

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE MECÁNICA

TEMA:

“Obtención y caracterización de bioplástico natural a partir de la hoja de tuna andina (Nopal) mediante (DOE - mezclas)”

Trabajo de titulación modalidad proyecto experimental presentado previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

AUTOR: Germán Rafael Flores Castro

TUTOR: Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.

Ambato-Ecuador

Junio-2026

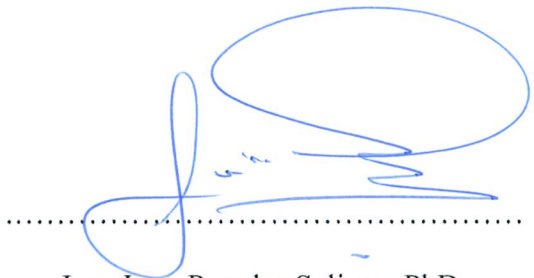
APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del trabajo experimental, previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, con el tema: **"OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE BIOPLÁSTICO NATURAL A PARTIR DE LA HOJA DE TUNA ANDINA (NOPAL) MEDIANTE (DOE - MEZCLAS)"**, elaborado por el estudiante Germán Rafael Flores Castro, portador de la cédula de ciudadanía número 1850598515, estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente trabajo experimental es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Está concluido en su totalidad.

Ambato, junio 2026



.....

Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.

C.C.1803683174

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Germán Rafael Flores Castro**, con C.C. 1850598515 declaro que todos los contenidos y actividades expuestos en el desarrollo del presente trabajo experimental con el tema: **"OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE BIOPLÁSTICO NATURAL A PARTIR DE LA HOJA DE TUNA ANDINA (NOPAL) MEDIANTE (DOE - MEZCLAS)"**, así como también los análisis estadísticos, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del trabajo experimental, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, junio 2026



.....

Germán Rafael Flores Castro

C.C.1850598515

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este trabajo experimental o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi trabajo experimental, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, junio 2026



.....

Germán Rafael Flores Castro

C.C.1850598515

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del trabajo experimental, realizado por el estudiante **Germán Rafael Flores Castro**, de la Carrera de Ingeniería Mecánica bajo el tema: **"OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE BIOPLÁSTICO NATURAL A PARTIR DE LA HOJA DE TUNA ANDINA (NOPAL) MEDIANTE (DOE - MEZCLAS)"**, Modalidad trabajo experimental.

Ambato, junio 2026

Para constancia firma:

.....	.....
Ing. Segundo Manuel Espin Lagos, Mg	Ing. Jorge Enrique López Velástegui, Mg
C.C.0501500771	C.C. 1802630416
MIEMBRO CALIFICADOR	**MIEMBRO CALIFICADOR**

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente haber atravesado esta etapa de mi vida, entendí que existir también es resistir, que cada uno tiene su propio tiempo en su historia. En medio de días inciertos, cansancio y dudas interminables, entendí que el verdadero sentido no siempre se encuentra al final de la meta, sino en la absurda y hermosa decisión de continuar sin tener certezas.

Gracias a mi madre, Mónica Castro, porque fue la fuerza silenciosa detrás de cada uno de mis esfuerzos. Su fe en mí fue más grande que mis propias dudas, y en mi mundo donde muchas veces todo parece derrumbarse, su amor me recordó que aún vale la pena seguir avanzando.

A mis tíos, Fernando Flores y Fanny Flores, quienes con la inmensidad de sus corazones me acogieron con tanto amor que nunca me sentí desolado en todo este camino. Sus deseos y apoyo fueron esa pequeña luz que aparece cuando la vida te pone en un callejón sin salida.

A mis grandes amigos de Latacunga y de Ambato, gracias por las risas, por las conversaciones sin rumbo, por los momentos llenos nostalgia, por la compañía en momentos clave de mi existencia, por las huellas que dejaron y haber coincidido con todos ustedes en este instante llamado vida, a todos ellos les dedico este verso.

Es muy bello reunirse en silencio,
pero es más bello reír juntos
bajo un cielo de seda;
tumbados entre la hierba
nos reunimos con amigos entre risas alegres
mostrando nuestras blancas dentaduras.
¿Estoy en lo cierto? Tumbémonos en silencio;
¿Me equivoco? Riamos juntos
y al empeorar,
empeorar entre risotadas,
iremos juntos a la tumba.
¿Haremos esto de nuevo, amigos?
¡Amén! ¡Y auf Wierdersehen!

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL TUTOR ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN iii
DERECHOS DE AUTOR iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO v
AGRADECIMIENTO vi
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS vii
ÍNDICE DE FIGURAS x
ÍNDICE DE TABLAS xii
RESUMEN EJECUTIVO xvi
ABSTRACT xvii
CAPÍTULO I 1
1. MARCO TEÓRICO 1
1.1. Antecedentes investigativos 1
1.2. Planteamiento del problema y Justificación 2
1.3. Fundamentación Teórica 2
1.3.1. Los Materiales Compuestos 2
1.3.2. Componentes de los Materiales compuestos 3
1.3.3. Propiedades Mecánicas de los Materiales compuestos 5
1.3.4. Propiedades Térmicas de los Materiales compuestos 7
1.3.5. Métodos de fabricación de los Materiales compuestos 7
1.3.6. Biomateriales 8
1.3.6.1. Clasificación de los Biomateriales 8
1.3.6.2. Desafíos a futuro de los biomateriales. 10
1.3.7. Biopolímeros Naturales 10
1.3.7.1. Clasificación de los Biopolímeros Naturales y Sintéticos 11
1.3.7.2. Tipos principales de Biopolímeros Naturales 13
1.3.7.3. Propiedades de los Biopolímeros Naturales 14
1.3.7.4. Aplicaciones de los Biopolímeros Naturales 15
1.3.8. Pruebas para materiales compuestos 17
1.3.8.1. Ensayos Mecánicos 17

1.3.8.2. Ensayos Térmicos 18
1.3.8.3. Ensayos Físicos 20
1.3.8.4. Ensayos No Destructivos 22
1.3.9. Pruebas para Biomateriales 23
1.3.9.1. Ensayos de Biocompatibilidad 23
1.3.9.2. Ensayos de Citotoxicidad 24
1.3.9.3. Ensayos de Degradación 24
1.3.9.4. Ensayos de tracción y biodegradabilidad 24
1.3.9.4.1. Ensayos de tracción 24
1.3.9.4.2. Ensayo de biodegradabilidad 26
1.4. Objetivos 28
1.4.1. Objetivo General 28
1.4.2. Objetivos Específicos 28
CAPÍTULO II 29
2. METODOLOGÍA 29
2.1. Diagrama de producción del Mucílago 29
2.2. Diagrama de producción del Bioplástico 29
2.3. Materiales 30
2.4. Equipos 32
2.5. Métodos 33
2.5.1. Investigación experimental 33
2.5.2. Investigación descriptiva 33
2.5.3. Investigación bibliográfica 34
2.6. Operacionalización de variables 34
2.6.1. Variable independiente 34
2.6.2. Variable dependiente 35
2.7. Hipótesis 36
2.8. Diseño de experimentación DOE 36
2.9. Proceso de obtención del Mucílago 39
2.10. Proceso de obtención del biopolímero 40
2.11. Preparación de probetas y ensayos de tracción 42
2.12. Ensayos de biodegradabilidad 44
CAPÍTULO III 45

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 45
3.1. Registro de resultados 45
3.1.1. Fichas de ensayos de tracción de cada caso del biopolímero 45
3.1.2. Fichas de ensayos de tracción de fundas plásticas 93
3.1.3. Biodegradabilidad 99
3.1.3.1. Biodegradabilidad bajo condiciones controladas 99
3.1.3.2. Pruebas de Biodegradabilidad del polímero en el medio ambiente 107
3.2. Discusión de resultados 116
3.2.1. Discusión de resultados de ensayos de tracción de biopolímeros 116
3.2.2. Comparación con los mejores resultados 119
3.2.3. Resultados de biodegradabilidad bajo condiciones controladas 122
3.2.4. Resultados y discusión de biodegradabilidad al ambiente 124
3.3. Análisis de optimización de datos 126
3.3.1. Análisis de datos (Matriz de datos) 126
3.4. Análisis del Esfuerzo Máximo a la Tracción 129
3.4.1. Revisión de supuestos paramétricos 129
3.4.2. Análisis de la varianza 130
3.4.3. Optimización individual 133
3.5. Análisis del Módulo de Elasticidad a la Tracción 134
3.5.1. Revisión de supuestos paramétricos 134
3.5.2. Análisis de la varianza 135
3.5.3. Optimización individual 137
3.6. Análisis de la Elongación 138
3.6.1. Revisión de supuestos paramétricos 138
3.6.2. Análisis de la varianza 140
3.6.3. Optimización individual 142
3.7. Análisis de la Tasa de degradación con parámetros controlados 143
3.7.1. Revisión de supuestos paramétricos 143
3.7.2. Análisis de la varianza 145
3.7.3. Optimización individual 147
3.8. Análisis de la Tasa de degradación en ambiente no controlado 148
3.8.1. Revisión de supuestos paramétricos 148
3.8.2. Análisis de la varianza 150

3.8.3. Optimización individual 152
3.9. Verificación de hipótesis 154
3.9.1. Optimización global 154
CAPÍTULO IV 157
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 157
4.1. Conclusiones 157
4.2. Recomendaciones 158
BIBLIOGRAFÍA 160
ANEXOS 164
Anexo 1: Informes de los ensayos de tracción 164
Anexo 2: Norma ASTM D638-14 169
Anexo 3: Norma ISO 14855-1:2019 170

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig 1. Fuerzas de compresión y tracción en la matriz. 3
Fig 2. Vista microscópica de la unión entre plata-cobre. 5
Fig 3. Elemento realizado con biomateriales metálicos. 9
Fig 4. Material realizado con biomateriales cerámicos 9
Fig 5. Material realizado con biomateriales a base de polímeros. 10
Fig 6. Clasificación y ejemplos de los biopolímeros. 12
Fig 7. Diferentes configuraciones para el ensayo de fatiga aplicado compresión 18
Fig 8. Flujo de calor en una muestra y referencia de la prueba DSC. 19
Fig 9. Variaciones de peso en una prueba TGA de variaciones de Grafito. 19
Fig 10. Recubrimiento de pinzas para generar tensión para prueba de DMA. 20
Fig 11. Procedimiento para el desgaste por fricción. 21
Fig 12. Sistema de Ultrasonido para Ensayos no Destructivos en Materiales Compuestos. 22
Fig 13. Curva de una prueba de Termografía Infrarroja. 23
Fig 14. Ubicaciones exactas de los medidores para pruebas de tracción. 26
Fig 15. Curva de degradación de un material sometido a producción de CO2. 28
Fig 16. Proceso lineal de producción de mucílago. 29
Fig 17. Flujo de procesos de producción del bioplástico. 30

Fig 18. Gráfica del comportamiento de las probetas bajo condiciones controladas hasta el día 48. Peso (g) vs Días. 104
Fig 19. Gráfica del comportamiento de las probetas bajo condiciones controladas hasta el día 48. Tasa de degradación (%) vs Días. 106
Fig 20. Gráfica del comportamiento de las probetas al medio ambiente hasta el día 48. Peso (g) vs Días. 113
Fig 21 . Gráfica del comportamiento de las probetas al medio ambiente hasta el día 48. Tasa de degradación (%) vs Días. 115
Fig 22. Gráfica de barras de la comparación de resultados de esfuerzo máximo a la tracción del bioplástico y plásticos comerciales. 117
Fig 23. Gráfica de barras de la comparación de resultados del módulo de elasticidad del bioplástico y plásticos comerciales. 118
Fig 24. Gráfica de barras de la comparación de resultados de porcentaje de elongación del bioplástico y plásticos comerciales. 118
Fig 25. Gráfica radial de esfuerzo máximo a la tracción de los 3 mejores resultados del bioplástico vs plástico comercial. 120
Fig 26. Gráfica radial del módulo de elasticidad de los 3 mejores resultados del bioplástico vs plástico comercial. 120
Fig 27. Gráfica radial del porcentaje de elongación de los 3 mejores resultados del bioplástico vs plástico comercial. 121
Fig 28. Gráfica de barras del peso final en (g) de biodegradabilidad bajo condiciones controladas hasta el día 48. 123
Fig 29. Gráfica de barras de la tasa de degradación bajo condiciones controladas hasta el día 48. 123
Fig 30. Gráfica de barras del peso final en (g) de biodegradabilidad al medio ambiente hasta el día 48. 125
Fig 31. Gráfica de barras de la tasa de degradación al medio ambiente hasta el día 48. 125
Fig 32. Gráficas de residuos para el Esfuerzo a Tracción. 129
Fig 33. Gráfica de trazas para el Esfuerzo a la Tracción. 132
Fig 34. Gráfica de optimización del Esfuerzo Máximo a la Tracción. 133
Fig 35. Gráficas de residuos para el Módulo de Elasticidad a la Tracción. 134
Fig 36. Gráfica de trazas para el Módulo de Elasticidad a la Tracción. 137
Fig 37. Gráfica de optimización del Módulo de Elasticidad a la Tracción. 138

Fig 38. Gráficas de residuos para la Elongación. 139
Fig 39. Gráfica de trazas para la Elongación. 141
Fig 40. Gráfica de optimización de la Elongación. 143
Fig 41. Gráficas de residuos para la Tasa de degradación con parámetros controlados. 144
Fig 42. Gráfica de trazas para la Tasa de degradación con parámetros controlados. 146
Fig 43. Gráfica de optimización de la Tasa de degradación con parámetros controlados. 148
Fig 44. Gráficas de residuos para la Tasa de degradación en ambiente no controlado. .. 149
Fig 45. Gráfica de trazas para la Tasa de degradación en ambiente no controlado..... 151
Fig 46. Gráfica de optimización de la Tasa de degradación en ambiente no controlado. 153
Fig 47. Gráfica optimización global. 155

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I. EJEMPLOS DE POLISACÁRIDOS. 13
TABLA II. EJEMPLOS DE POLÍMEROS PROTEICOS. 14
TABLA III. EJEMPLOS DE POLÍMEROS POLINUCLEÓTIDOS. 14
TABLA IV. PROPIEDADES DE LOS BIOPOLÍMEROS MÁS USADOS. 15
TABLA V. APLICACIONES DE LOS BIOPOLÍMEROS NATURALES MÁS USADOS. 16
TABLA VI. MATERIALES UTILIZADOS EN LA PRODUCCIÓN DEL BIOPLÁSTICO 30
TABLA VII. EQUIPOS UTILIZADOS EN LA PRODUCCIÓN DEL BIOPLÁSTICO. 32
TABLA VIII. VARIABLE INDEPENDIENTE EN LA PRODUCCIÓN DEL BIOPLÁSTICO. 34
TABLA IX. VARIABLE DEPENDIENTE DE LA PRODUCCIÓN DEL BIOPLÁSTICO. 35
TABLA X. PORCENTAJE DE INGREDIENTES CONSTANTES. 36
TABLA XI. TABLA DE CODIFICACIÓN DEL SOFTWARE. 37
TABLA XII. MEDIDAS DE LOS INGREDIENTES DE LAS 16 COMBINACIONES. 38
TABLA XIII. PROCESO DE OBTENCIÓN DEL MUCÍLAGO. 39
TABLA XIV. PROCESO DE OBTENCIÓN DEL BIOPLÁSTICO. 40

TABLA XV. PROCESO DE PREPARACIÓN DE PROBETAS Y ENSAYOS DE TRACCIÓN. 43
TABLA XVI. PROCESO DE ENSAYOS DE BIODEGRADABILIDAD. 44
TABLA XVII. FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 1. 45
TABLA XVIII. FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 2. 48
TABLA XIX. FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 3. 51
TABLA XX. FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 4. 54
TABLA XXI. FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 5. 57
TABLA XXII. FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 6. 60
TABLA XXIII. FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 7 63
TABLA XXIV. FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 8. 66
TABLA XXV. FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 9. 69
TABLA XXVI. FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 10. 72
TABLA XXVII. FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 11. 75
TABLA XXVIII. FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 12. 78
TABLA XXIX. FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 13. 81
TABLA XXX. FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 14. 84
TABLA XXXI. FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 15. 87

TABLA XXXII. FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 16. 90
TABLA XXXIII. FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DEL PLÁSTICO COMERCIAL 1P..... 93
TABLA XXXIV. FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DEL PLÁSTICO COMERCIAL 2P..... 96
TABLA XXXV. FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE BIODEGRADABILIDAD EN CONDICIONES CONTROLADAS DE LAS 16 COMBINACIONES..... 100
TABLA XXXVI. DATOS DE PÉRDIDA DE MASA EN (G) PROMEDIO Y ECUACIÓN EXPONENCIAL DEL COMPORTAMIENTO DE LAS 16 COMBINACIONES DURANTE 48 DÍAS DEL ENSAYO DE BIODEGRADABILIDAD EN CONDICIONES CONTROLADAS..... 103
TABLA XXXVII. DATOS PROMEDIO DEL PORCENTAJE DE DEGRADACIÓN Y ECUACIÓN POLINÓMICA GRADO 2 DEL COMPORTAMIENTO DE LAS 16 COMBINACIONES DURANTE 48 DÍAS DEL ENSAYO DE BIODEGRADABILIDAD EN CONDICIONES CONTROLADAS..... 105
TABLA XXXVIII. FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE BIODEGRADABILIDAD AL MEDIO AMBIENTE DE LAS 16 COMBINACIONES. 108
TABLA XXXIX. DATOS DE PÉRDIDA DE MASA EN (G) PROMEDIO Y ECUACIÓN EXPONENCIAL DEL COMPORTAMIENTO DE LAS 16 COMBINACIONES DURANTE 48 DÍAS DEL ENSAYO DE BIODEGRADABILIDAD AL MEDIO AMBIENTE. 112
TABLA XL. DATOS PROMEDIO DEL PORCENTAJE DE DEGRADACIÓN Y ECUACIÓN POLINÓMICA GRADO 2 DEL COMPORTAMIENTO DE LAS 16 COMBINACIONES DURANTE 48 DÍAS DEL ENSAYO DE BIODEGRADABILIDAD AL MEDIO AMBIENTE. 114
TABLA XLI. RESULTADOS PROMEDIO DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN. 116
TABLA XLII. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE BIODEGRADABILIDAD EN CONDICIONES CONTROLADAS. 122
TABLA XLIII. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE BIODEGRADABILIDAD EN CONDICIONES DEL MEDIO AMBIENTE..... 124
TABLA XLIV. MATRIZ DE DISEÑO PARA EL DISEÑO POR MEZCLAS. 126

TABLA XLV. CODIFICACIÓN DE LOS NIVELES DE LAS VARIABLES PARA EL DISEÑO POR MEZCLAS. 127
TABLA XLVI. COMBINACIONES Y VALORES DE LAS PROPIEDADES. 127
TABLA XLVII. ANÁLISIS DE LA VARIANZA DEL ESFUERZO A LA TRACCIÓN. 130
TABLA XLVIII. GRÁFICAS DE CONTORNO Y DE SUPERFICIE DEL ESFUERZO A LA TRACCIÓN. 132
TABLA XLIX. OPTIMIZACIÓN DEL ESFUERZO A LA TRACCIÓN. 133
TABLA L. ANÁLISIS DE LA VARIANZA DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD A LA TRACCIÓN. 135
TABLA LI. GRÁFICAS DE CONTORNO Y DE SUPERFICIE DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD A LA TRACCIÓN. 137
TABLA LII. OPTIMIZACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD A LA TRACCIÓN. 138
TABLA LIII. ANÁLISIS DE LA VARIANZA DE LA ELONGACIÓN. 140
TABLA LIV. GRÁFICAS DE CONTORNO Y DE SUPERFICIE LA ELONGACIÓN. 142
TABLA LV. OPTIMIZACIÓN DE LA ELONGACIÓN. 142
TABLA LVI. ANÁLISIS DE LA VARIANZA DE LA TASA DE DEGRADACIÓN CON PARÁMETROS CONTROLADOS. 145
TABLA LVII. GRÁFICAS DE CONTORNO Y DE SUPERFICIE LA TASA DE DEGRADACIÓN CON PARÁMETROS CONTROLADOS. 147
TABLA LVIII. OPTIMIZACIÓN DE LA TASA DE DEGRADACIÓN CON PARÁMETROS CONTROLADOS. 147
TABLA LIX. ANÁLISIS DE LA VARIANZA DE LA TASA DE DEGRADACIÓN EN AMBIENTE NO CONTROLADO. 150
TABLA LX. GRÁFICAS DE CONTORNO Y DE SUPERFICIE LA TASA DE DEGRADACIÓN EN AMBIENTE NO CONTROLADO. 152
TABLA LXI. OPTIMIZACIÓN DE LA TASA DE DEGRADACIÓN EN AMBIENTE NO CONTROLADO. 152
TABLA LXII. OPTIMIZACIÓN GLOBAL DE PROPIEDADES. 154

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación tuvo como finalidad obtener y caracterizar un bioplástico natural elaborado a partir de la hoja de tuna andina (Nopal) mediante diseño experimental DOE-Mezclas, como alternativa biodegradable frente a los plásticos convencionales derivados del petróleo. Para el desarrollo del estudio se empleó mucílago de tuna andina, almidón, gelatina, glicerina y vinagre, evaluando la influencia de sus proporciones sobre las propiedades mecánicas y biodegradables del material obtenido.

Se estableció como método óptimo para la extracción del mucílago el lavado, picado y reposo en agua durante 48 horas. Posteriormente, mediante el software estadístico y el diseño DOE-Mezclas, se desarrollaron 16 combinaciones del bioplástico, permitiendo identificar las formulaciones con mejores características físicas y mecánicas.

Las probetas elaboradas fueron sometidas a ensayos de tracción bajo la norma ASTM D638-14 y a ensayos de biodegradabilidad en condiciones controladas y ambientales durante 48 días. Los resultados evidenciaron que determinadas combinaciones alcanzaron propiedades mecánicas competitivas frente a plásticos comerciales, destacándose la combinación 4 por su mayor esfuerzo máximo a la tracción y módulo de elasticidad. Asimismo, algunas formulaciones alcanzaron biodegradabilidades superiores al 90%, demostrando una degradación considerablemente más rápida que los plásticos convencionales.

Los resultados obtenidos permitieron concluir que el bioplástico desarrollado posee potencial como alternativa sostenible y biodegradable para aplicaciones de baja exigencia mecánica.

Palabras clave: BIOPLÁSTICO, TUNA ANDINA, MUCÍLAGO, BIODEGRADABILIDAD, ENSAYOS DE TRACCIÓN.

ABSTRACT

The purpose of this research was to obtain and characterize a natural bioplastic made from Andean cactus pear (Nopal) leaves through a DOE-Mixture experimental design, as a biodegradable alternative to conventional petroleum-based plastics. For the development of the study, cactus mucilage, starch, gelatin, glycerin, and vinegar were used, evaluating the influence of their proportions on the mechanical and biodegradable properties of the obtained material.

The optimal method for mucilage extraction was established through washing, chopping, and soaking in water for 48 hours. Subsequently, by using statistical software and the DOE-Mixture design, 16 bioplastic formulations were developed, allowing the identification of the combinations with the best physical and mechanical characteristics.

The prepared specimens were subjected to tensile tests under ASTM D638-14 standards and biodegradability tests under controlled and environmental conditions for 48 days. The results showed that certain formulations achieved competitive mechanical properties compared to commercial plastics, highlighting combination 4 for its higher tensile strength and modulus of elasticity. Likewise, some formulations reached biodegradability rates above 90%, demonstrating significantly faster degradation than conventional plastics.

