15.8
	Optimo	15	15	14.8	15.3	15.2	15.9
		15.1	14.7	15	15.2	15.3	15.7