The obtained results allowed concluding that the developed bioplastic has potential as a sustainable and biodegradable alternative for low mechanical demand applications.

Keywords: BIOPLASTIC, ANDEAN CACTUS PEAR, MUCILAGE, BIODEGRADABILITY, TENSILE TESTING.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes investigativos

La búsqueda de materiales biodegradables y sostenibles ha sido promovida por el impacto medioambiental actual que tienen los plásticos derivados del petróleo. Los biopolímeros se presentan como una opción para disminuir la dependencia de los polímeros sintéticos. Entre ellos, el mucílago del nopal (tuna andina), que es rico en polisacáridos heterogéneos, sobresale. Este material posibilita la creación de matrices con una buena estabilidad térmica, alta retención de humedad y un gran potencial de biodegradación. Esto hace factible fabricar bioplásticos que tengan estabilidad estructural y propiedades mecánicas ventajosas, los cuales pueden ser usados, por ejemplo, para hilos quirúrgicos biodegradables [1].

Igualmente, se ha evidenciado que la introducción de mucílago de nopal, un biopolímero vegetal, aumenta de manera notable la estabilidad térmica y la capacidad barrera en películas hechas con pectina cítrica. No obstante, si se utiliza en cantidades excesivas, puede debilitar la estructura del material. [2]. Adicionalmente, es posible mejorar estas películas de mucílago al combinarlas con otros biopolímeros o almidones por medio de mezclas controladas que favorecen la creación de una estructura micro y termo-mecánica más uniforme y robusta [3].

Varios estudios han estado centrados en optimizar la utilización del mucílago de nopal para mejorar las características físicas, mecánicas y de permeabilidad del material. Para ello, se han implementado metodologías estadísticas de vanguardia como el Diseño de Experimentos (DOE, por sus siglas en inglés). Se ha establecido el empleo eficiente de esta metodología como un instrumento efectivo para optimizar y evaluar biopolímeros, lo que posibilita determinar las combinaciones más favorables de variables que inciden en su comportamiento [4]. No obstante, aún existen brechas en la aplicación de este enfoque, ya que la mayoría de los estudios continúan empleando métodos tradicionales, limitando el potencial de análisis y mejora integral del material.

En este sentido, al aplicar un enfoque experimental basado en el diseño de mezclas (DOE), se puede establecer parámetros óptimos y evidenciar su viabilidad como alternativa sostenible frente a los plásticos convencionales.

1.2. Planteamiento del problema y Justificación

El uso continuo de plásticos convencionales representa un grave problema ambiental debido a su baja biodegradabilidad y su persistencia en los ecosistemas. Esta acumulación progresiva en el ambiente contribuye a la contaminación del suelo y del agua, afectando negativamente a la biodiversidad y a la salud humana [5]. Esta situación ha impulsado la búsqueda de alternativas más sostenibles, como los bioplásticos, aunque muchas de estas aún presentan altos costos de producción y propiedades mecánicas limitadas, lo que restringe su aplicación práctica.

A pesar de la disponibilidad de recursos naturales en diversas regiones del país, como la hoja de tuna andina (Nopal), estos materiales no han sido suficientemente estudiados como insumos para la elaboración de bioplásticos [6]. Existe una carencia de información científica sobre sus propiedades fisicoquímicas y su comportamiento mecánico, especialmente cuando se combinan en distintas proporciones. Esta falta de conocimiento impide valorar su potencial como materiales biodegradables.

Además, la ausencia de investigaciones orientadas a optimizar su formulación mediante herramientas estadísticas, como el Diseño de Experimentos (DOE), limita el desarrollo de soluciones basadas en estos insumos. Esta falta de estudios sistemáticos impide establecer relaciones claras entre las proporciones de los componentes y las propiedades resultantes del bioplástico [6]. En consecuencia, es necesario emprender una investigación que permita caracterizar adecuadamente la combinación de este material y evaluar su desempeño, generando evidencia que contribuya a la reducción del uso de plásticos convencionales y al impulso de alternativas sostenibles adaptadas a contextos locales.

1.3. Fundamentación Teórica

1.3.1. Los Materiales Compuestos

Se entiende por materiales compuestos a las combinaciones que se establecen entre al menos dos materiales en un sentido macroscópico. Se puede identificar que estas combinaciones tienen una interfase que los separa, por esta razón, los materiales

compuestos se consideran heterogéneos; esto significa que no todas las propiedades son iguales en toda la extensión del volumen de la mezcla. Asimismo, estos materiales, en su mayoría, se producen mediante procesos de fabricación que dependen del trabajo manual, a diferencia de los compuestos naturales como la madera y el hueso [7].

1.3.2. Componentes de los Materiales compuestos

Los materiales compuestos están formados por dos componentes, la matriz y el refuerzo.

a) Matriz

La matriz es el componente del material compuesto que constituye la fase continua y permite mantener embebido el material de refuerzo. Existen diversos materiales que pueden desempeñar esta función, entre ellos los metales, los polímeros y las resinas orgánicas. Los materiales cerámicos son menos utilizados como matriz debido a su elevada fragilidad y limitada capacidad para soportar deformaciones, lo que restringe su aplicación en determinadas estructuras compuestas [7].



Fig 1. Fuerzas de compresión y tracción en la matriz [7].

Las funciones fundamentales de la matriz son asegurar el componente y proporcionar sus propiedades químicas y físicas; además, transmite cargas al esfuerzo. Asimismo, establece la resistencia al impacto del material y la detención de la propagación de fisuras bajo distintas cargas de compresión y tensión. Su habilidad para soportar estas cargas no estará condicionada a las etapas de acabado que se efectúen después [7].

Los polímeros, en especial los termoestables y los termoplásticos, son algunos de los materiales que pueden utilizarse como matriz con facilidad, ya que están ampliamente disponibles para su compra junto con la mano de obra. Los materiales que se pueden usar para matrices metálicas incluyen, en particular, cobre, níquel, magnesio y aluminio [7].

b) Material de refuerzo

El material de refuerzo es aquel que se mezcla con la matriz con el objetivo de crear un material compuesto y que incluye una fase discontinua. El refuerzo se emplea para

aumentar la rigidez y resistencia de las propiedades mecánicas, a pesar de que también optimiza el comportamiento frente a altas temperaturas o abrasiones [7].

Por lo general, el refuerzo es más efectivo cuando las partículas son pequeñas y están distribuidas de manera uniforme en la matriz o cuando se aumenta la relación entre el diámetro y la longitud de la fibra. Esto sugiere que los compuestos reforzados con fibras son los más producidos en la industria, pues ofrecen rigidez, resistencia y un peso más ligero [7].

A pesar de que el compuesto requiere resistencia a temperaturas elevadas, la fibra debe tener un alto punto de fusión. Según la resistencia específica que se requiera, el módulo específico de la fibra debe tenerse en cuenta. En términos de ingeniería, estos valores se presentan en las siguientes fórmulas [7].

- Resistencia especifica

$$Re: \frac{\sigma_y}{\rho} \tag{1}$$

- Módulo específico

$$E_{esp}: \frac{E}{\rho} \tag{2}$$

Donde:

$\sigma_y =$ esfuerzo de cedencia

ρ= densidad

$E =$Módulo de elasticidad

Las fibras que más se usan como material reforzante son [7]:

- Fibra de vidrio
- Fibra de carbono
- Fibra de aramida

A pesar de que en la actualidad el empleo de fibras naturales está siendo investigado con gran intensidad, por su amplio proceso de biodegradación y su escaso impacto ambiental, las fibras vegetales son las que generan un impacto ambiental aún menor. En este escenario, se puede hacer referencia a la utilización de fibra de coco o lino en la industria automovilística. El objetivo de utilizar estas clases de fibras naturales es que su uso y producción aumenten en el futuro [7].

c) Interfase

La interfase es la etapa más importante que ocurre entre la unión de los dos componentes de un material compuesto, después de haberlos nombrado. En esta fase se determinarán las propiedades del material compuesto. Si la interfase es muy débil, será la matriz la que asuma el soporte de los distintos tipos de carga. Como resultado, el material se romperá debido a la aparición de huecos entre el refuerzo y la matriz, ya que esta última no es lo suficientemente fuerte como para sostener esas cargas. Dado que la unión entre estos dos compuestos no es sencilla, se emplean aditivos que generalmente recubren la unión formada para mejorar su compatibilidad y adhesión, en sus propiedades mecánicas y térmicas [7].

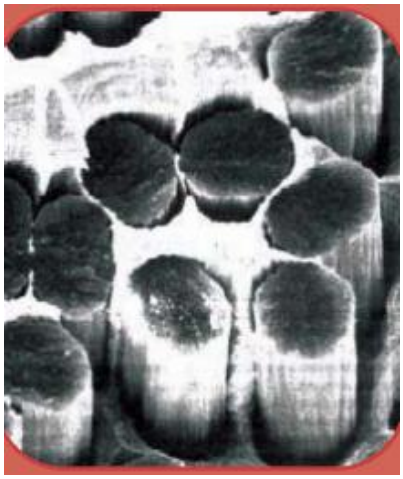


Fig 2. Vista microscópica de la unión entre plata-cobre [7].

1.3.3. Propiedades Mecánicas de los Materiales compuestos

Los materiales compuestos disponen de varias propiedades mecánicas, las cuales son las siguientes [8]:

a) Límite de elasticidad

Los refuerzos que tienen partículas pequeñas (por ejemplo, de 3 micrómetros) proporcionan valores elásticos muy elevados. Estos tienen un límite elástico de entre 60 y 70 mega pascales, en comparación con los refuerzos de 25 micrómetros. Asimismo, si estas combinaciones resultan ser muy apropiadas, el límite elástico puede aumentar ligeramente. Asimismo, las tensiones térmicas residuales, que se producen debido a una contracción con un carácter distinto entre el refuerzo y la matriz, son los principales factores que incidirán en la mejora del límite elástico.

Además, de los métodos de refuerzo que están vinculados a la matriz y que se relacionan con las modificaciones en el nivel microestructural, que van acompañadas por una tendencia hacia un grano más fino y un aumento en las dislocaciones del material. Todo esto se basa en la fabricación y el tamaño volumétrico de las partículas del refuerzo [8].

b) Módulo de elasticidad

Los refuerzos que producen un incremento en el módulo de elasticidad de los materiales compuestos son los que se conocen como cerámicos o fibras cortas, caracterizados por su discontinuidad. Además, si estas partículas están en una dirección específica, el módulo de elasticidad en esa dirección aumentará. No obstante, este incremento no es proporcional a la cantidad de material de refuerzo que se incorpora [8].

c) Endurecimiento del material

El material compuesto, después de atravesar el límite elástico, generalmente experimenta un periodo de endurecimiento. Este proceso se realiza más rápidamente si el refuerzo tiene partículas largas y delgadas, ya que permite una mejor transferencia de la carga entre este y la matriz, lo que resulta en una mayor resistencia y un endurecimiento más veloz [8].

d) Resistencia a la tracción

La resistencia a la tracción de un material compuesto depende de múltiples factores; los que contienen refuerzos con fibras delgadas y largas suelen tener mayor resistencia a la tracción. La resistencia también puede incrementarse disminuyendo el tamaño de las partículas del material compuesto, pasando de 23 micrómetros a 3 micrómetros. Sin embargo, la ductilidad del material compuesto tiende a decrecer si se eleva la resistencia. Cuanto más pequeñas sean las partículas de refuerzo, más dúctil será [8].

e) Fractura

En los materiales compuestos, cuando se emplean aleaciones resistentes y refuerzos que son grandes o que tienen una fuerte adherencia, el material pierde su ductilidad, lo cual significa que se vuelve más quebradizo y tiene tendencia a romperse. Por otro lado, si las matrices son blandas o la unión entre el refuerzo y la matriz es débil, presentarán más deformación y, como consecuencia, su ductilidad aumentará. Si se incorporan fibras largas y delgadas, la tenacidad aumenta; sin embargo, si se añaden demasiados refuerzos a esta mezcla, el material se vuelve quebradizo [8].

1.3.4. Propiedades Térmicas de los Materiales compuestos

Los materiales compuestos disponen de dos propiedades térmicas, las cuales son las siguientes [8]:

a) Conductividad térmica

Si el refuerzo es cerámico, la conductividad térmica se reduce debido a la baja conducción de calor en comparación con los metales. La magnitud de esta reducción dependerá del volumen fraccionado que se incorpore al refuerzo y de cómo se reparta en el interior de la matriz metálica [8].

b) Coeficiente de expansión térmica

El grado de expansión o contracción de un material compuesto en relación a la temperatura depende de cuánto refuerzo tiene, la morfología y distribución de las partículas (si son delgadas o pequeñas) y el estado interno que presenta la matriz en comparación con los tratamientos térmicos aplicados a la aleación base [8].

1.3.5. Métodos de fabricación de los Materiales compuestos

Los métodos de fabricación dependen de la matriz que se utilice, pudiendo ser plástica o metálica [7][8].

a) Compuestos de matriz plástica

Cuando se utilizan las resinas para obtener un material compuesto que sea termoplástico y el proceso de la matriz sea individual para poder llegar a una pieza final los procesos que se utilizan son [7]:

- Inyección
- Extrusión
- Modelo por compresión

Y en cuanto a bases termorrigidas se refiere, se tienen los siguientes procesos:

- **Moldeo por colección manual:** El procedimiento más económico, no obstante, presenta una producción lenta y un número elevado de trabajadores [7].
- **Moldeo por proyección simultanea:** Es un método que ha evolucionado durante muchos años y es de bajo costo. No obstante, su aceptación es

únicamente de fibra corta, lo que resultará en piezas con propiedades mecánicas reducidas [7].

- **Moldeo por infusión:** Aunque se considera un proceso seguro para el trabajador, requiere costos adicionales y que los trabajadores tengan una alta capacidad para llevar a cabo dicho moldeo [7].
- **RTM (Moldeo por transferencia de resina):** Se emplea para conseguir desde componentes pequeños hasta grandes, tanto para la mayor parte de las clases de transporte terrestre como para transporte aéreo [7].
- **Enrollamiento filamentario:** Es uno de los procesos que se caracteriza por su alta eficiencia y viabilidad económica en la manufactura de componentes de matriz polimérica. Asimismo, las propiedades mecánicas que se pueden alcanzar mediante este proceso presentan valores elevados en comparación con otros métodos de moldeo convencional [7].

b) Compuestos de matriz metálica

La metalurgia de polvos es el procedimiento para obtener todos los materiales compuestos que tienen una matriz metálica. Este procedimiento comienza con polvos finos que se compactan para darles una forma específica; después, se calientan en una atmósfera controlada para conseguir la pieza deseada. Este procedimiento ha sido llevado a cabo durante varios años, lo que le ha permitido desarrollarse y lograr una alta precisión en piezas pequeñas o inusuales [7].

1.3.6. Biomateriales

La definición de biomaterial puede determinarse en función del ámbito en el que se utilice. No obstante, la noción en términos generales establece que los biomateriales son todos aquellos materiales obtenidos de manera artificial o natural que interactúan con el sistema biológico [9][10].

1.3.6.1. Clasificación de los Biomateriales

La clasificación de los biomateriales es de gran importancia por la diversidad que presentan; pueden clasificarse en función de su composición química, aunque hoy en día también se dividen según su funcionalidad. No obstante, la calificación general se fundamentaría en el compuesto químico; por ende, existen los siguientes tipos de biomateriales [9][10]:

a) Metales

Los metales, como el acero inoxidable, las aleaciones de cobalto y cromo y las de titanio, se consideran biomateriales ideales por sus notables propiedades: su ductilidad, resistencia y características anticorrosivas hacen que sean aptos para aplicaciones biológicas. Los metales líquidos son igualmente buenos en este campo, pues poseen fluidez, flexibilidad y conductividad térmica [9][10].

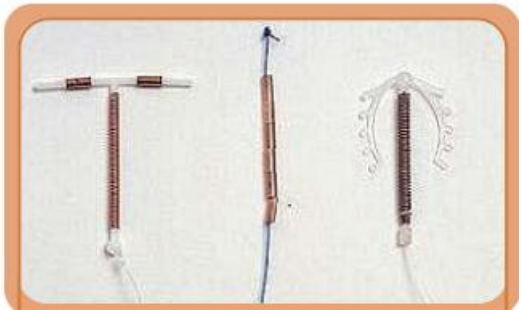


Fig 3. Elemento realizado con biomateriales metálicos [9].

b) Cerámicos

Los biomateriales cerámicos son considerados altamente resistentes a temperaturas elevadas, ya que su dureza se incrementa cuando están expuestos a estas temperaturas. También poseen una ligera reactividad química, por lo que se clasifican como materiales biocompatibles. Su uso se basa en la ortopedia, la odontología y en los reemplazos de articulaciones, y no tienen una buena conducción eléctrica, un claro ejemplo de material cerámico es la alúmina [9][10].



Fig 4. Material realizado con biomateriales cerámicos [9].

c) Polímeros

Los polímeros pueden ser de tres tipos: naturales, sintéticos y artificiales. Se dividen en dos categorías: los termoestables y los termoplásticos. Los polímeros que se emplean como biomateriales han experimentado un aumento en la investigación, con una atención particular a los homopolímeros. El polietileno es el polímero más utilizado en la industria biomédica. Se reflejan sus trabajos en tubos de catéter, hilos de sutura y aplicación universal en operaciones de cirugía plástica. Se prevé que el empleo de biomateriales basados en polímeros aumente por su degradación controlada [9][10].

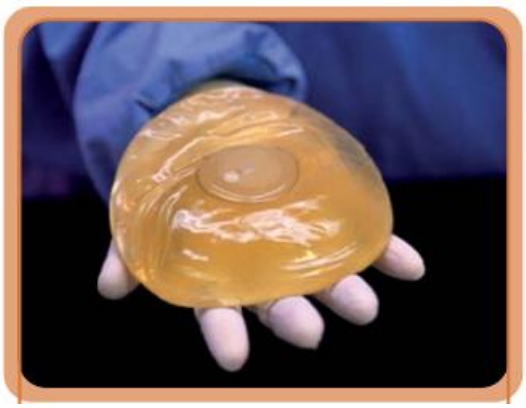


Fig 5. Material realizado con biomateriales a base de polímeros [9].

1.3.6.2. Desafíos a futuro de los biomateriales.

La capacidad de replicar y superar, a largo plazo, las propiedades que la naturaleza ha perfeccionado, como la flexibilidad, la resistencia, la degradación controlada, la autorreparación y la adhesión, es uno de los desafíos más significativos en el campo de los biomateriales. Aunque la ciencia ha avanzado en la creación de biomateriales sintéticos inspirados en sistemas biológicos, aún queda el reto de alcanzar su complejidad funcional. Para lograrlo, se requiere un mayor entendimiento de los principios que gobiernan los materiales naturales [9][11].

1.3.7. Biopolímeros Naturales

Los biopolímeros naturales son aquellos que se generan a partir de seres vivos y que, en particular, son biodegradables. Son los polímeros más antiguos, pues han estado presentes en la Tierra durante millones de años. Algunos de ellos, como los polilactidos, tienden a descomponerse dentro del cuerpo humano sin dejar huellas; por lo tanto, tienen uso médico.

De igual manera, se utilizan biopolímeros basados en almidón para producir plásticos mediante varios métodos, como la extrusión [12] .

1.3.7.1. Clasificación de los Biopolímeros Naturales y Sintéticos

Los biopolímeros naturales tienen 4 clasificaciones o categorías, las cuales son [12]:

a) Polímeros obtenidos por biomasa

Un polímero de biomasa es un tipo de polímero que se origina total o parcialmente a partir de productos como residuos forestales, algas, plantas y otros. En otras palabras, un polímero de biomasa está formado por fuentes biológicas renovables. Un ejemplo de cómo se obtienen estos polímeros es a partir de productos del sector agrícola, como la celulosa o el almidón [12].

b) Polímeros obtenidos mediante producción microbiana

Se entiende por polímero producido a partir de una producción microbiana a todos los polímeros que se crean de manera natural, como puede ser el caso del proceso de fermentación microbiana. Los polihidroxialcanoatos (PHAs), que son poliésteres similares al polipropileno, están incluidos aquí. Estos polímeros producidos por microorganismos son categorizados en tres grupos: los que provienen de algas, los que provienen de hongos y los que provienen de bacterias [12] [13].

- Los metabolitos generan poliéster, polisacáridos, poliamidas y polifosfatos, que constituyen un ejemplo claro en las bacterias [13].
- En los hongos se generan diversas sustancias que se emplean en beneficio de aplicaciones medioambientales de un amplio espectro. Entre estos componentes favorables se incluyen la inmovilización de enzimas, el mejoramiento del suelo, los biosurfactantes y una biosorción de metales pesados sobresaliente [13].
- En lo que respecta a las algas, son polímeros de producción microbiana que se pueden cultivar en aguas, incluso si estas no son purificadas. De ellos se derivan los carragenanos, el agar, el alginato de polisacáridos y el poliéster, por lo que son de una naturaleza ambiental muy favorable [13].

c) Polímeros obtenidos mediante un sintetizado convencional y química

Estos polímeros se producen a través de reacciones de polimerización que emplean monómeros obtenidos recursos renovables mediante biotecnología. Estos polímeros se

producen a través de procesos químicos y no biológicos, pero pueden ser biobasados, como el ácido poliláctico. Este último se crea mediante la síntesis química del ácido láctico. Además, estos procesos industriales posibilitan la modificación de la composición molecular y química. Actualmente se están desarrollando copolímeros con perspectivas ecológicas debido a su fabricación en industrias [12] [14].

d) Polímeros obtenidos mediante solamente por sintetización química

En esta área se incluyen los polímeros que se producen por medio de la síntesis química a partir del petróleo o crudo. Estas etapas industriales conducen a la producción de productos como las policaprolactonas. Este poliéster es biodegradable y alifático, y se obtiene de la caprolactona, que se produce a partir del petróleo. Se emplea en medicina para el rejuvenecimiento facial [12] [14].

En la Fig. 6, se observa la clasificación de los polímeros mencionados y sus ejemplos [12].

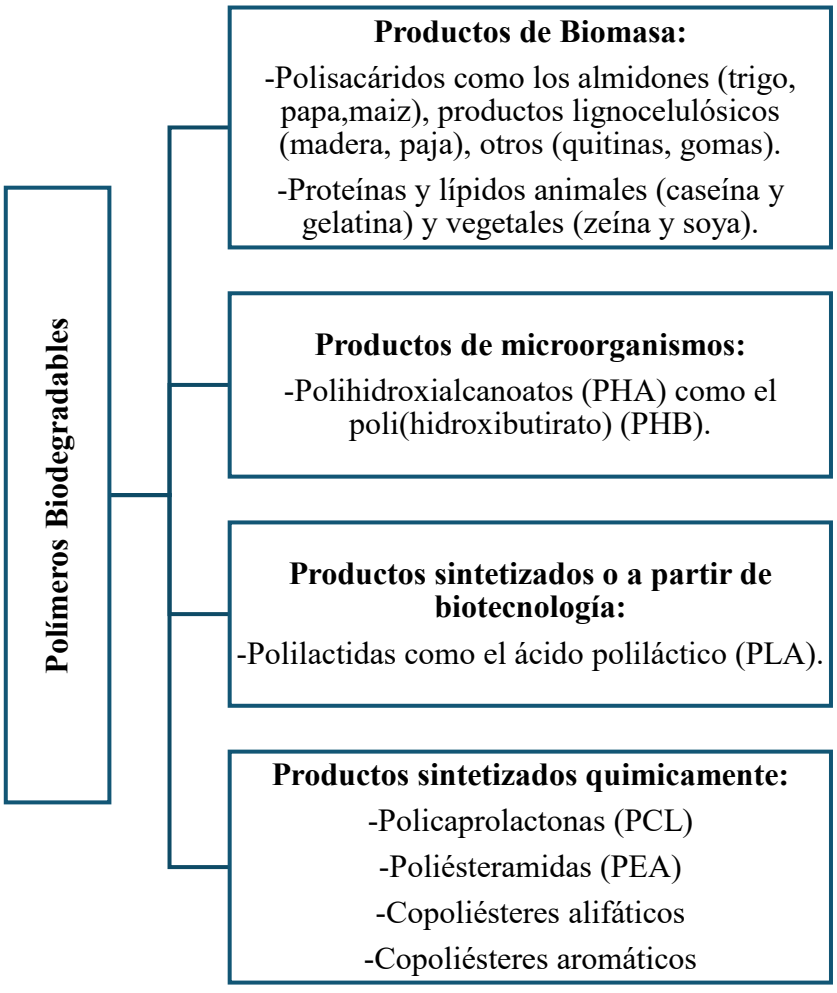


Fig 6. Clasificación y ejemplos de los biopolímeros [12].

1.3.7.2. Tipos principales de Biopolímeros Naturales

Los biopolímeros naturales son aquellos que se forman en los organismos vivos como menciona [12]. Los tipos principales de biopolímeros naturales son:

a) Polisacáridos

Los polisacáridos son polímeros que están formados por macromoléculas y tienen funciones esenciales, como proporcionar energía. Por lo tanto, su empleo es fundamental en el sector industrial, ya que reemplazan por completo a los polímeros derivados del petróleo. Sin embargo, se ha concluido que aún no se ha explotado en su totalidad, pues se cree que posee una gran versatilidad. Asimismo, los polisacáridos se dividen en solubles y no solubles: para los primeros se emplea agua para extraerlos; para los segundos, en cambio, se usan disolventes inorgánicos. Sin embargo, hoy en día se están poniendo a prueba nuevos métodos de extracción como la extracción que emplea ultrasonido [15].

Algunos ejemplos de polisacáridos se los puede observar en la TABLA I.

TABLA I

EJEMPLOS DE POLISACÁRIDOS [15]

Polímero natural	**Algas**	**Animales**	**Bacterias**	**Hongos**
Almidón	Agar	Quitina	Dextrano	Elsinano
Celulosa	Galactanos	Quitosato	Levan	Quitina
Pectina	Alginato	Ácido hialurónico	Gellan	Pululano
Gomas	Carragenanos		Xantano	Glucanos

b) Proteicos

Los polímeros proteicos son los que se encuentran enlazados por enlaces peptídicos y se forman por aminoácidos. Y se encuentran en tejidos animales y vegetales. Son utilizados mayormente en la industria biomédica [16]. Algunos de sus ejemplos son:

TABLA II

EJEMPLOS DE POLÍMEROS PROTEICOS [16]

Componentes estructurales de tejidos animales	**Proteínas de la seda producida por *Bombyx mori***	**Proteínas vegetales de maíz y trigo**
Colágeno	Fibroína	Zein
Queratina	Sericina	Gluten

c) Polinucleótidos

Los materiales que se utilizan en el campo de la biotecnología y los nanomateriales están progresando en términos de investigación enfocados a la medicina estética ya que promueve la regeneración tisular. Los siguientes son ejemplos claros de estos, que almacenan y transmiten información [17].

TABLA III

EJEMPLOS DE POLÍMEROS POLINUCLEÓTIDOS [17].

Polinucleótidos que almacenan y transmiten información	
ADN (Ácido desoxirribonucleico)	ARN (Ácido Ribonucleico)

1.3.7.3. Propiedades de los Biopolímeros Naturales

Las propiedades de los biopolímeros naturales se establecen en los más importantes, en la TABLA IV, se observa la siguiente información de propiedades químicas y físicas de los biopolímeros naturales más usados [18].

TABLA IV

PROPIEDADES DE LOS BIOPOLÍMEROS MÁS USADOS [18]

BIOPOLÍMERO	PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS
Celulosa	Es insoluble en el agua
	Tiene alta resistencia a la tracción y compresión
	Con elasticidad baja
	Biodegradable
Quitina/Quitosano	Es insoluble en el agua
	Tiene solubilidad en soluciones acuosas ácidas
	Viscosidad alta
	Claridad óptica
Agar	Es insoluble en el agua fría, pero es soluble en agua hirviendo
	Baja viscosidad en solución
	Transparencia alta
	Resistencia alta a bajas concentraciones
Almidón	Es insoluble en el agua
	Blanco e inodoro
Colágeno	Resistencia alta a la tracción
	Excelente biocompatibilidad
	Excelente biodegradabilidad
	Estructuro de tipo red
Seda	Elasticidad de moderada a baja
	Buena capacidad de absorción a la humedad
	Insoluble en agua
	Buena resistencia a la tracción

1.3.7.4. Aplicaciones de los Biopolímeros Naturales

Algunas aplicaciones de los biopolímeros naturales se redactan dependiendo de cual se use, en la TABLA V, se menciona las diferentes aplicaciones a las que están destinadas los biopolímeros naturales más usados [18].

TABLA V

APLICACIONES DE LOS BIOPOLÍMEROS NATURALES MÁS USADOS [18]

BIOPOLÍMERO	APLICACIONES
Celulosa	Industria de empaques alimentarios y textil
	Producción de papel y vendaje para heridas
	Ingeniería de tejidos
	Liberación de fármacos
	Principal material para el andamiaje
Quitina/Quitosano	Ingeniería de tejidos
	Liberación de fármacos y genes
	Cicatrización de heridas
	Industria cosmética y cuidado capilar
	Formación de películas biodegradables
Agar	Industria de empaques alimentarios
	Estabilizador
	Emulsionante
	Agente espesante
	Formación de películas delgadas
Almidón	Industria textil
	Industria del papel
	Industria Farmacéutica
	Tratamiento de agua
	Adhesivos
Colágeno	Rellenos dérmicos y vendaje para heridas
	Regeneración de tejidos y prótesis vasculares
	Aplicaciones cardiacas y cirugías estéticas
	Injertos óseos e implantes oculares
	Liberación de fármacos
Seda	Ingeniería de tejidos
	Liberación de fármacos
	Ligamentos artificiales e Implantes oculares
	Recubrimientos compuestos biodegradables

El uso de estos biomateriales naturales se concreta principalmente en los sectores textil, farmacéutico y biomédico. Su incorporación en la matriz de materiales compuestos es considerada una tendencia clave de desarrollo, fundamentada en las ventajas que aporta su biodegradabilidad en diversos campos de aplicación [15] [16][17] [18].

1.3.8. Pruebas para materiales compuestos

Para evaluar la estabilidad, el desempeño estructural y la durabilidad de los materiales compuestos, es indispensable efectuar un conjunto de pruebas físicas, térmicas y mecánicas. Estas pruebas permiten determinar atributos como la resistencia, la adherencia, el comportamiento frente a impactos, la degradación térmica y la vida útil, asegurando así que son aptas para aplicaciones en ingeniería avanzada e industrial [19] .

1.3.8.3. Ensayos Mecánicos

Para comprender la reacción del material compuesto frente a las fuerzas que se le aplican, son fundamentales los ensayos mecánicos. Incluyen pruebas de flexión, fatiga, tracción, compresión e impacto que permiten establecer propiedades como el módulo elástico, la resistencia máxima y el límite de fluencia. Las pruebas de compresión y fatiga en materiales compuestos permiten determinar los tipos de fallas más comunes y cuantificar la resistencia residual bajo cargas cíclicas. Esto es crucial para los materiales que se refuerzan con fibras. Aun así, la prueba que mayormente se realiza a los materiales compuestos poliméricos es de fatiga [19][20].

a) Ensayo de fatiga

Varias empresas fabricadoras de materiales compuestos han establecido que los ensayos de fatiga en plásticos que tengan algún tipo de refuerzo con fibra son vitales para calcular la vida útil de estructuras sometidas a esfuerzos cíclicos, dado que el deterioro gradual tanto de la matriz como de la interfaz entre la matriz y la fibra son las razones más comunes de fallo [20].

En general, en estos ensayos de fatiga pueden ser por compresión, y el objetivo es prevenir que ocurra un pandeo global a través de dos enfoques fundamentales en la aplicación de ensayos bajo carga axial. La primera hace referencia a restringir la medida hasta alcanzar el pandeo mencionado y la segunda, que es la que se emplea guías antipandeo para prevenir el pandeo que se genere en general. Estos métodos presentan desventajas, ya que solo uno de ellos funcionará como prueba de fatiga a causa de la cantidad de accesorios. Estos procedimientos también se pueden utilizar para pruebas de compresión; basta con añadir

más probetas que tengan geometrías distintas [20]. Un resumen de esos ensayos de fatiga se presenta en la Fig 7.

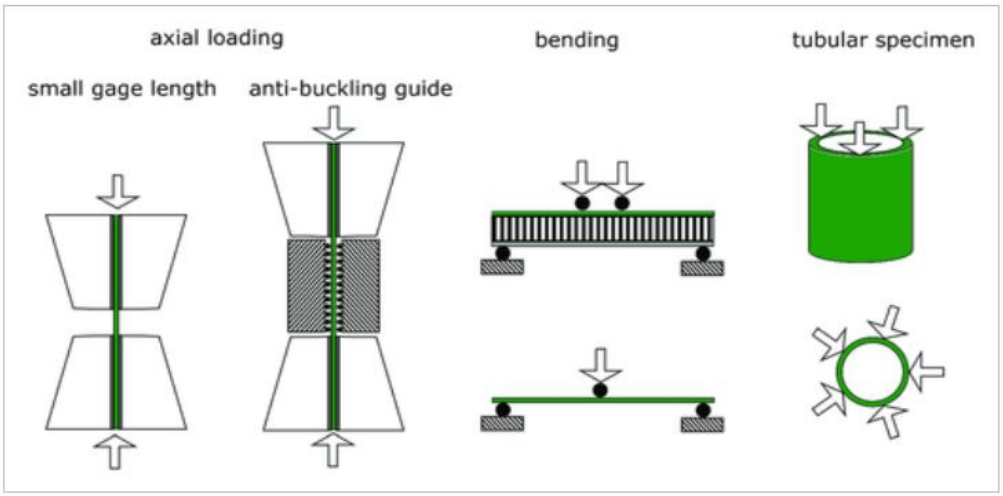


Fig 7. Diferentes configuraciones para el ensayo de fatiga aplicado compresión [20].

1.3.8.4. Ensayos Térmicos

Estos ensayos van a evaluar cómo se comporta el material compuesto a diferentes variaciones de temperatura y son los que más se usan, para esto son primordiales los siguientes:

a) DSC (Calorimetría diferencial de barrido)

Se trata de un método que permite ensayar materiales compuestos para establecer cómo varía su capacidad teórica, utilizando para ello el calentamiento y enfriamiento controlados o manteniendo una temperatura constante. Para calcular la eficiencia del proceso junto a la capacidad teórica, además, se establece cómo varía su entalpía. Es importante señalar que el DSC es el examen más empleado en laboratorios y que puede aplicarse a cualquier material compuesto. En este procedimiento, se colocará una muestra y una referencia para poder comparar las temperaturas de ambas; la referencia suele ser un material inerte y vacío, lo que posibilita la comparación de las variaciones térmicas con respecto a la muestra real, que es la que será estudiada [21].

En la Fig 8, se puede observar cómo se transmite el calor en la prueba DSC, en donde se va a necesitar más cantidad de calor para el aumento respectivo de la temperatura en comparación con el exceso de calor que se necesita para la referencia [21].

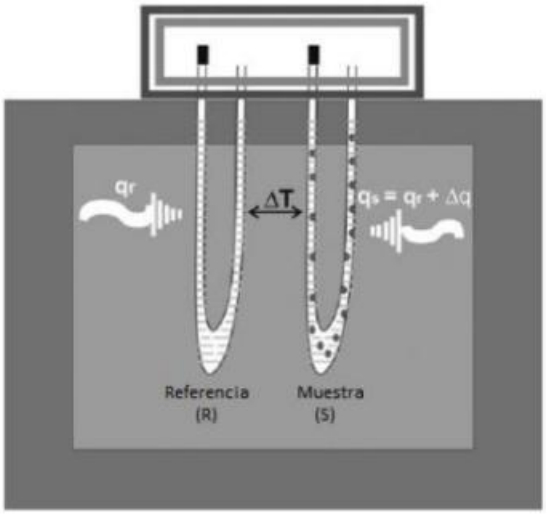


Fig 8. Flujo de calor en una muestra y referencia de la prueba DSC [21].

b) TGA (Análisis Termogravimétrico)

Es una técnica analítica, muy empleado en tiempos recientes. Se utiliza para determinar la estabilidad térmica y cómo se pierde masa en relación con la temperatura. Por lo tanto, se emplean balanzas termogravimétricas calibradas con una precisión de 0,1 % más o menos. La muestra se calienta con cantidades que oscilan entre 5 grados centígrados por minuto hasta alcanzar los 600 grados centígrados; empieza desde los 25 grados centígrados y está colocada en un portador de platino bajo una atmósfera de nitrógeno. Luego se pesa en esta balanza termogravimétrica para verificar su variación de masa [22].

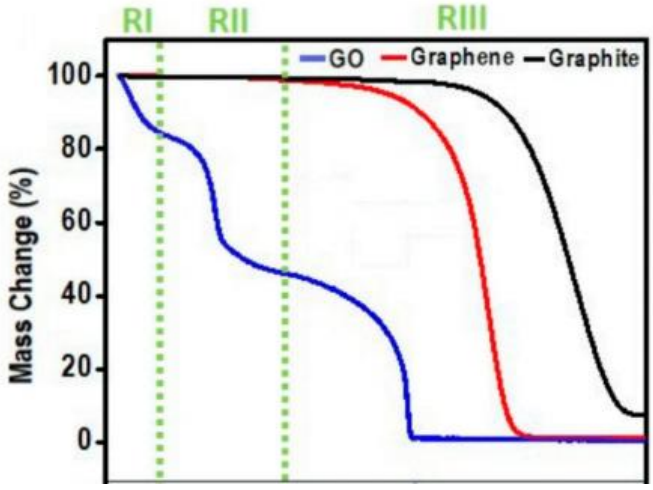


Fig 9. Variaciones de peso en una prueba TGA de variaciones de Grafito [22].

c) DMA (Análisis Dinámico Mecánico)

Se trata de un ensayo estándar para polímeros, que consiste en ejercer una fuerza oscilante sobre un material que está expuesto a una determinada temperatura y frecuencia. La respuesta del material compuesto a la fuerza oscilante que se aplica será el valor a medir, y se llamará tensión. Por lo tanto, su relación entre la deformación y la tensión del material constituirá el límite elástico de este. Los procedimientos que se muestran en la Figura 10 son el uso de abrazaderas diversas o la flexión de placas, los cuales pueden distorsionar las muestras del ensayo al generar una tensión de cizallamiento [23].

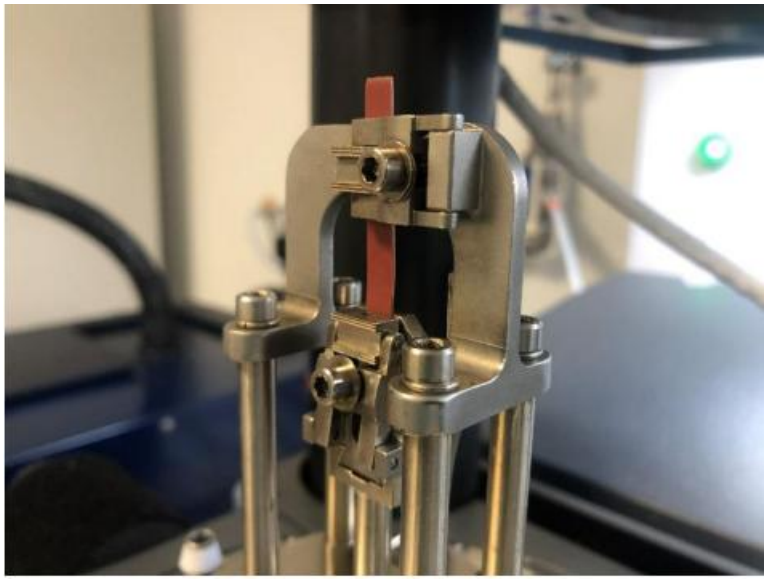


Fig 10. Recubrimiento de pinzas para generar tensión para prueba de DMA [23].

1.3.8.5. Ensayos Físicos

Los ensayos físicos que incluyen materiales compuestos se centrarán en características macroscópicas, tales como la resistencia al desgaste y la absorción de agua. En la absorción de agua, hay una relación directa con la densidad que se generará en función de las características de la matriz/fibra. El comportamiento al desgaste, en cambio, establece la manera en que el material responde a la abrasión o fricción constante [24] [25] [26]. Asimismo, estas pruebas están estandarizadas, como las pruebas de:

a) Densidad según la ASTM D792

Este ensayo en plásticos determina la densidad relativa o la gravedad especifica, para tal se tiene dos métodos [24].

- En el primer método, los plásticos se someterán a pruebas en agua. Solo se podrán utilizar piezas de entre 1 g y 50 g, las cuales serán pesadas en agua mediante un lastre que contenga plásticos menos densos que el agua. Dirigido a plásticos que entran en contacto con el agua y no afectan a otras propiedades del plástico, aparte de mojarse debido a esa interacción [24].
- El segundo método realiza pruebas a los plásticos en líquidos que no son agua. Aquí se empleará un líquido diferente al agua, manteniendo el peso entre 1 y 50 gramos. Estos plásticos, que se fabrican mediante este procedimiento, interactuarán con el agua de tal manera que se verán afectados o serán más livianos que esta [24].

b) Absorción de agua ASTM D570

Este procedimiento establecerá la tasa de absorción cuando un material compuesto o un plástico se sumerge en agua. Este ensayo abarca toda clase de plásticos, incluyendo los que pueden haber sido moldeados en frío o en caliente, laminados con forma de varilla, homogéneos y láminas con un grosor de 0.13 milímetros o superior. Su objetivo es establecer la exposición a la humedad y sus efectos, así como determinar el control de uniformidad del producto, sobre todo en varillas o láminas [25].

c) Desgaste por fricción ASTM G99

Este método de ensayo expone un procedimiento de laboratorio que utiliza un aparato pin sobre disco para calcular el desgaste que sufren los materiales durante el deslizamiento. Los materiales se prueban en pares bajo condiciones nominalmente no abrasivas. Los aspectos experimentales más importantes que se deben tener en cuenta al emplear este tipo de dispositivo para medir el desgaste se detallan. Además, se puede calcular el coeficiente de fricción [26].

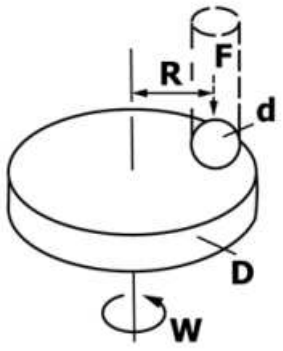


Fig 11. Procedimiento para el desgaste por fricción.

1.3.8.6. Ensayos No Destructivos

Los ensayos no destructivos se llevan a cabo para evitar que los materiales compuestos sufran daños, lo que permite identificar algunos defectos internos y vacíos capaces de comprometer la resistencia del material, lo cual podría tener un efecto en los elementos aeronáuticos. Para ello, se emplean tres métodos: ultrasonido, radiografía y termografía infrarroja (TIR) [27][28][29][30].

a) Ultrasonido

Esta técnica es la más empleada en pruebas no destructivas de materiales compuestos porque requiere menos equipo, que además es de tamaño reducido. Asimismo, el ultrasonido identifica fallas con un alto nivel de precisión y el precio de esta prueba es inferior al de una termografía o radiografía. Uno de los equipos que se suele utilizar son un pulsador/receptor de onda cuadrada Olympus® modelo 5077PR [28].

El principio funciona con un sistema que incorpora un equipo multicanal de ultrasonido que opera mediante el principio del disparo tardío de los transductores emisores y también una recepción de señales ajustada temporalmente. El mayor beneficio del arreglo en fase es que puede generar un haz ultrasónico y controlar electrónicamente tanto la distancia focal como el ángulo de incidencia. Esto hace posible concentrar o enfocar el haz a través del material laminado en estudio, lo que facilita la inspección de estructuras con geometría compleja [28].

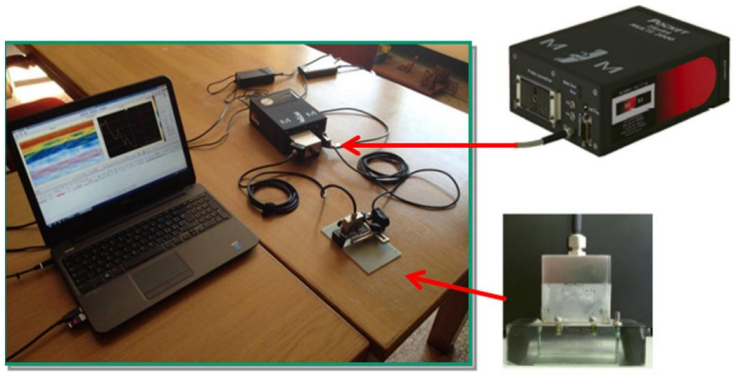


Fig 12. Sistema de Ultrasonido para Ensayos no Destructivos en Materiales Compuestos [28].

b) Radiografía

Es un método en el cual se puede conseguir datos de un material compuesto dedicado a la industria y consta en colocar una película radiográfica los cuales constan de una especie de gelatina, este tiene haluro sensible a la radiación con un nitrato de celulosa flexible y azulada, es más usado en la industria [29].

a) Termografía infrarroja (TIR)

Es un método de ensayo no destructivo que se utiliza sin entrar en contacto con el material compuesto. La prueba obtiene todos los datos térmicos a través de la recolección de cámaras termográficas de la radiación infrarroja del espectro electromagnético. Esta información puede desarrollarse como información que determinará el daño del material según una curva, si existe [30].

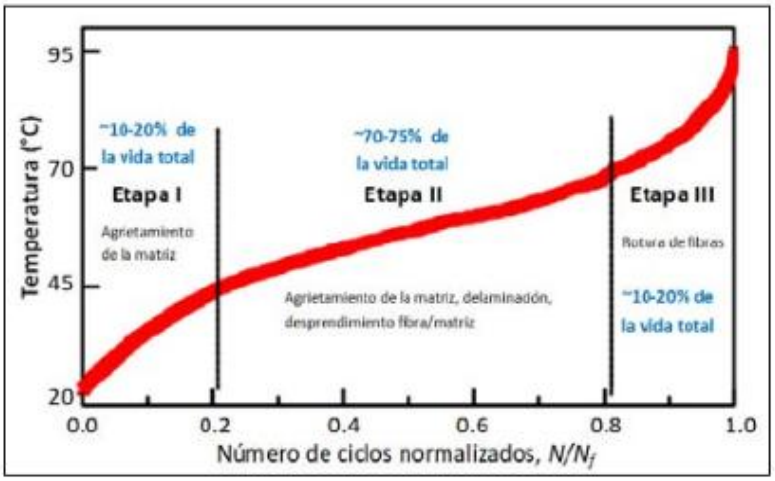


Fig 13. Curva de una prueba de Termografía Infrarroja [30].

1.3.9. Pruebas para Biomateriales

Los ensayos para biomateriales son más avanzados porque se emplean equipos asociados con el campo de la biomedicina, dado que la mayor parte de estos biomateriales pertenecen a este sector y se utilizan principalmente en él. Los más relevantes son presentados [31][32][33].

1.3.9.3. Ensayos de Biocompatibilidad

Examinan si el biomaterial puede interactuar con tejidos vivos sin causar toxicidad, inflamación o rechazo. Son la base de cualquier validación biomédica, ya que determinan

si el material es apropiado para estar en contacto con el cuerpo humano. Se dividen en pruebas in vivo (modelos con animales) e in vitro (cultivos de células). Cuando se va a usar algún bioplástico se analiza si es un material degradable para que así se confíe la seguridad al efectuarse en las células [31].

1.3.9.4. Ensayos de Citotoxicidad

Prueba normalizada según la ISO 10993-5, siendo una de las primeras pruebas y obligatoria que se debe realizar a los tipos de biomateriales. Son pruebas in vitro y se realiza para determinar si un biomaterial causa la muerte a las células [32].

Un bioplástico que se obtiene del nopal se puede adquirir a través de ensayos de citotoxicidad para verificar que sus solventes no son dañinos para las células [32].

1.3.9.3. Ensayos de Degradación

Analizan cómo el material se descompone a lo largo del tiempo, simulando las condiciones en las que está el ser humano, como la temperatura, la humedad, el pH y las enzimas que genera. La pérdida de masa en los bioplásticos vegetales, por ejemplo, puede medirse a partir de un cambio en las propiedades mecánicas durante un período específico [33].

1.3.9.4. Ensayos de tracción y biodegradabilidad

En los biomateriales, biopolímeros en conjunto con los materiales compuestos se deben aplicar dos ensayos importantes los cuales son de tracción y biodegradabilidad [34][35].

1.3.9.4.1. Ensayos de tracción

Este método se realiza según la norma ASTM D3039, en donde se determina las propiedades mecánicas de los materiales de refuerzo que contenga una matriz polimérica [34].

a) Factores de ensayo de tracción

Con la finalidad de realizar análisis y diseños estructurales, así como investigaciones, desarrollo y especificación, y control de calidad, se utiliza esta técnica de ensayo para obtener información sobre las propiedades de tracción de los materiales. El comportamiento a tracción se ve influenciado por diversos factores que deben ser reportados. Estos abarcan [34]:

- El método de colocación y preparación, la naturaleza del material,

- La secuencia en que se apilan las muestras, su acondicionamiento y preparación,
- La alineación y fijación,
- La rapidez en que se aplica la carga,
- El tiempo bajo temperatura,
- Además de la proporción de volumen del refuerzo
- El número de vacíos.

b) Interferencias en el ensayo de tracción

Se sabe que la dispersión de los datos de materiales compuestos se produce por prácticas inapropiadas en el proceso de fabricación, por no alinear correctamente las fibras y por dañar las probetas a causa de un mecanizado erróneo. Esta y las siguientes interferencias se puede presentar en los ensayos de tracción [34].

- **Fijación:** La sujeción produce un porcentaje elevado de errores, especialmente cuando la variabilidad en los resultados del material es significativa. Esto indica que el procedimiento de fijación de muestras presenta problemas [34].
- **Alineación del sistema:** si la flexión es demasiado alta, puede dar lugar a fallos en los cálculos del módulo de elasticidad y a fallos que ocurren antes de tiempo. Por ende, es fundamental disminuir la flexión del sistema de ensayo al mínimo. Esto puede suceder a causa de una incorrecta alineación de las mordazas o de las probetas, ya sea por un montaje inadecuado o por desviaciones en la tolerancia que se originan debido a un mal acondicionamiento [34].
- **Efectos de los bordes en laminados con capas angulares:** El reblandecimiento de los bordes en laminados que tienen capas fuera del eje es normalmente el motivo de la disminución de la rigidez y de los fracasos prematuros. Esto puede dar lugar a una subestimación significativa del módulo y la resistencia en laminados de este tipo. En cambio, en los laminados cuasi-isotrópicos que tienen un número considerable de capas a 0°, el efecto es menos importante [34].

A continuación, se muestra dónde debe ubicarse las probetas para un ensayo de tracción eficaz.

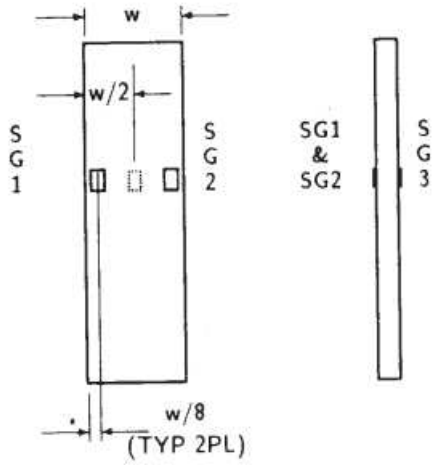


Fig 14. Ubicaciones exactas de los medidores para pruebas de tracción [34].

1.3.9.4.2. Ensayo de biodegradabilidad

La norma INTE/ISO 14855, es la base de los ensayos de biodegradabilidad para los compuestos plásticos. El uso del ensayo con compostaje controlado en esta norma se fundamenta en una medición de dióxido de carbono, que determina el nivel de descomposición del plástico o material compuesto. Dado que las condiciones medioambientales en el compostaje están rigurosamente controladas. Sin embargo, hay que tener más términos [35].

a) **Términos del ensayo de biodegradabilidad**

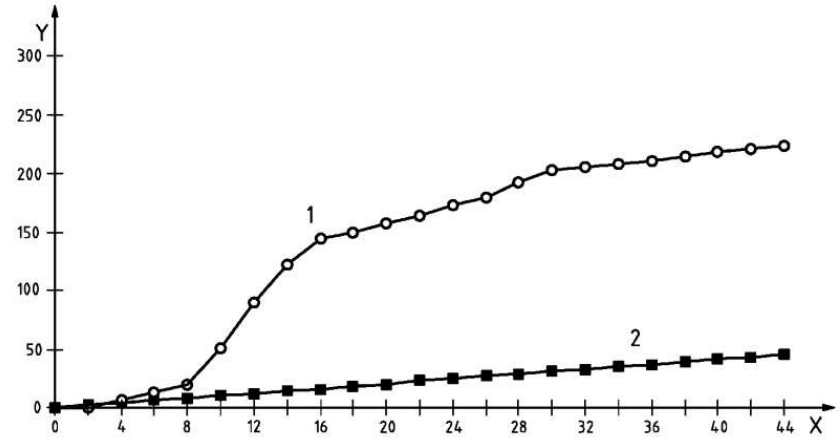
- **Biodegradabilidad aeróbica final:** Es la parte de descomposición de un material por medio de microorganismos con una actuación de dióxido de carbono [35].
- **Compostaje:** Se trata de un acondicionador de terreno entre residuos vegetales material orgánico y un poco de minerales, esto se obtiene por biodegradación [35].
- **Desintegración:** Descomposición de un material en varios pedazos [35].
- **Sólidos secos totales:** Se trata de una cantidad de solidos que se tiene de un material de ensayo el cual se seca a 105 grados centígrados conservando su masa [35].
- **Sólidos volátiles:** Para obtener la cantidad de sólidos, se quita a una muestra conocida del compost o material de ensayo la ceniza que resulta después de quemarla a una temperatura cercana a los 550 °C. Este valor se calcula con base en el contenido total de sólidos secos que contiene la misma muestra [35].

- **Cantidad de dióxido carbono generado:** La cantidad máxima teórica de dióxido de carbono que puede producirse tras la oxidación completa de un compuesto químico se establece empleando su fórmula molecular, y se expresa en miligramos de dióxido de carbono producidos por cada miligramo o gramo del compuesto analizado [35].
- **Fase de demora:** Período de tiempo, expresado en días, que comienza con el inicio del ensayo y termina cuando los microorganismos degradadores consiguen adaptarse o seleccionar. En este momento, el nivel de biodegradabilidad de la materia orgánica o compuesto químico es cerca del 10 % de su capacidad máxima [35].
- **Nivel de degradación alto:** La proporción que no experimenta biodegradación más allá de lo que ocurre en un ensayo, comparada con el porcentaje de descomposición de una sustancia orgánica o un compuesto químico [35].
- **Fase de biodegradación:** Periodo, medido en días, que transcurre desde el final de la fase de demora de un ensayo hasta alcanzar aproximadamente el 90 % del nivel máximo de biodegradación [35].

En base a estos términos se puede establecer los principios de método.

b) Principios de método

La biodegradación aeróbica del material de ensayo produce agua, dióxido de carbono, sales minerales y una biomasa microbiana nueva como productos finales. Con la finalidad de determinar la producción total de CO_2, se lleva a cabo un seguimiento o medición constante (o frecuente) de la generación del dióxido de carbono en los envases de control y ensayo. El porcentaje de biodegradación se refiere a la relación que existe entre el dióxido de carbono producido por el material de ensayo y la cantidad máxima teórica de CO_2, que se calcula en función del contenido total de carbono orgánico (TOC). Este porcentaje no considera el carbono presente en la biomasa microbiana, ya que durante el experimento no se transforma en dióxido de carbono [35].



Leyenda
X Tiempo (días)
Y Producción de CO_2 (g/recipiente)
1 Material de ensayo
2 Blanco

Fig 15. Curva de degradación de un material sometido a producción de CO2 [35].

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Obtener y caracterizar un bioplástico natural a partir de la hoja de tuna andina (Nopal) mediante diseño experimental (DOE-MEZCLAS).

1.4.2. Objetivos Específicos

- Determinar los parámetros físico-químicos de las variables de obtención que intervienen en el proceso de obtención del bioplástico natural a partir de la hoja de tuna andina (Nopal) mediante (DOE MEZCLAS).
- Obtener probetas para determinar las propiedades mecánicas a tracción y de biodegradabilidad del bioplástico natural bajo normas internacionales.
- Evaluar mediante software especializado, las propiedades mecánicas para optimizar el comportamiento mecánico del material obtenido.

CAPÍTULO II

2. METODOLOGÍA

El desarrollo metodológico de la presente investigación se inicia con la obtención del mucílago, componente esencial en la formulación del bioplástico, debido a su función como matriz natural y agente estructurante. Posteriormente, se estableció el proceso de producción del bioplástico, incorporando los materiales complementarios necesarios para su elaboración y detallando los equipos e instrumentos empleados en cada etapa experimental. La planificación del proceso incluyó la aplicación de un Diseño de Experimentos de Mezclas (DOE) mediante un software estadístico especializado, el cual permitió definir los rangos y proporciones óptimas de los componentes que intervienen en la mezcla. A partir de las combinaciones propuestas por el diseño estadístico, se procedió a la fabricación de probetas destinadas a los ensayos de biodegradabilidad y tracción, siguiendo las normas técnicas correspondientes. De este modo, la metodología integra un enfoque experimental y analítico orientado a optimizar las propiedades físico–mecánicas del bioplástico obtenido a partir de la hoja de tuna andina.

2.1. Diagrama de producción del Mucílago

La Fig 16, representa el flujo de producción lineal de las operaciones que conforman el proceso desde su recolección hasta el producto final (Mucílago de Nopal).

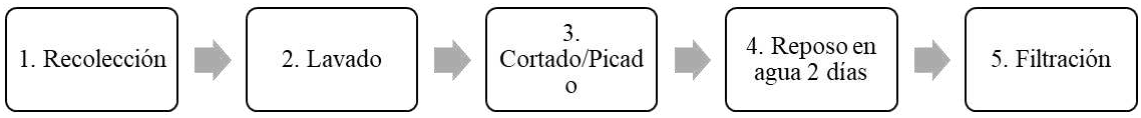


Fig 16. Proceso lineal de producción de mucílago.

2.2. Diagrama de producción del Bioplástico

La Fig 17, representa el desarrollo del bioplástico mediante una secuencia controlada de etapas garantizando la correcta interacción de los ingredientes. Como primera etapa la entrada de mucílago como matriz principal del material, al cual se adiciona glicerina como plastificante para otorgarle flexibilidad. Posteriormente, se incorpora vinagre como agente acidificante, regulando el pH y favoreciendo la mezcla con los aditivos de almidón y

gelatina, responsables de mejorar la cohesión y las propiedades mecánicas del biopolímero. La mezcla resultante se somete a una agitación manual constante a una temperatura comprendida entre 70 y 90 °C hasta lograr una textura homogénea. Posteriormente se deja secar al ambiente durante 1 a 2 días. Finalmente, se procede al curado del material en horno a 40-50 °C durante un tiempo de 5 a 10 minutos, obteniéndose así una película bioplástica estable y flexible.

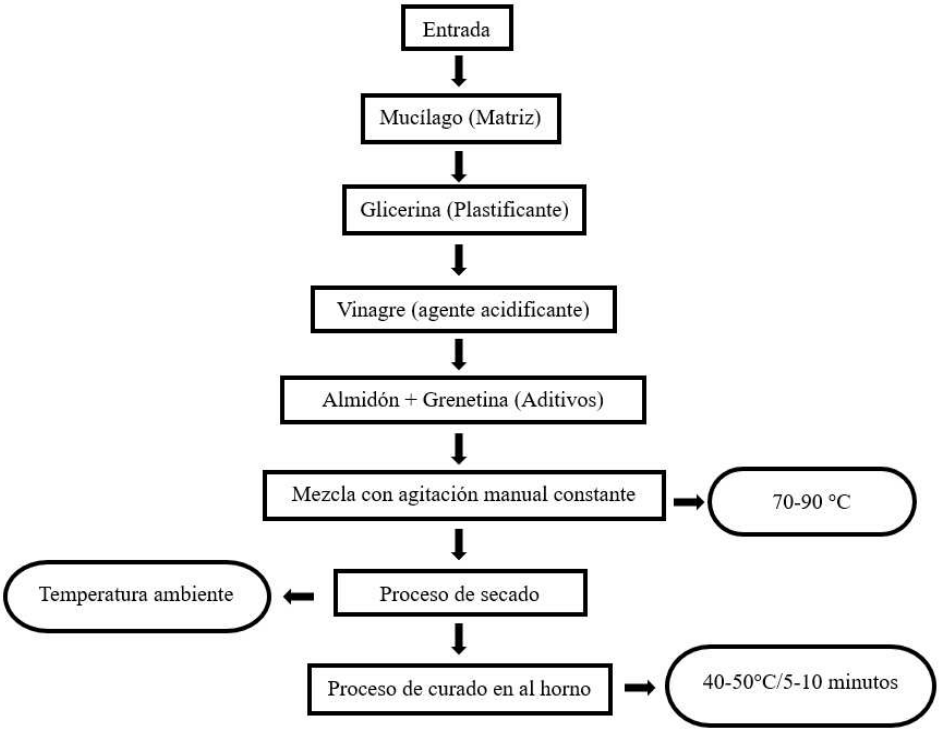


Fig 17. Flujo de procesos de producción del bioplástico.

2.3. Materiales

En la TABLA VI, se detallan los materiales utilizados para la producción del bioplástico.

TABLA VI

MATERIALES UTILIZADOS EN LA PRODUCCIÓN DEL BIOPLÁSTICO

Material	**Descripción**	**Imagen**
Hoja de tuna andina (fuente de mucílago)	Fuente rica en mucílago, una sustancia gelatinosa compuesta por polisacáridos naturales. Este componente actúa como matriz	

	estructural y agente gelificante, aportando cohesión al bioplástico.	
Glicerina	Compuesto orgánico líquido, incoloro y viscoso, usado como plastificante. Mejora la flexibilidad y elasticidad del bioplástico al reducir su fragilidad.	
Aditivos	Los aditivos son sustancias que se incorporan en pequeñas cantidades a los bioplásticos para mejorar sus propiedades físicas, mecánicas o funcionales. Dependiendo de su tipo, pueden aportar flexibilidad, resistencia mecánica (como la gelatina).	
Almidón de Yuca	Compuesto natural extraída de la raíz de la planta de Yuca compuesta principalmente por amilosa y amilopectina.	
Vinagre	Solución acuosa obtenido generalmente por fermentación de azúcares naturales, ayuda a ajustar el PH de la mezcla por sus propiedades antimicrobianas.	

2.4. Equipos

En la TABLA VII, se detallan los equipos utilizados para la obtención del bioplástico.

TABLA VII

EQUIPOS UTILIZADOS EN LA PRODUCCIÓN DEL BIOPLÁSTICO

Nombre	Descripción	Imagen
Balanza	Balanza digital marca CAMRY, modelo: EHA601, con precisión de 0.01 g.	
Vasos precipitados	Vasos de 250 ml y 50 ml para la combinación de los ingredientes	
Molde de vidrio	Molde de vidrio de 14x28 cm con espesor de 6mm para el vertimiento y enfriamiento de la mezcla.	
Horno	Horno de secado para el curado de las probetas.	
Máquina universal de polímeros	Equipo necesario para la obtención de propiedades mecánicas del biopolímero a través de ensayos de tracción, marca SHIMADZU, modelo AGS-X.	
Olla	Olla de 300 ml para la cocción de la mezcla.	

Termómetro	Termómetro para el control de temperatura de la mezcla.	
Agitador de vidrio	Agitador de vidrio para la mezcla homogénea de los ingredientes	

2.5. Métodos

Dentro de este trabajo experimental se ocupó diversos métodos de investigación embarcando las bases del proceso de bioplásticos, su porcentaje de combinación, entre otros aspectos, el tipo de investigación descriptiva, bibliográfica y experimental siendo estos los métodos de investigación más relevantes para el desarrollo de este proyecto.

2.5.1. Investigación experimental

La presente investigación tuvo un enfoque experimental, debido a que se formularon y evaluaron diferentes combinaciones de bioplástico elaboradas a partir de tuna andina (*Echinopsis pachanoi*), incorporando componentes como glicerina, vinagre, gelatina y almidón en distintas proporciones.

Para determinar la composición más adecuada del biopolímero, se aplicó un diseño de mezclas que permitió establecer las proporciones óptimas de cada componente y analizar su influencia en las propiedades físicas, mecánicas y de biodegradabilidad del material obtenido. Posteriormente, las formulaciones desarrolladas fueron sometidas a diversos ensayos experimentales con el fin de evaluar su comportamiento y desempeño bajo condiciones controladas y ambientales.

2.5.2. Investigación descriptiva

La investigación presentó un alcance descriptivo, ya que permitió recopilar, organizar y analizar la información obtenida a partir de los diferentes ensayos realizados al bioplástico desarrollado. Mediante los resultados experimentales se identificaron las propiedades físicas, mecánicas y de biodegradabilidad del material, así como las características y condiciones necesarias para su adecuada elaboración y desempeño. Los valores

correspondientes a cada propiedad fueron determinados mediante el uso de equipos e instrumentos de medición especializados, lo que facilitó la caracterización del biopolímero y la interpretación de su comportamiento durante el proceso experimental.

2.5.3. Investigación bibliográfica

La investigación bibliográfica constituyó una base fundamental para el desarrollo del presente estudio, ya que permitió obtener conocimientos teóricos relacionados con los bioplásticos, sus componentes y los procesos involucrados en su elaboración. A través de la revisión de diversas fuentes de información, como artículos científicos, libros, tesis y documentos académicos, se recopilaron antecedentes y criterios técnicos necesarios para comprender las propiedades de los materiales empleados, así como para establecer el diseño experimental y los procedimientos adecuados para la obtención y caracterización del biopolímero desarrollado.

2.6. Operacionalización de variables

Las variables son características o propiedades medibles que pueden tender a cambiar sus valores, estas variables tienen como objetivo garantizar el enfoque recolectado de información dentro del trabajo experimental convirtiendo datos medibles y una hipótesis.

2.6.1. Variable independiente

TABLA VIII

VARIABLE INDEPENDIENTE EN LA PRODUCCIÓN DEL BIOPLÁSTICO

Variable	Definición	Dimensión	Rangos	Indicadores
Biopolímero natural a partir de la hoja de tuna andina	En la variable independiente tenemos a la obtención de un bioplástico natural a partir de la hoja de tuna andina mediante DOE-MEZCLAS, dentro de esta variable vemos el cambio de características	%Almidón %Gelatina	0-8(% g)	Valores de la cantidad de almidón y gelatina conveniente para la producción del bioplástico.
		Temperatura de curado	40-60(C°)	Valores de temperatura del horno para el curado del bioplástico.

	resultantes al variar el porcentaje (%) de almidón y gelatina, así como el tiempo y temperatura del horno para el curado.	Tiempo de curado	5-10 (min)	Valores del tiempo optimo de curado en el horno para el bioplástico.

2.6.2. Variable dependiente

TABLA IX

VARIABLE DEPENDIENTE DE LA PRODUCCIÓN DEL BIOPLÁSTICO

Variable	Definición	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores
Caracterización del biopolímero	Esta variable comprende la causa de la variable dependiente que en este trabajo implica la caracterización de las propiedades del bioplástico, así como la biodegradabilidad que se mide las pérdidas de masa en el tiempo de un mes, las pruebas de tracción que dan como resultado el módulo de elasticidad, porcentaje de deformación y esfuerzo.	Propiedades mecánicas (Tracción)	Esfuerzo a la tracción	Valores del esfuerzo máximo a la tracción
			Módulo de elasticidad	Valores del módulo de elasticidad
			Porcentaje de deformación	Valores del porcentaje de deformación
		Propiedades físicas	Biodegradabilidad	Valores de la perdida en masa que presenta el biopolímero cada 2 días

2.7. Hipótesis

Hipótesis Nula

La variación en los porcentajes de almidón y gelatina, la temperatura y el tiempo de curado en la obtención de bioplástico natural a partir de la hoja de tuna andina mediante Diseño de Experimentos (DOE-MEZCLAS), no influye significativamente en las propiedades mecánicas (módulo de elasticidad, esfuerzo y deformación) y en la biodegradabilidad del material.

Hipótesis Alternativa

La variación en los porcentajes de almidón y gelatina, la temperatura y el tiempo de curado en la obtención de bioplástico natural a partir de la hoja de tuna andina mediante Diseño de Experimentos (DOE-MEZCLAS), influye significativamente en las propiedades mecánicas (módulo de elasticidad, esfuerzo y deformación) y en la biodegradabilidad del material.

2.8. Diseño de experimentación DOE

Como punto de partida para la elaboración del diseño de experimentos se desarrolló pruebas piloto donde se conoció las cantidades apropiadas de los ingredientes para luego establecer porcentajes de mezcla del 100% como se muestra en la TABLA X.

Constantes:

TABLA X

PORCENTAJE DE INGREDIENTES CONSTANTES

Mucílago	Glicerina	Vinagre	Gelatina	Almidón
84,00%	5,00%	3,00%	3,00%	5,00%
200 ml	2,79 g	1,99 g	2,66 g	4,52 g

Estos porcentajes representan las proporciones de cada componente utilizado en la mezcla para la elaboración del bioplástico, permitiendo identificar aquellos ingredientes que generan un mayor impacto en sus propiedades finales.

Los componentes como el mucílago, la glicerina y el vinagre se mantuvieron constantes en todas las formulaciones, representando en conjunto el 92% de la mezcla total. En cambio,

la gelatina y el almidón fueron seleccionados como los componentes clave del estudio, variando sus concentraciones entre el 0% y el 8%, asegurando que la suma total de los ingredientes se mantenga en el 100%. Además, se incluyeron dos variables de proceso relacionadas con el curado del material: la temperatura y el tiempo de horneado, cuyos rangos se establecieron entre 40 y 60 °C y de 5 a 10 minutos, respectivamente. Estas condiciones permiten analizar la influencia combinada de la composición y el proceso en las propiedades del bioplástico obtenido.

Partiendo de estas variables obtuvimos 16 casos de mezclas. Se muestra la codificación del software en la TABLA XI.

TABLA XI

CODIFICACIÓN DEL SOFTWARE

Comb.	**Almidón %**	**Gelatina %**	**Temperatura ℃**	**Tiempo min**
1	1	0	40	5
2	0,75	0,25	40	5
3	0,5	0,5	40	5
4	0,25	0,75	40	5
5	1	0	60	5
6	0,75	0,25	60	5
7	0,5	0,5	60	5
8	0,25	0,75	60	5
9	1	0	40	10
10	0,75	0,25	40	10
11	0,5	0,5	40	10
12	0,25	0,75	40	10
13	1	0	60	10
14	0,75	0,25	60	10
15	0,5	0,5	60	10
16	0,25	0,75	60	10

A partir de la TABLA XI, de codificación, se transforma en unidades de medida para las 16 combinaciones como se muestra en la TABLA XII.

TABLA XII

MEDIDAS DE LOS INGREDIENTES DE LAS 16 COMBINACIONES

Comb.	**Almidón (g)**	**Gelatina (g)**	**Temperatura (°C)**	**Tiempo (min)**
C.1	7,182	0	40	5
C.2	5,3865	1,7955	40	5
C.3	3,591	3,591	40	5
C.4	1,7955	5,3865	40	5
C.5	7,182	0	60	5
C.6	5,3865	1,7955	60	5
C.7	3,591	3,591	60	5
C.8	1,7955	5,3865	60	5
C.9	7,182	0	40	10
C.10	5,3865	1,7955	40	10
C.11	3,591	3,591	40	10
C.12	1,7955	5,3865	40	10
C.13	7,182	0	60	10
C.14	5,3865	1,7955	60	10
C.15	3,591	3,591	60	10
C.16	1,7955	5,3865	60	10

2.9. Proceso de obtención del Mucílago

En la TABLA XIII, se detalla el proceso de obtención del Mucílago.

TABLA XIII

PROCESO DE OBTENCIÓN DEL MUCÍLAGO

Proceso	Descripción	Imagen
Recolección	Se realiza una selección y recolección de hojas frescas de tuna andina asegurando que no tengan impurezas como el moho y estén libres de daños físicos para garantizar la calidad del mucílago.	
Lavado	Las hojas recolectadas fueron lavadas con agua destilada para eliminar impurezas, residuos de tierra y partículas externas que pudieran afectar el proceso de extracción.	
Cortado/ Picado	Una vez lavadas las hojas, fueron cortadas en fragmentos de menor tamaño con el propósito de facilitar la liberación del mucílago en las etapas siguientes.	 
Reposo	El material picado fue sometido a un periodo de reposo controlado en agua envasada por un periodo de tiempo de dos días, permitiendo la liberación progresiva del mucílago contenido en la estructura vegetal.	

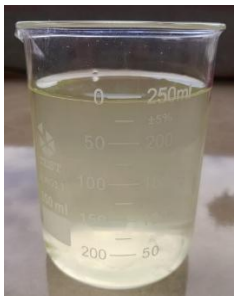
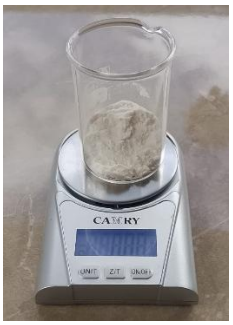
Filtración	Finalmente, el mucílago fue separado mediante un proceso de filtración con la ayuda de un colador, eliminando los residuos sólidos y obteniendo un extracto homogéneo apto para su utilización en la elaboración del biopolímero.	

2.10. Proceso de obtención del biopolímero

En la TABLA XIV, se detalla el proceso de obtención del bioplástico.

TABLA XIV

PROCESO DE OBTENCIÓN DEL BIOPLÁSTICO

Proceso	Descripción	Imagen
Medición de mucílago	Se realizó la medición del mucílago obtenido, cuantificando su masa con ayuda de un vaso precipitado de 200ml marca TEST para garantizar la precisión en la formulación del biopolímero.	
Pesaje de componentes en gr	Los componentes de la mezcla tales como almidón, glicerina, gelatina, vinagre, fueron pesados en gramos de acuerdo con las proporciones establecidas por el software, para el proceso se utilizó una balanza digital marca CAMRY EHA601 de dos decimales de precisión y un vaso precipitado de 50ml marca BOECO.	

Mezcla del mucílago con los ingredientes	Una vez pesado todos los componentes se procedió a la mezcla de todos los aditivos mediante agitación manual continua hasta obtener una solución homogénea.	
Cocción	La mezcla fue sometida a un proceso de agitación constante y calentamiento controlado entre 70-90°C, favoreciendo la gelatinización del almidón y la formación de la matriz polimérica.	
Vertido en moldes	Una vez obtenido la mezcla homogénea esta fue vertida en moldes de vidrio previamente acondicionados para el uso, con el fin de dar forma a una matriz uniforme.	
Secado al ambiente	Las muestras fueron sometidas a un proceso de secado a temperatura ambiente, en la mañana entre 14 a 18 °C y en la noche entre 9 a 13 °C, permitiendo la eliminación progresiva de la humedad.	
Desmoldeo	Una vez acabado el proceso de secado, las matrices fueron retiradas cuidadosamente de los moldes.	

<table>
<tr>
<td>Curado</td>
<td>Finalmente, las matrices fueron puestas en un horno eléctrico de secado para el curado de las probetas.
<table>
<tr><th>N. Comb.</th><th>Temperatura (°C)</th><th>Tiempo (min)</th></tr>
<tr><td>1</td><td>40</td><td>5</td></tr>
<tr><td>2</td><td>40</td><td>5</td></tr>
<tr><td>3</td><td>40</td><td>5</td></tr>
<tr><td>4</td><td>40</td><td>5</td></tr>
<tr><td>5</td><td>60</td><td>5</td></tr>
<tr><td>6</td><td>60</td><td>5</td></tr>
<tr><td>7</td><td>60</td><td>5</td></tr>
<tr><td>8</td><td>60</td><td>5</td></tr>
<tr><td>9</td><td>40</td><td>10</td></tr>
<tr><td>10</td><td>40</td><td>10</td></tr>
<tr><td>11</td><td>40</td><td>10</td></tr>
<tr><td>12</td><td>40</td><td>10</td></tr>
<tr><td>13</td><td>60</td><td>10</td></tr>
<tr><td>14</td><td>60</td><td>10</td></tr>
<tr><td>15</td><td>60</td><td>10</td></tr>
<tr><td>16</td><td>60</td><td>10</td></tr>
</table>
</td>
<td>

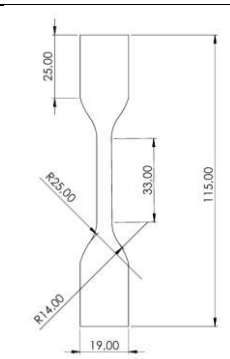
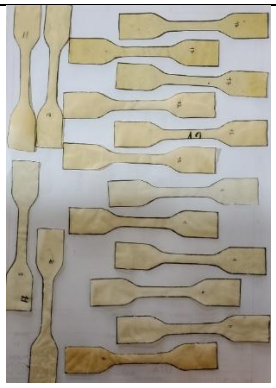
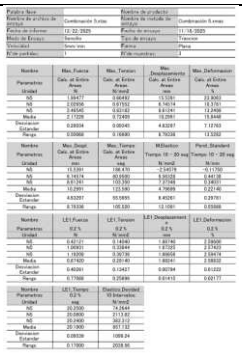
</td>
</tr>
</table>

2.11. Preparación de probetas y ensayos de tracción

Una vez obtenido las matrices del biopolímero se realizó la preparación de las probetas, realizando el corte acorde a la geometría de la norma ASTM D638-14, siguiendo con los respectivos ensayos de tracción en la máquina universal de polímeros.

TABLA XV

PROCESO DE PREPARACIÓN DE PROBETAS Y ENSAYOS DE TRACCIÓN

Proceso	Descripción	Imagen
Diseño de probeta	Se definió la geometría de las probetas tipo IV al trabajar con biopolímeros blandos de acuerdo con la norma ASTM D638-14.	
Corte de probetas	Se realizaron 3 probetas por cada mezcla las cuales fueron cortadas siguiendo las dimensiones establecidas, garantizando uniformidad en forma y tamaño.	
Ensayo de tracción	Las muestras fueron sometidas a ensayos de tracción mediante el uso de una máquina universal, con el fin de determinar sus propiedades mecánicas.	
Resultados	Los datos obtenidos fueron registrados y analizados, considerando parámetros como la fuerza máxima, el módulo de elasticidad y porcentaje de elongación.	

2.12. Ensayos de biodegradabilidad

TABLA XVI

PROCESO DE ENSAYOS DE BIODEGRADABILIDAD

Proceso	Descripción	Imagen
Preparación de muestras	Se prepararon 3 muestras por mezcla con peso controlado de 2g cada una para el desarrollo del ensayo.	
Materia orgánica	Se acondicionó el medio de ensayo, utilizando tierra con una buena cantidad de compost o materia orgánica en una temperatura al medio ambiente, en la mañana entre 14 a 18 °C y en la noche entre 9 a 13 °C con una humedad del ambiente del 45%, para colocarlos en los envases con el fin de evaluar la biodegradación del material.	
Revisión (Limpieza y secado)	Las probetas fueron revisadas periódicamente cada dos días del medio de ensayo, limpiadas para eliminar residuos adheridos y secadas antes de cada medición.	
Medición y registro de resultados	Se realizó la medición del peso de las probetas de los dos tipos de ensayos (En tierra y al ambiente) en intervalos de dos días establecidos mediante una balanza digital, registrando los datos obtenidos para el posterior análisis de la pérdida de masa y cálculo de la biodegradación.	

Muestras	Dia 0	Dia 2	Dia 4
1	2,00	1,93	1,9
	2,00	1,95	1,92
	2,00	1,97	1,94
	2,00	1,95	1,92

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Registro de resultados

Mediante el registro de resultados obtenidos en los diferentes ensayos de biodegradabilidad y tracción realizados al bioplástico natural elaborado a partir de la hoja de tuna andina, fue posible analizar el comportamiento de las 16 combinaciones desarrolladas mediante el diseño experimental DOE-Mezclas. La tabulación de resultados permitió comparar las características físicas, mecánicas, porcentaje de degradación y pérdida de peso de las diferentes combinaciones.

3.1.1. Fichas de ensayos de tracción de cada caso del biopolímero

Desde la TABLA XVII, hasta la TABLA XXXIV, se presentan los resultados correspondientes a los ensayos de tracción realizado a las 16 combinaciones. Los ensayos fueron realizados bajo los parámetros establecidos en la Norma ASRM D638-14, Anexo 3. En las fichas técnicas a continuación se incluyen resultados como el máximo esfuerzo a la tracción, el módulo de elasticidad y el porcentaje de elongación.

TABLA XVII

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 1

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA** **CARRERA DE MECÁNICA**	
FORMULARIO DE OBTENCIÓN DE DATOS		

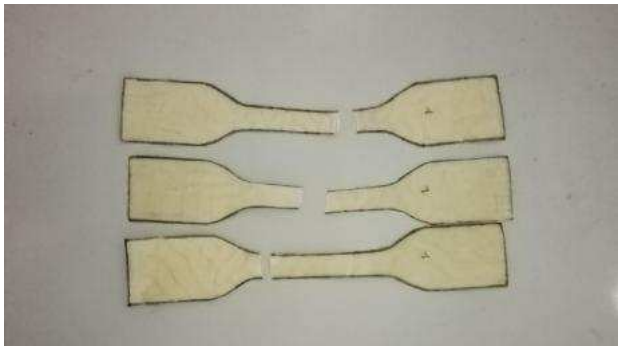
Velocidad	5 mm/min	**Tipo de ensayo**	Tracción
Fecha de informe	01/4/2026	**Número de muestras**	3

Codificación	Combinación 1	**Equipo**	Shimadzu
Realizado por	Germán Flores	**Revisado por**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
PARÁMETROS DE PRUEBA			
Material	Bioplástico	**Norma**	ASTM D638-14
Base	Nopal (Mucílago)	**Tipo de probeta de acuerdo a la norma**	IV
Espesor promedio (mm)	0.5 mm	**Numero de probetas**	3

RESULTADOS

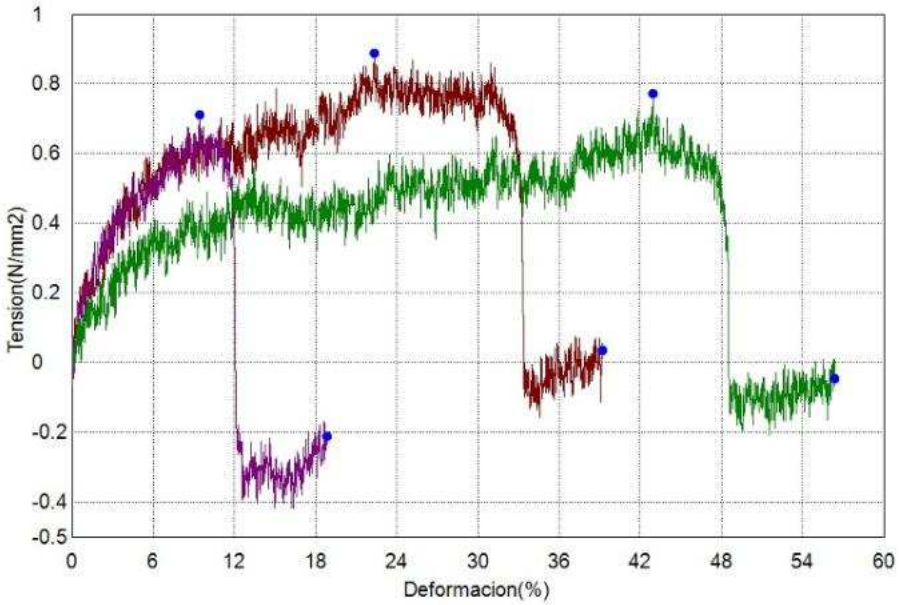
Número de probetas	**Máxima Tensión (MPa)**	**Módulo de elasticidad (MPa)**	**Elongación (%)**
C1-P1	0,89	9,40	23%
C1-P2	0,71	7,07	30%
C1-P3	0,77	5,57	44%
Promedio	0,79	7,35	32%

PROBETAS ENSAYADAS

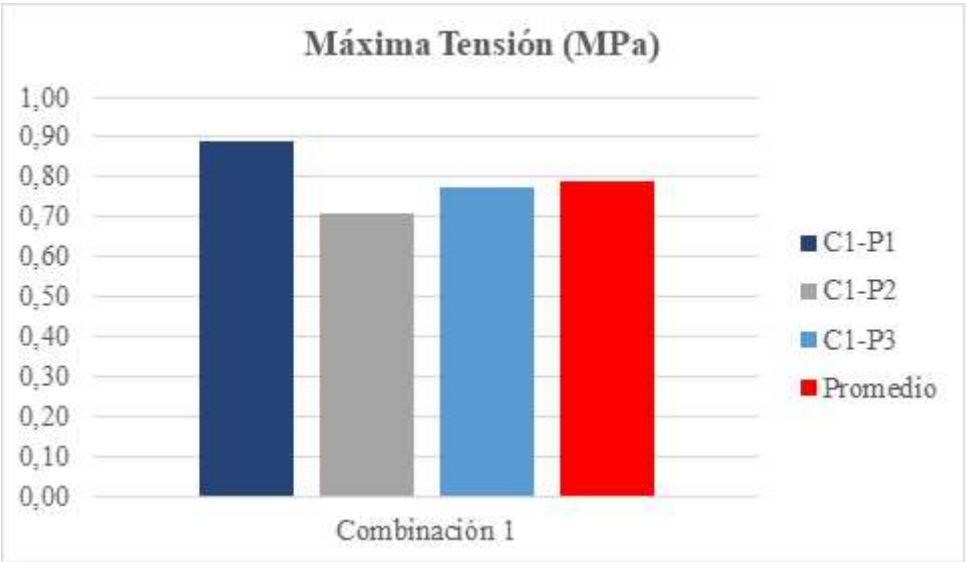


OBSERVACIONES
• Se detectó una variabilidad en la ubicación del corte observando un corte ligeramente inclinado respecto al eje longitudinal.
GRÁFICA

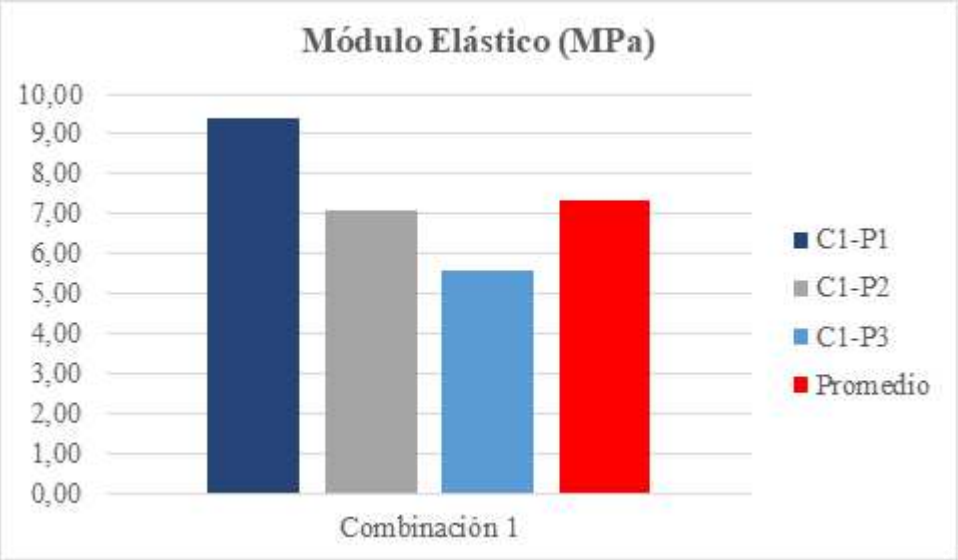
- **Tensión (MPa) vs Deformación (%)**



- **Gráfica de Máxima Tensión (MPa)**



- **Gráfica de Módulo de Elasticidad (MPa)**



APROBACIÓN Y VALIDACIÓN			
Elaborado por:	Germán Flores	**Aprobado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
Revisado por:	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.	**Validado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.

TABLA XVIII

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 2

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA** **CARRERA DE MECÁNICA**	
FORMULARIO DE OBTENCIÓN DE DATOS		

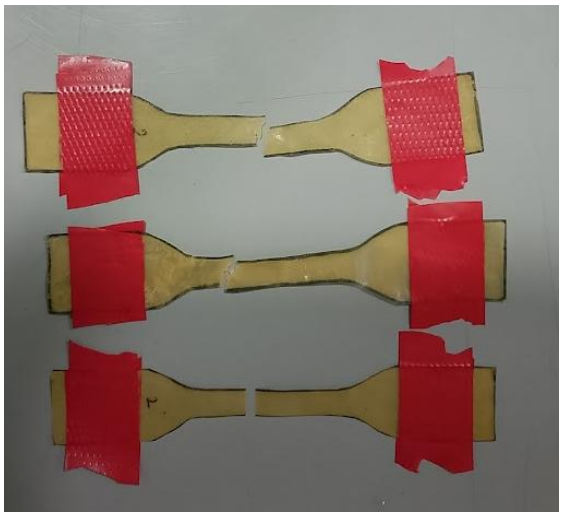
Velocidad	5 mm/min	**Tipo de ensayo**	Tracción
Fecha de informe	01/4/2026	**Número de muestras**	3
Codificación	Combinación 2	**Equipo**	Shimadzu

Realizado por	Germán Flores	**Revisado por**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
PARÁMETROS DE PRUEBA			
Material	Bioplástico	**Norma**	ASTM D638-14
Base	Nopal (Mucílago)	**Tipo de probeta de acuerdo a la norma**	IV
Espesor promedio (mm)	0.5 mm	**Numero de probetas**	3

RESULTADOS

Número de probetas	**Máxima Tensión (MPa)**	**Módulo de elasticidad (MPa)**	**Elongación (%)**
C2-1	0,90	9,78	12%
C2-2	1,03	10,40	23%
C2-3	0,78	7,16	9%
Promedio	0,90	9,11	14%

PROBETAS ENSAYADAS

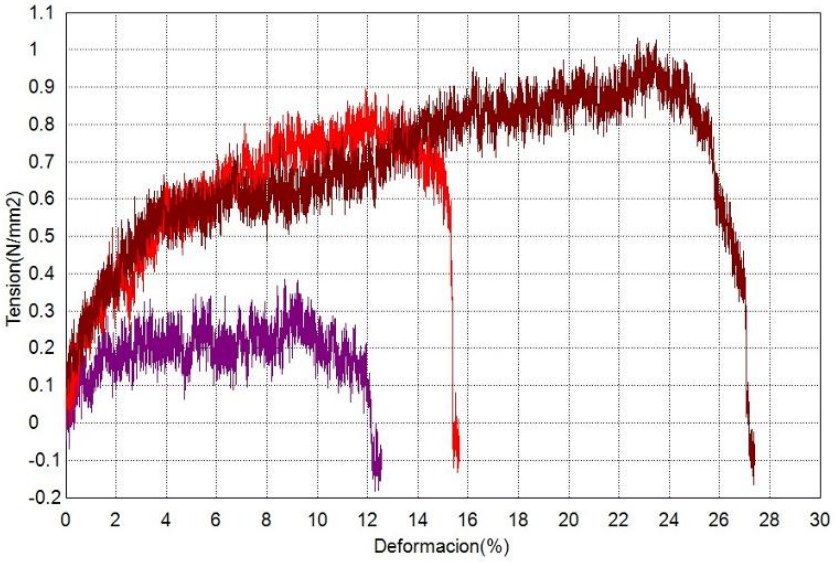


OBSERVACIONES

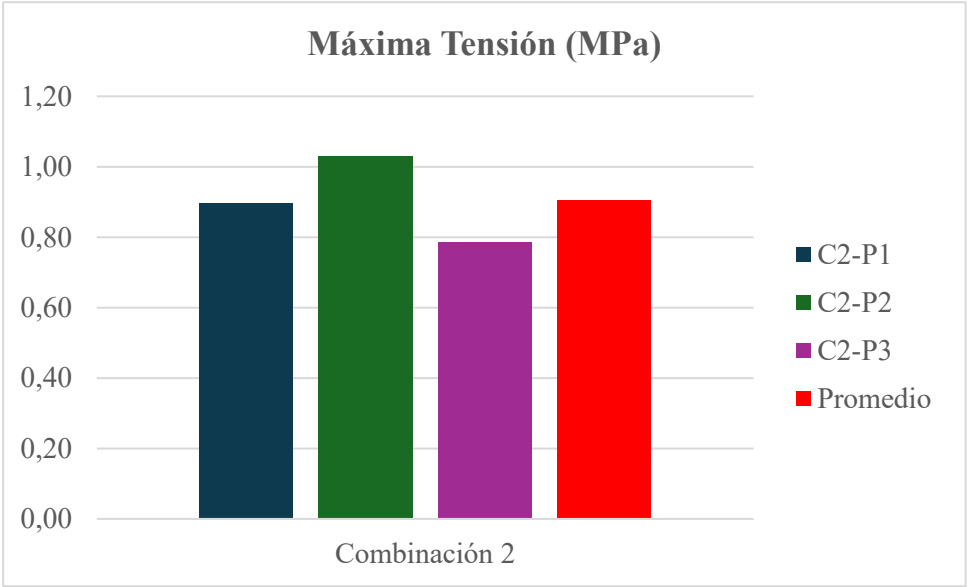
- Se identificaron dos variaciones de fracturas fibrosas con superficie irregular debido a la deformación plástica antes de la fisura.

GRÁFICA

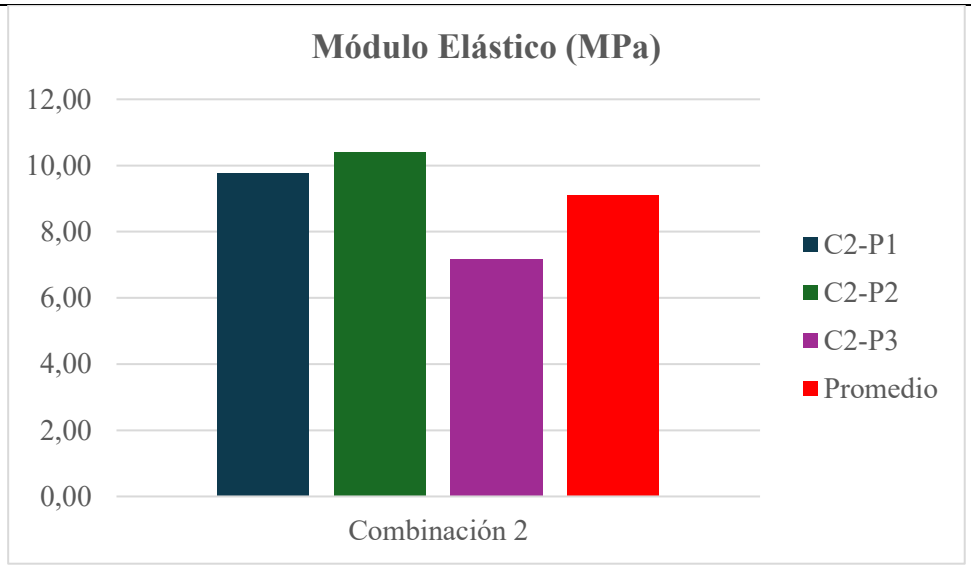
- **Tensión (MPa) vs Deformación (%)**



- **Gráfica de Máxima Tensión (MPa)**



- **Gráfica de Módulo de Elasticidad (MPa)**



APROBACIÓN Y VALIDACIÓN			
Elaborado por:	Germán Flores	**Aprobado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
Revisado por:	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.	**Validado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.

TABLA XIX

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 3

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA** **CARRERA DE MECÁNICA**	
FORMULARIO DE OBTENCIÓN DE DATOS		

Velocidad	5 mm/min	**Tipo de ensayo**	Tracción
Fecha de informe	01/4/2026	**Número de muestras**	3
Codificación	Combinación 3	**Equipo**	Shimadzu
Realizado por	Germán Flores	**Revisado por**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
PARÁMETROS DE PRUEBA			
Material	Bioplástico	**Norma**	ASTM D638-14

Base	Nopal (Mucílago)	**Tipo de probeta de acuerdo a la norma**	IV
Espesor promedio (mm)	0.5 mm	**Numero de probetas**	3
RESULTADOS			
Número de probetas	**Máxima Tensión (MPa)**	**Módulo de elasticidad (MPa)**	**Elongación (%)**
C3-1	0,72	6,29	60%
C3-2	0,52	4,75	77%
C3-3	0,65	7,19	30%
Promedio	0,63	6,08	56%
PROBETAS ENSAYADAS			

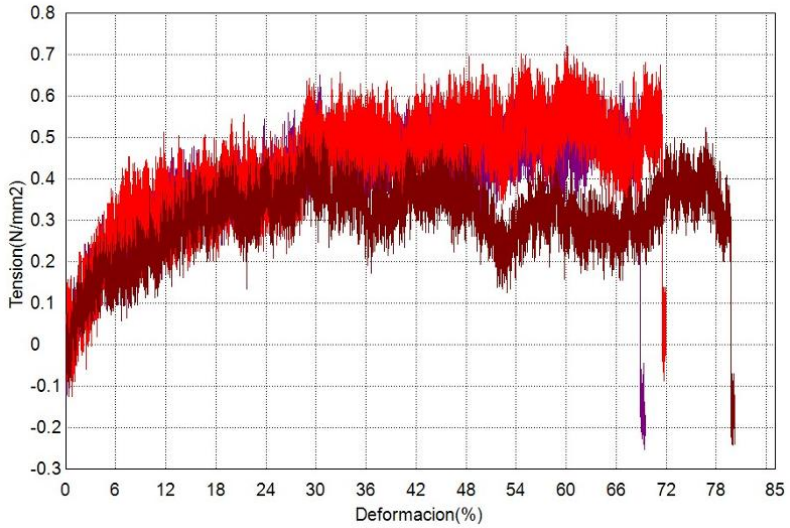


OBSERVACIONES

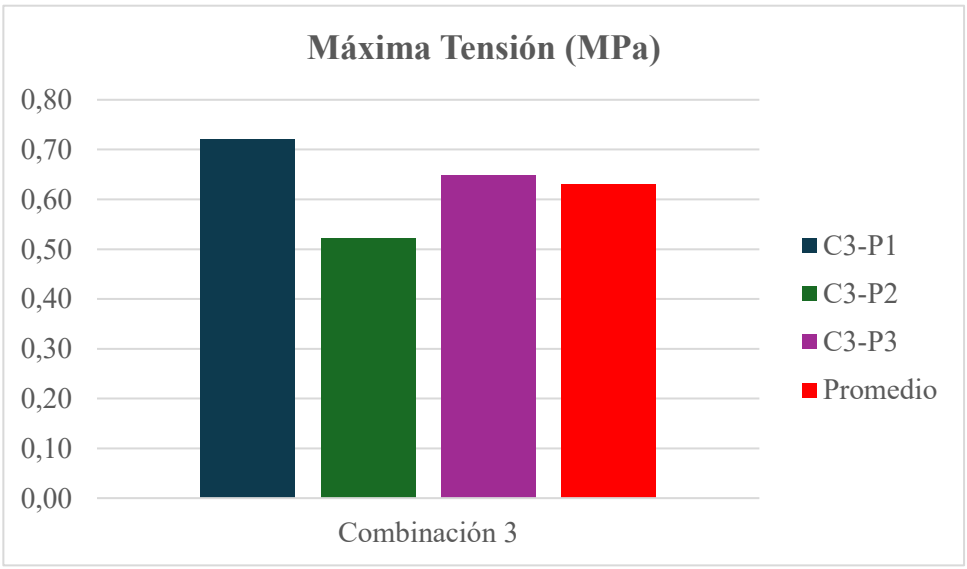
- Se identificó una probeta con alargamiento significativo significando una buena ductilidad.

GRÁFICA

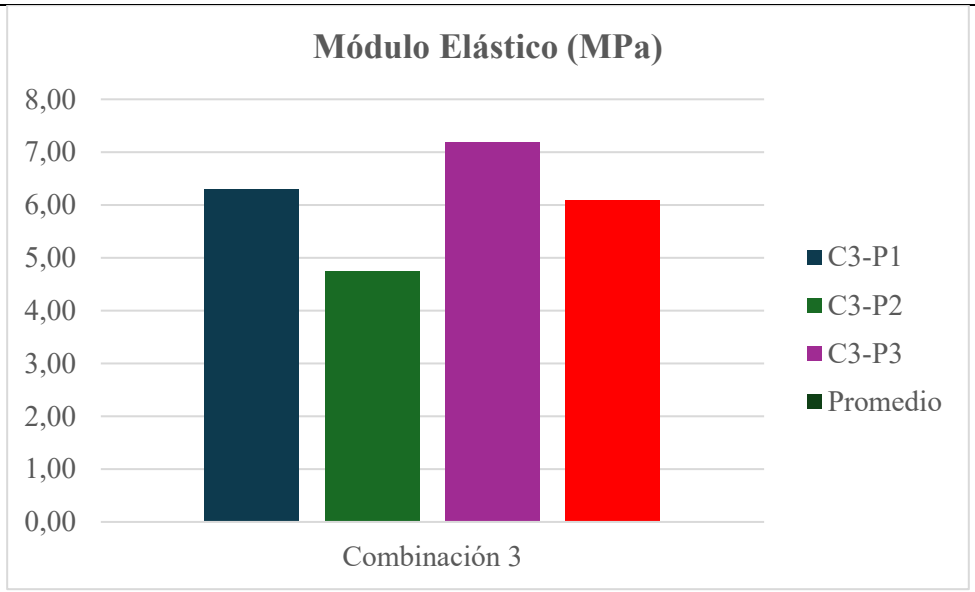
- **Tensión (MPa) vs Deformación (%)**



- **Gráfica de Máxima Tensión (MPa)**



- **Gráfica de Módulo de Elasticidad (MPa)**

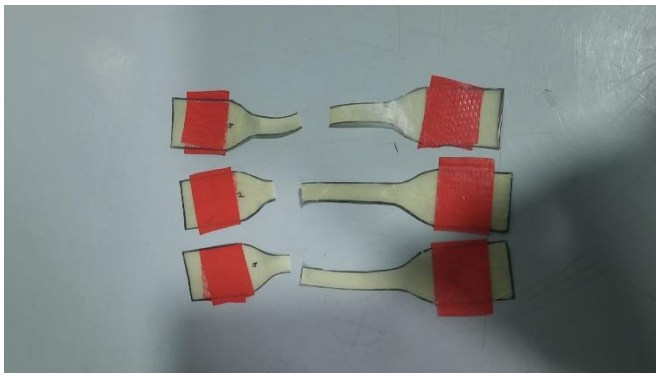


APROBACIÓN Y VALIDACIÓN			
Elaborado por:	Germán Flores	**Aprobado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
Revisado por:	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.	**Validado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.

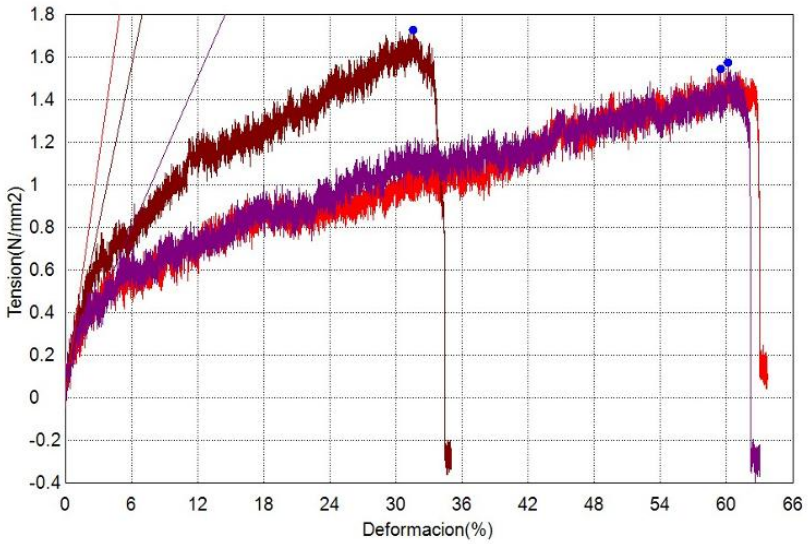
TABLA XX

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 4

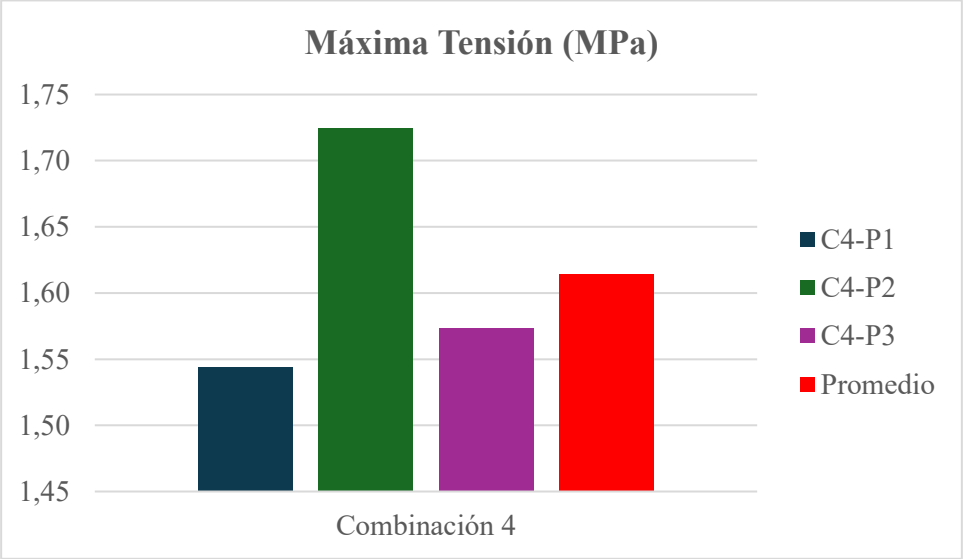
	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA** **CARRERA DE MECÁNICA**	
FORMULARIO DE OBTENCIÓN DE DATOS		
Velocidad	5 mm/min	**Tipo de ensayo**	Tracción
Fecha de informe	01/4/2026	**Número de muestras**	3
Codificación	Combinación 4	**Equipo**	Shimadzu
Realizado por	Germán Flores	**Revisado por**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
PARÁMETROS DE PRUEBA			

Material	Bioplástico	**Norma**	ASTM D638-14
Base	Nopal (Mucílago)	**Tipo de probeta de acuerdo a la norma**	IV
Espesor promedio (mm)	0.5 mm	**Numero de probetas**	3
RESULTADOS			
Número de probetas	**Máxima Tensión (MPa)**	**Módulo de elasticidad (MPa)**	**Elongación (%)**
C4-1	1,54	26,18	59%
C4-2	1,72	25,04	32%
C4-3	1,57	24,86	60%
Promedio	1,61	25,36	50%
PROBETAS ENSAYADAS			
			
OBSERVACIONES			
• En determinadas probetas, la rotura ocurrió sin presencia de cuello indicando baja ductilidad.			
GRÁFICA			

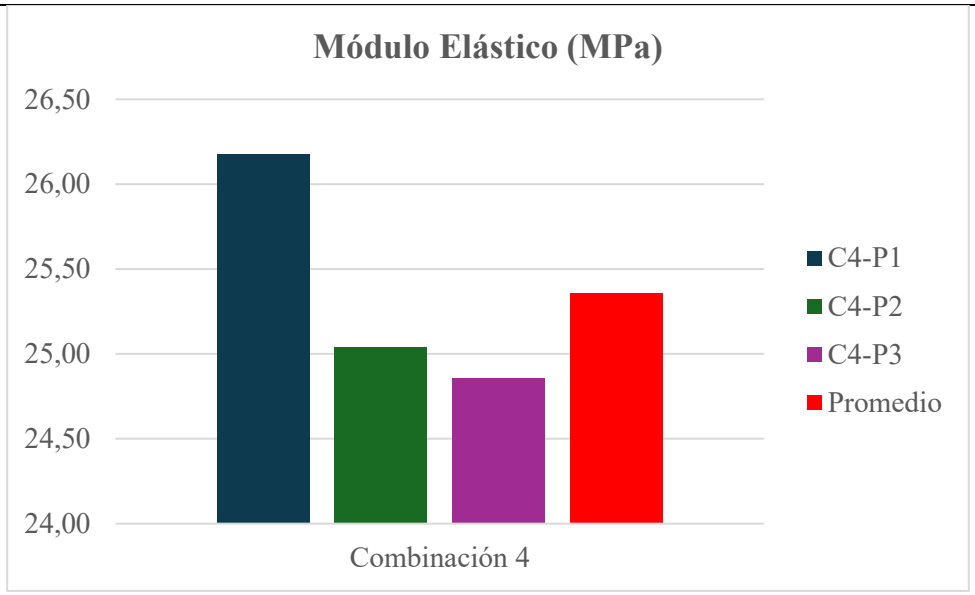
- **Tensión (MPa) vs Deformación (%)**



- **Gráfica de Máxima Tensión (MPa)**



- **Gráfica de Módulo de Elasticidad (MPa)**



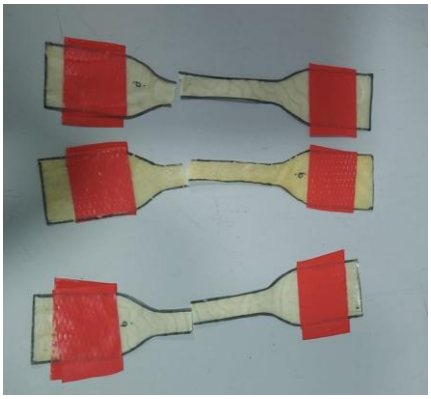
APROBACIÓN Y VALIDACIÓN			
Elaborado por:	Germán Flores	**Aprobado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
Revisado por:	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.	**Validado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.

TABLA XXI

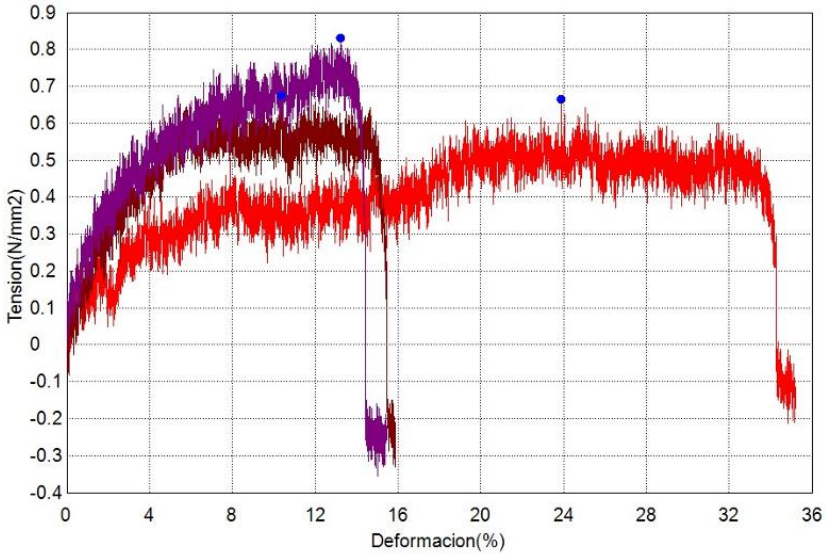
FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 5

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA** **CARRERA DE MECÁNICA**	
FORMULARIO DE OBTENCIÓN DE DATOS		

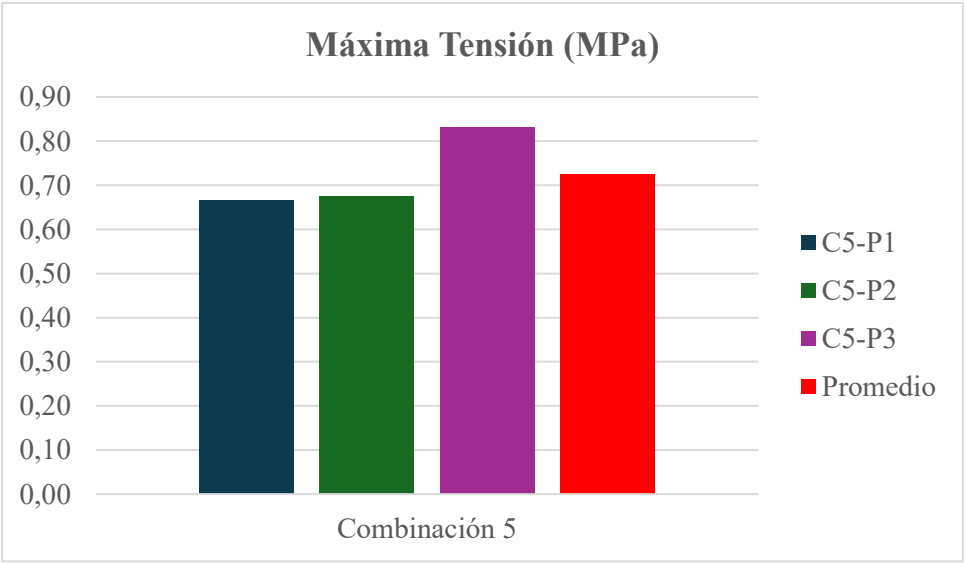
Velocidad	5 mm/min	**Tipo de ensayo**	Tracción
Fecha de informe	01/4/2026	**Número de muestras**	3
Codificación	Combinación 5	**Equipo**	Shimadzu
Realizado por	Germán Flores	**Revisado por**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
PARÁMETROS DE PRUEBA			
Material	Bioplástico	**Norma**	ASTM D638-14

Base	Nopal (Mucílago)	**Tipo de probeta de acuerdo a la norma**	IV
Espesor promedio (mm)	0.5 mm	**Numero de probetas**	3
RESULTADOS			
Número de probetas	**Máxima Tensión (MPa)**	**Módulo de elasticidad (MPa)**	**Elongación (%)**
C5-1	0,66	5,55	24%
C5-2	0,68	9,56	10%
C5-3	0,83	7,37	13%
Promedio	0,72	7,49	16%
PROBETAS ENSAYADAS			
			
OBSERVACIONES			
• Las probetas presentaron un corte sin cuello reflejando la baja ductilidad.			
GRÁFICA			

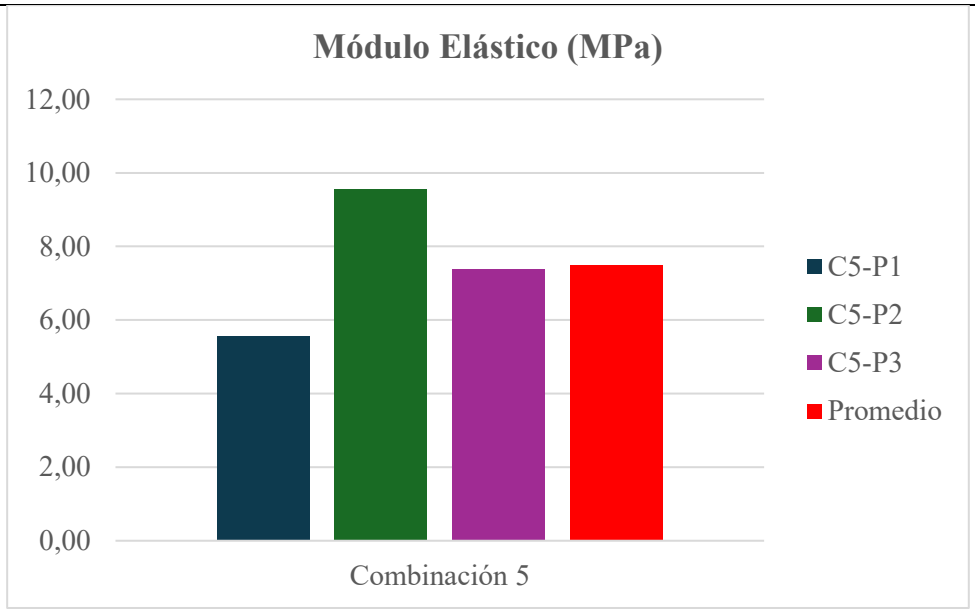
- **Tensión (MPa) vs Deformación (%)**



- **Gráfica de Máxima Tensión (MPa)**



- **Gráfica de Módulo de Elasticidad (MPa)**



APROBACIÓN Y VALIDACIÓN			
Elaborado por:	Germán Flores	**Aprobado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
Revisado por:	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.	**Validado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.

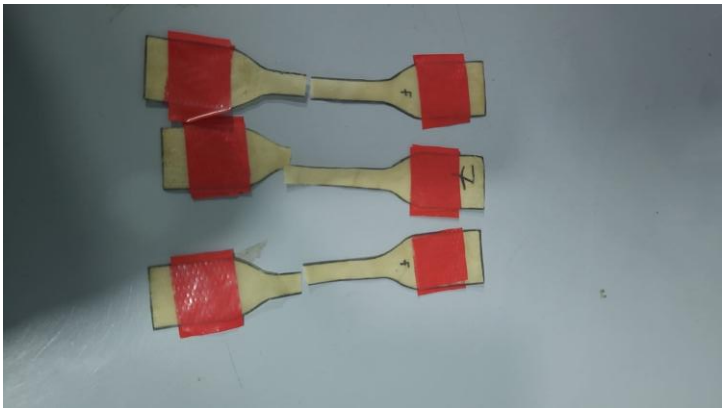
TABLA XXII

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 6

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA	
FORMULARIO DE OBTENCIÓN DE DATOS		

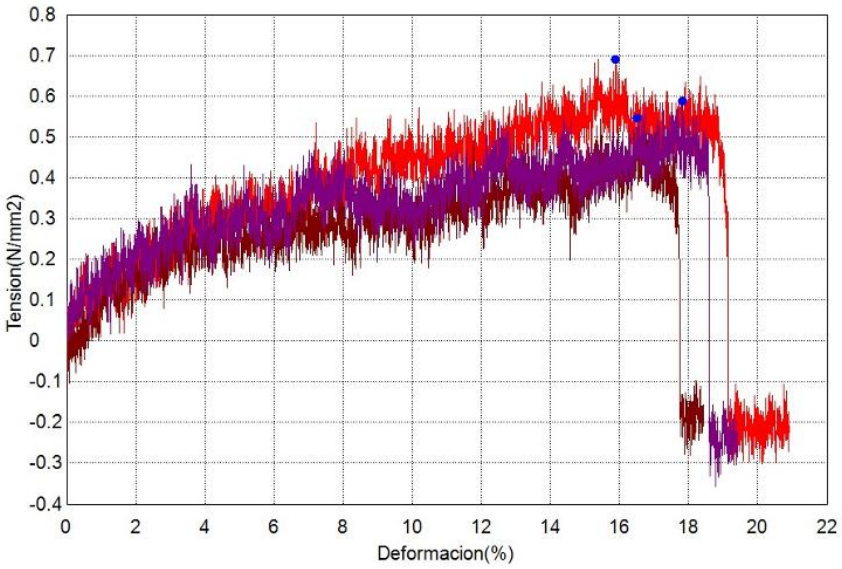
Velocidad	5 mm/min	**Tipo de ensayo**	Tracción
Fecha de informe	01/4/2026	**Número de muestras**	3
Codificación	Combinación 6	**Equipo**	Shimadzu
Realizado por	Germán Flores	**Revisado por**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
PARÁMETROS DE PRUEBA			

Material	Bioplástico	**Norma**	ASTM D638-14
Base	Nopal (Mucílago)	**Tipo de probeta de acuerdo a la norma**	IV
Espesor promedio (mm)	0.5 mm	**Numero de probetas**	3
RESULTADOS			
Número de probetas	**Máxima Tensión (MPa)**	**Módulo de elasticidad (MPa)**	**Elongación (%)**
C6-1	0,69	7,27	16%
C6-2	0,55	5,07	17%
C6-3	0,59	3,34	18%
Promedio	0,61	5,23	17%
PROBETAS ENSAYADAS			

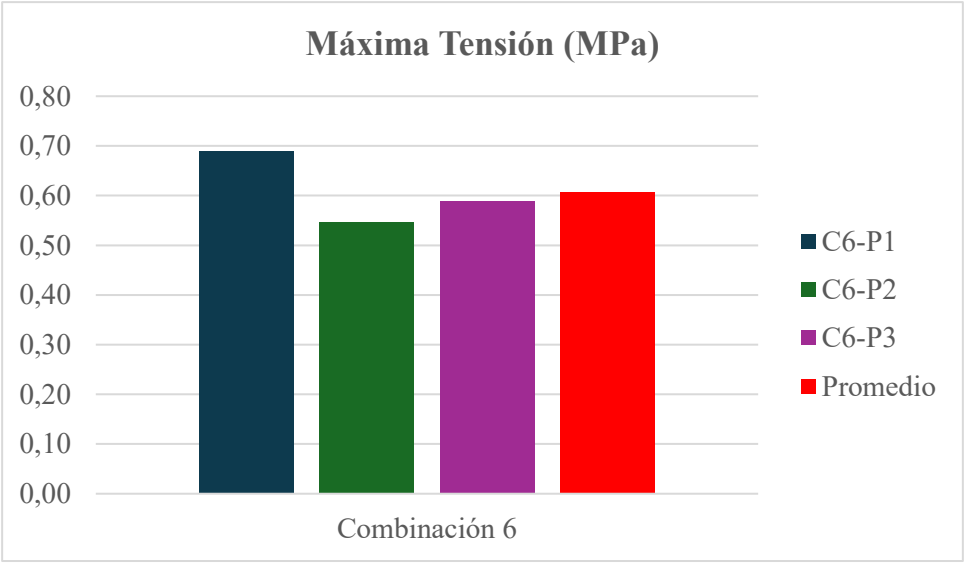


OBSERVACIONES
• Se detecto roturas con superficies fibrosas e irregular.
GRÁFICA

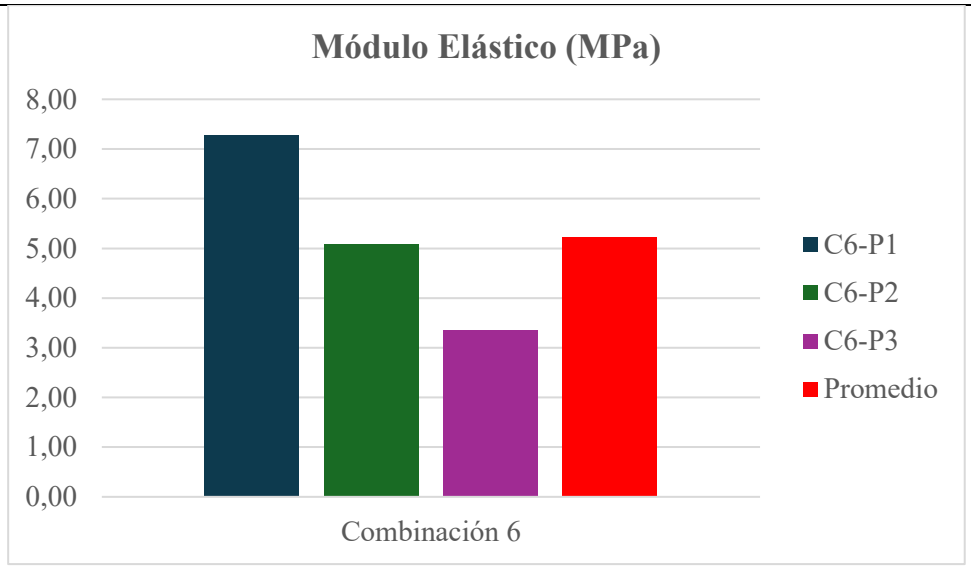
- **Tensión (MPa) vs Deformación (%)**



- **Gráfica de Máxima Tensión (MPa)**



- **Gráfica de Módulo de Elasticidad (MPa)**



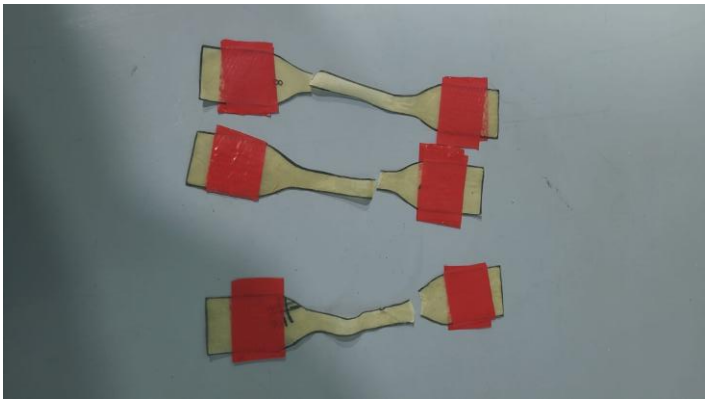
APROBACIÓN Y VALIDACIÓN			
Elaborado por:	Germán Flores	**Aprobado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
Revisado por:	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.	**Validado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.

TABLA XXIII

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 7

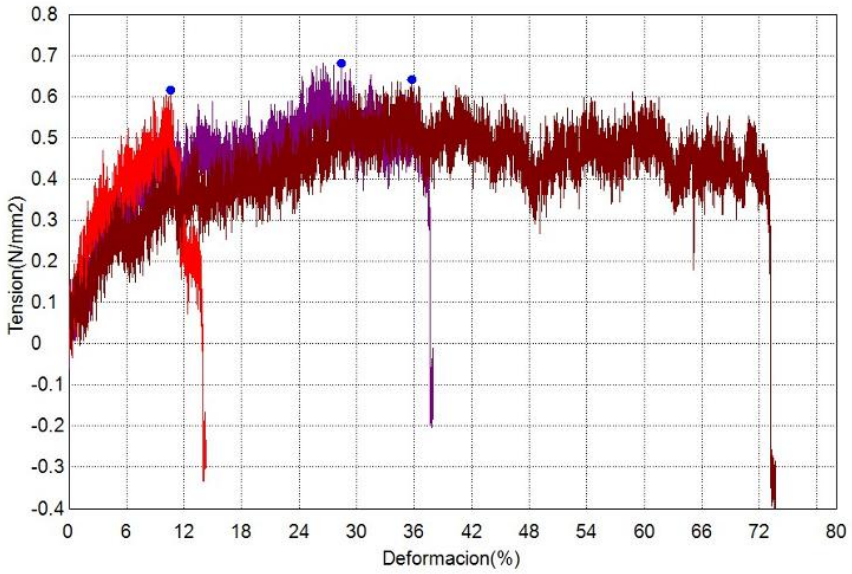
	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA** **CARRERA DE MECÁNICA**	
FORMULARIO DE OBTENCIÓN DE DATOS		
Velocidad	5 mm/min	**Tipo de ensayo**	Tracción
Fecha de informe	01/4/2026	**Número de muestras**	3
Codificación	Combinación 7	**Equipo**	Shimadzu
Realizado por	Germán Flores	**Revisado por**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
PARÁMETROS DE PRUEBA			
Material	Bioplástico	**Norma**	ASTM D638-14

Base	Nopal (Mucílago)	**Tipo de probeta de acuerdo a la norma**	IV
Espesor promedio (mm)	0.5 mm	**Numero de probetas**	3
RESULTADOS			
Número de probetas	**Máxima Tensión (MPa)**	**Módulo de elasticidad (MPa)**	**Elongación (%)**
C7-1	0,62	9,60	11%
C7-2	0,64	5,35	36%
C7-3	0,68	5,79	28%
Promedio	0,65	6,91	25%
PROBETAS ENSAYADAS			

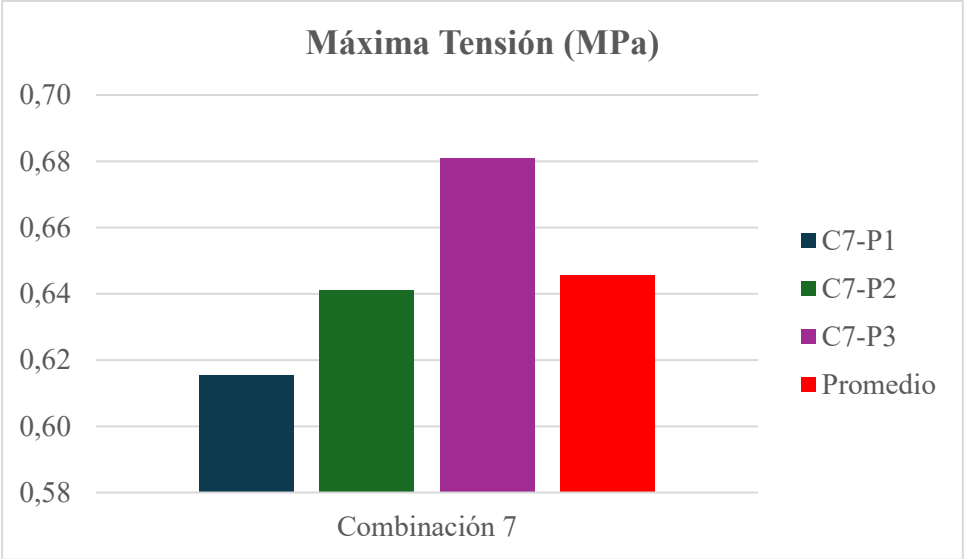


OBSERVACIONES
• Se observaron fracturas un poco declinadas con respecto al eje longitudinal y alargamiento en el cuello señalando un comportamiento dúctil.
GRÁFICA

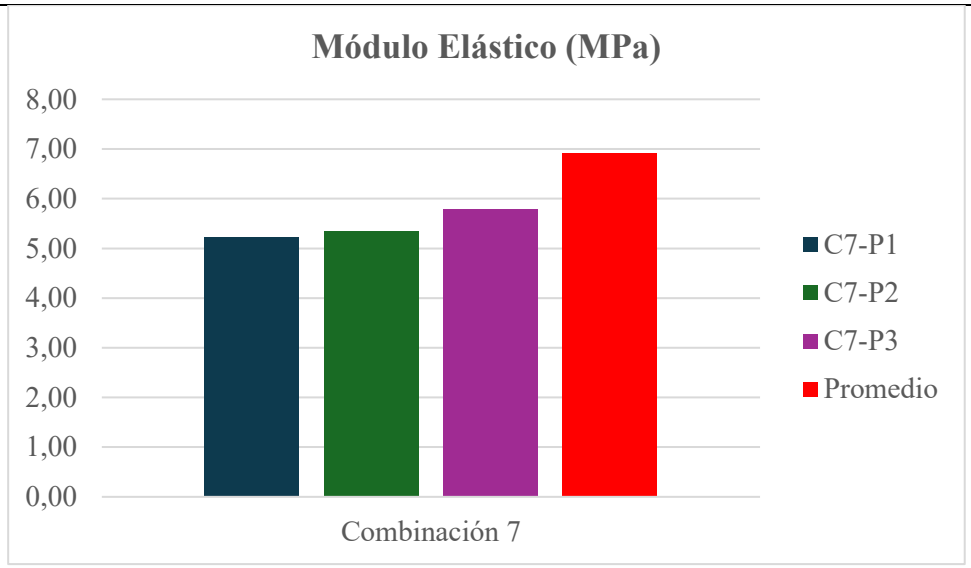
- **Tensión (MPa) vs Deformación (%)**



- **Gráfica de Máxima Tensión (MPa)**



- **Gráfica de Módulo de Elasticidad (MPa)**



APROBACIÓN Y VALIDACIÓN			
Elaborado por:	Germán Flores	**Aprobado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
Revisado por:	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.	**Validado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.

TABLA XXIV

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 8

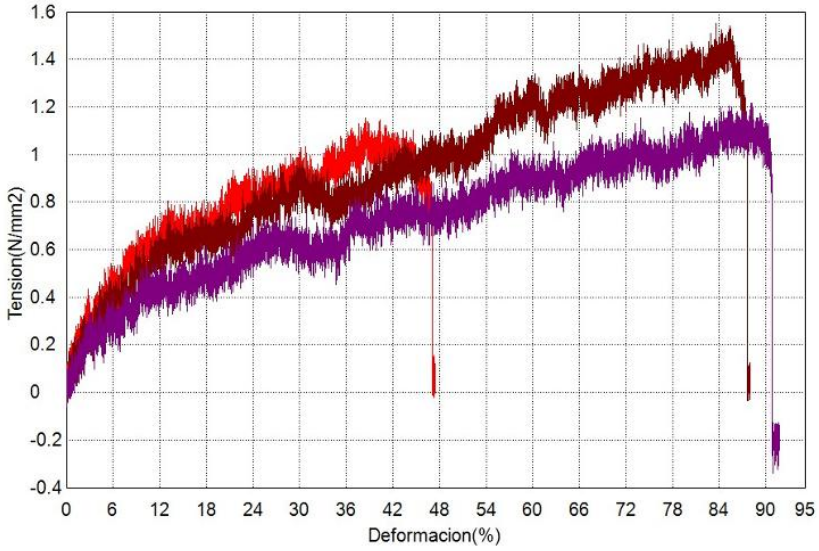
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA** **CARRERA DE MECÁNICA**			
FORMULARIO DE OBTENCIÓN DE DATOS			
Velocidad	5 mm/min	**Tipo de ensayo**	Tracción
Fecha de informe	01/4/2026	**Número de muestras**	3
Codificación	Combinación 8	**Equipo**	Shimadzu
Realizado por	Germán Flores	**Revisado por**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
PARÁMETROS DE PRUEBA			
Material	Bioplástico	**Norma**	ASTM D638-14

Base	Nopal (Mucílago)	**Tipo de probeta de acuerdo a la norma**	IV
Espesor promedio (mm)	0.5 mm	**Numero de probetas**	3
RESULTADOS			
Número de probetas	**Máxima Tensión (MPa)**	**Módulo de elasticidad (MPa)**	**Elongación (%)**
C8-1	1,15	8,15	38%
C8-2	1,55	11,61	84%
C8-3	1,21	7,12	88%
Promedio	1,31	8,96	70%
PROBETAS ENSAYADAS			

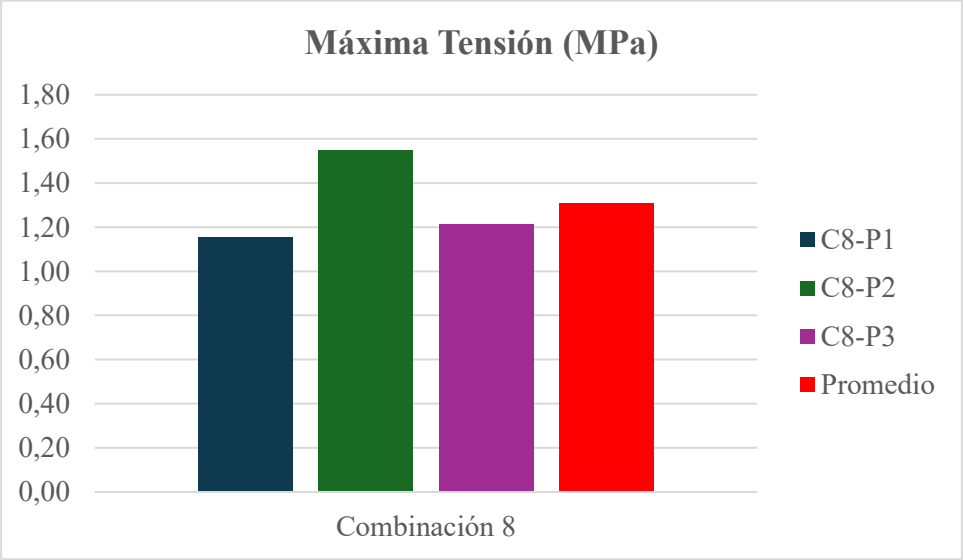


OBSERVACIONES
• Se observó la correcta preparación y uniformidad de las probetas que influyó directamente en el tipo de rotura.
GRÁFICA

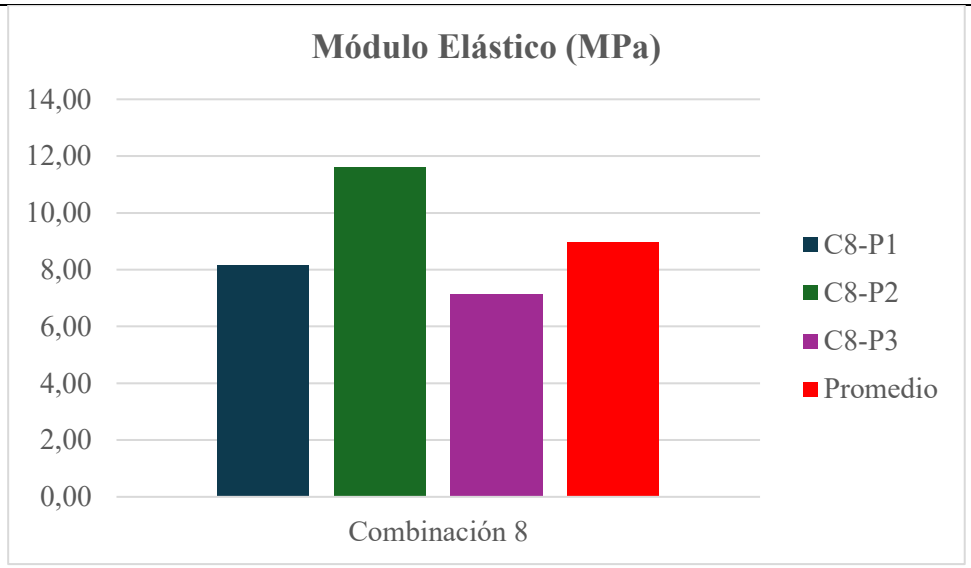
- **Tensión (MPa) vs Deformación (%)**



- **Gráfica de Máxima Tensión (MPa)**



- **Gráfica de Módulo de Elasticidad (MPa)**

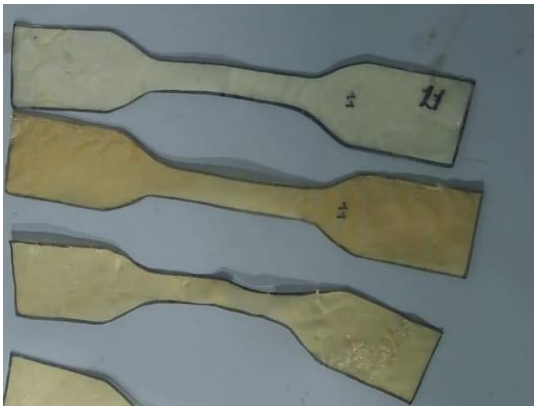


APROBACIÓN Y VALIDACIÓN			
Elaborado por:	Germán Flores	**Aprobado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
Revisado por:	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.	**Validado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.

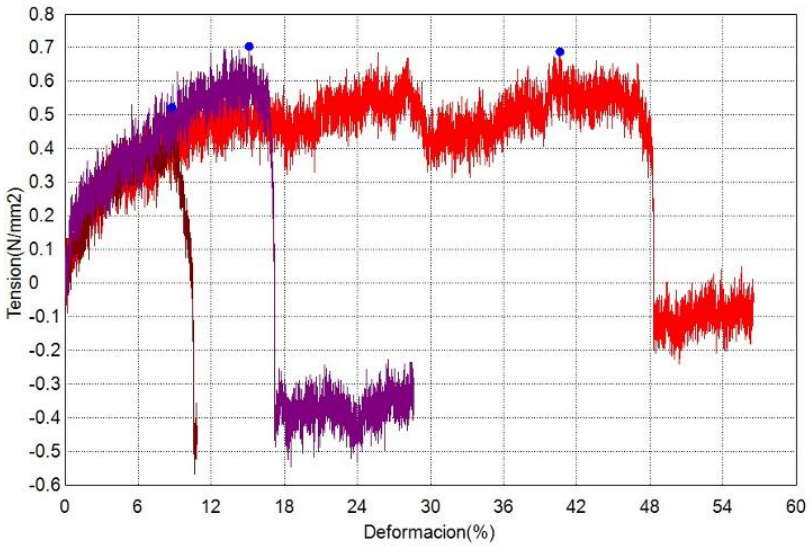
TABLA XV

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 9

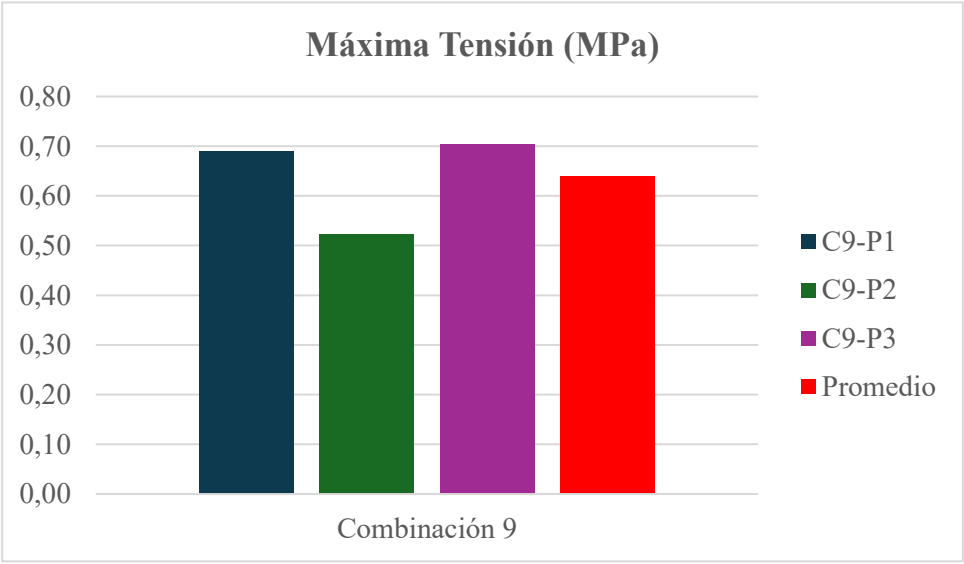
	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA** **CARRERA DE MECÁNICA**	
FORMULARIO DE OBTENCIÓN DE DATOS		
Velocidad	5 mm/min	**Tipo de ensayo**	Tracción
Fecha de informe	01/4/2026	**Número de muestras**	3
Codificación	Combinación 9	**Equipo**	Shimadzu
Realizado por	Germán Flores	**Revisado por**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
PARÁMETROS DE PRUEBA			
Material	Bioplástico	**Norma**	ASTM D638-14

Base	Nopal (Mucílago)	**Tipo de probeta de acuerdo a la norma**	IV
Espesor promedio (mm)	0.5 mm	**Numero de probetas**	3
RESULTADOS			
Número de probetas	**Máxima Tensión (MPa)**	**Módulo de elasticidad (MPa)**	**Elongación (%)**
C9-1	0,69	6,62	41%
C9-2	0,52	8,68	29%
C9-3	0,70	12,28	15%
Promedio	0,64	9,19	28%
PROBETAS ENSAYADAS			
			
OBSERVACIONES			
• Se observó algunas probetas con defectos (superficie irregular) en su fabricación.			
GRÁFICA			

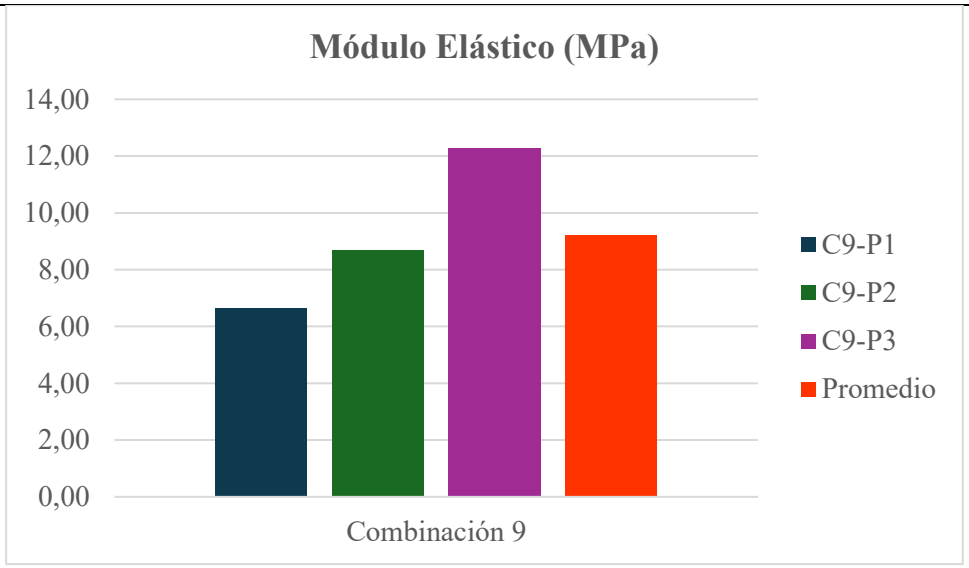
- **Tensión (MPa) vs Deformación (%)**



- **Gráfica de Máxima Tensión (MPa)**



- **Gráfica de Módulo de Elasticidad (MPa)**

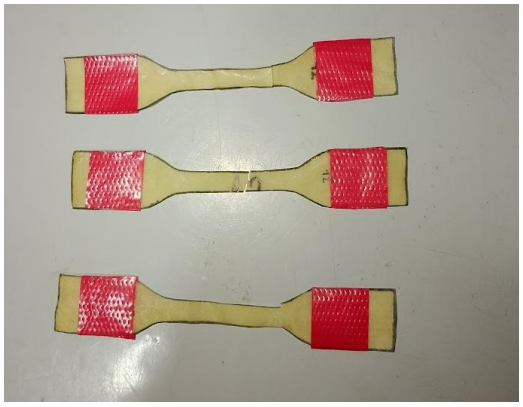


APROBACIÓN Y VALIDACIÓN			
Elaborado por:	Germán Flores	**Aprobado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
Revisado por:	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.	**Validado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.

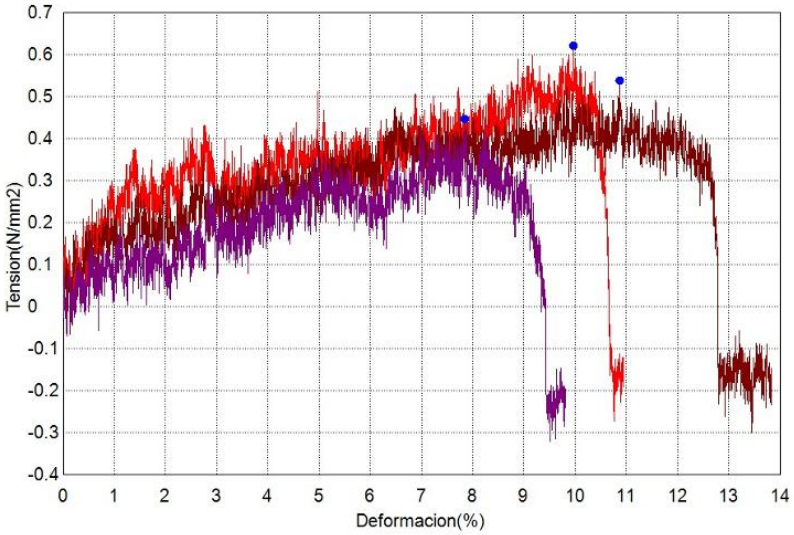
TABLA XXVI

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 10

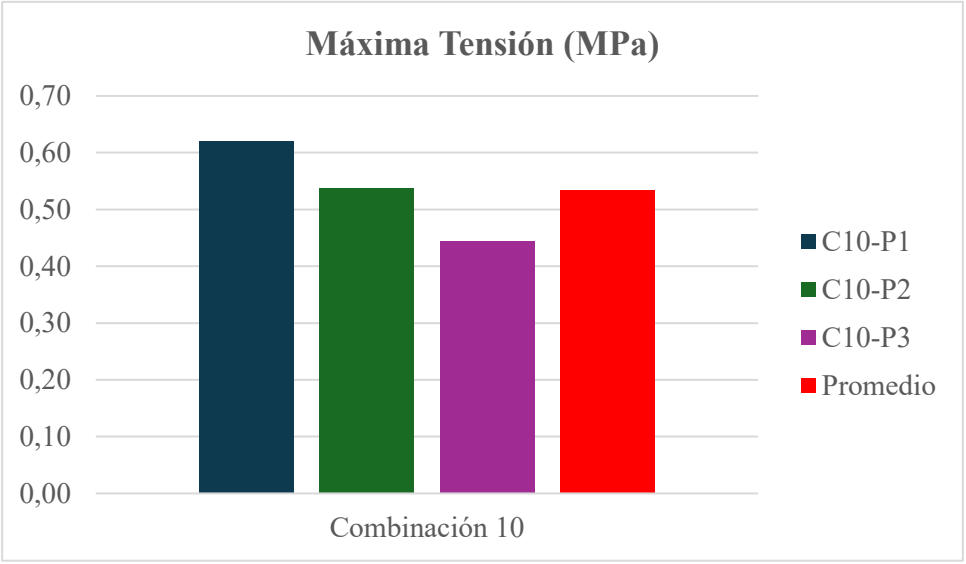
	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA** **CARRERA DE MECÁNICA**	
FORMULARIO DE OBTENCIÓN DE DATOS		
Velocidad	5 mm/min	**Tipo de ensayo**	Tracción
Fecha de informe	01/4/2026	**Número de muestras**	3
Codificación	Combinación10	**Equipo**	Shimadzu
Realizado por	Germán Flores	**Revisado por**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
PARÁMETROS DE PRUEBA			
Material	Bioplástico	**Norma**	ASTM D638-14

Base	Nopal (Mucílago)	**Tipo de probeta de acuerdo a la norma**	IV
Espesor promedio (mm)	0.5 mm	**Numero de probetas**	3
RESULTADOS			
Número de probetas	**Máxima Tensión (MPa)**	**Módulo de elasticidad (MPa)**	**Elongación (%)**
C10-1	0,62	7,47	10%
C10-2	0,54	5,63	11%
C10-3	0,45	4,42	8%
Promedio	0,53	5,84	10%
PROBETAS ENSAYADAS			
			
OBSERVACIONES			
• Se observan roturas limpias sin superficies fibrosas.			
GRÁFICA			

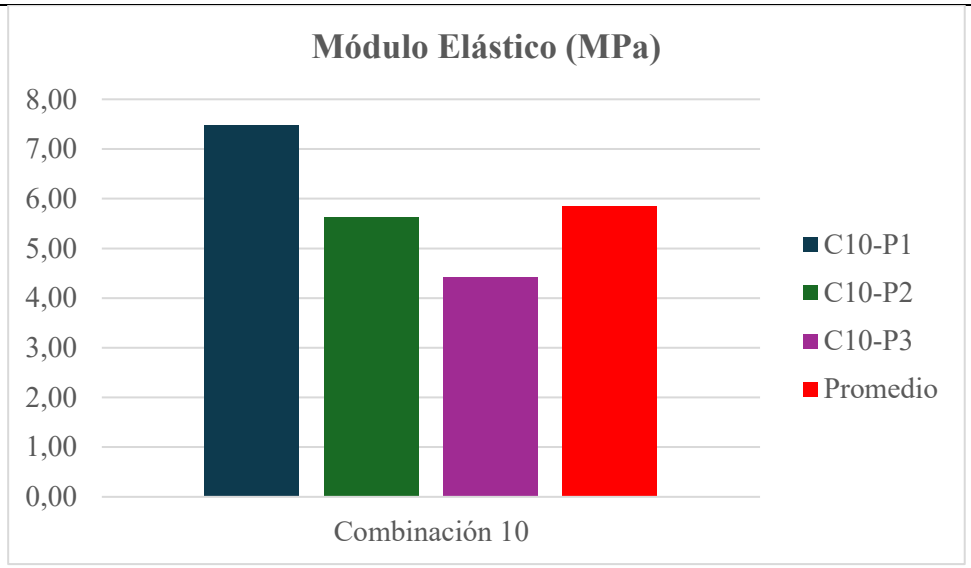
- **Tensión (MPa) vs Deformación (%)**



- **Gráfica de Máxima Tensión (MPa)**



- **Gráfica de Módulo de Elasticidad (MPa)**



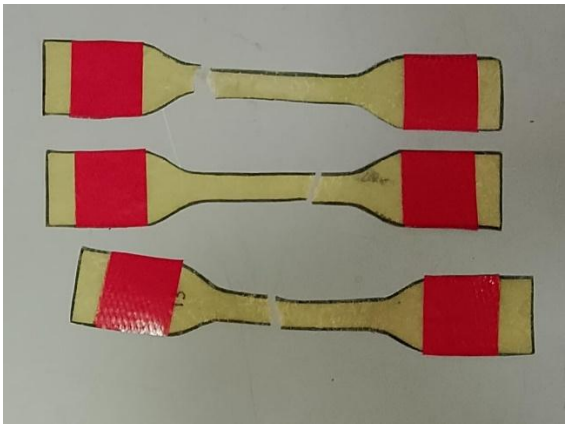
APROBACIÓN Y VALIDACIÓN			
Elaborado por:	Germán Flores	**Aprobado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
Revisado por:	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.	**Validado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.

TABLA XXVII

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 11

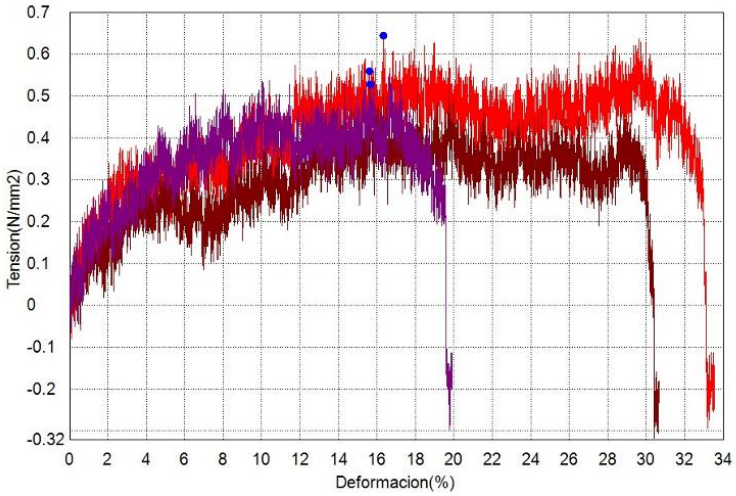
	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA** **CARRERA DE MECÁNICA**	
FORMULARIO DE OBTENCIÓN DE DATOS		
Velocidad	5 mm/min	**Tipo de ensayo**	Tracción
Fecha de informe	01/4/2026	**Número de muestras**	3
Codificación	Combinación11	**Equipo**	Shimadzu
Realizado por	Germán Flores	**Revisado por**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
PARÁMETROS DE PRUEBA			
Material	Bioplástico	**Norma**	ASTM D638-14

Base	Nopal (Mucílago)	**Tipo de probeta de acuerdo a la norma**	IV
Espesor promedio (mm)	0.5 mm	**Numero de probetas**	3
RESULTADOS			
Número de probetas	**Máxima Tensión (MPa)**	**Módulo de elasticidad (MPa)**	**Elongación (%)**
C11-1	0,64	8,93	16%
C11-2	0,53	5,06	16%
C11-3	0,56	5,96	16%
Promedio	0,58	6,65	16%
PROBETAS ENSAYADAS			

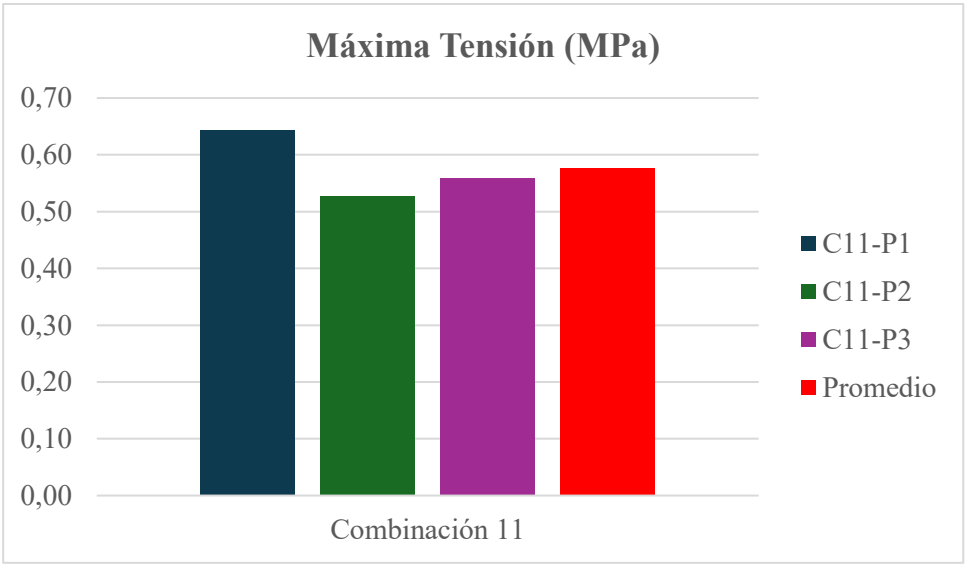


OBSERVACIONES
• Se observó múltiples grietas a lo largo del cuello de las probetas.
GRÁFICA

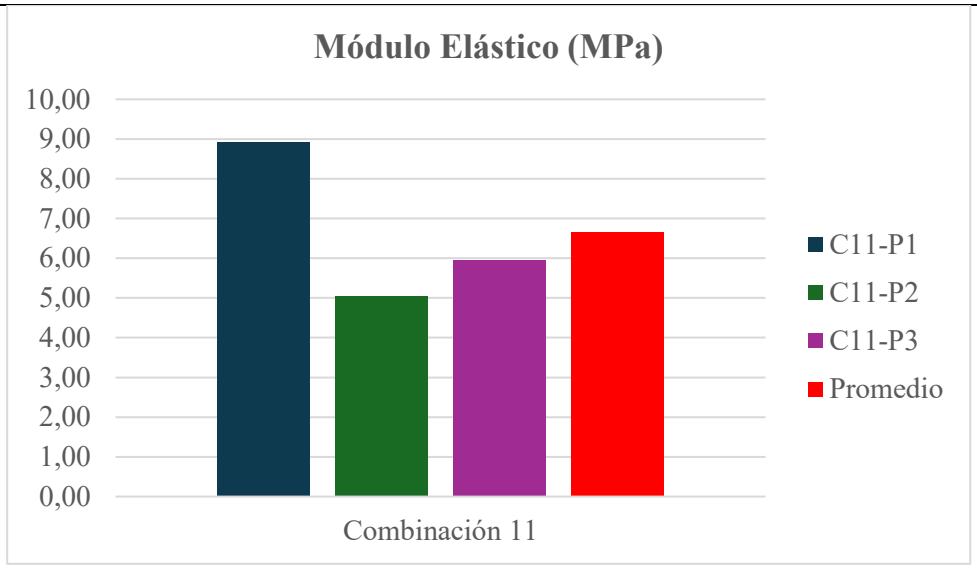
- **Tensión (MPa) vs Deformación (%)**



- **Gráfica de Máxima Tensión (MPa)**



- **Gráfica de Módulo de Elasticidad (MPa)**

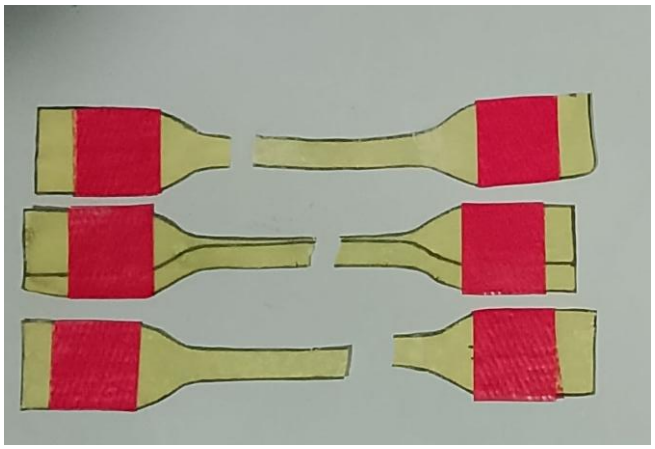


APROBACIÓN Y VALIDACIÓN			
Elaborado por:	Germán Flores	**Aprobado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
Revisado por:	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.	**Validado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.

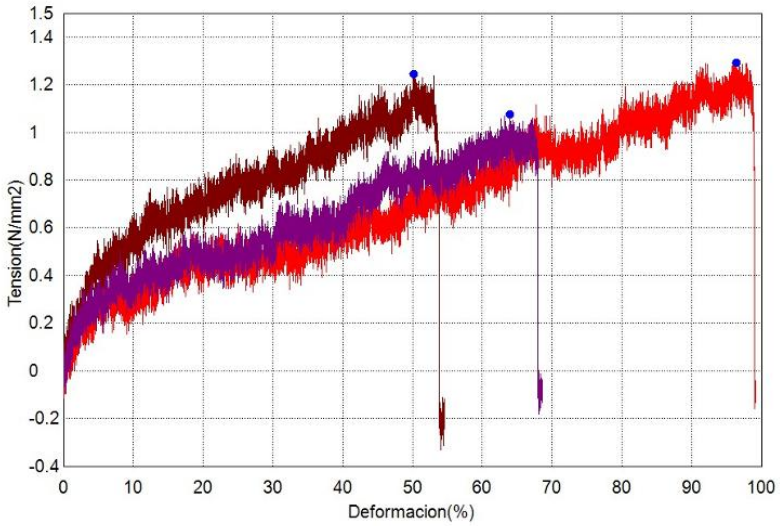
TABLA XVIII

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 12

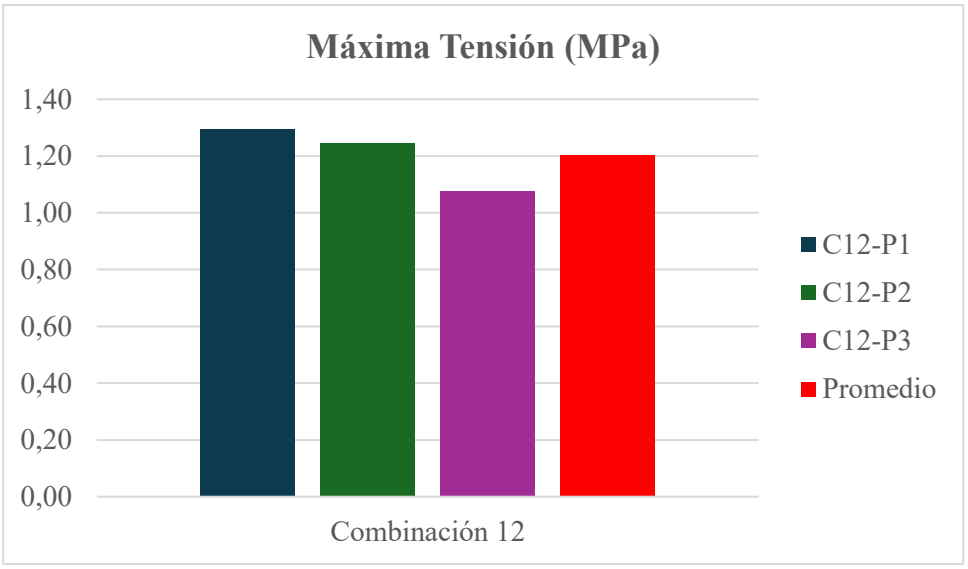
	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA** **CARRERA DE MECÁNICA**	
FORMULARIO DE OBTENCIÓN DE DATOS		
Velocidad	5 mm/min	**Tipo de ensayo**	Tracción
Fecha de informe	01/4/2026	**Número de muestras**	3
Codificación	Combinación12	**Equipo**	Shimadzu
Realizado por	Germán Flores	**Revisado por**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
PARÁMETROS DE PRUEBA			
Material	Bioplástico	**Norma**	ASTM D638-14

Base	Nopal (Mucílago)	**Tipo de probeta de acuerdo a la norma**	IV
Espesor promedio (mm)	0.5 mm	**Numero de probetas**	3
RESULTADOS			
Número de probetas	**Máxima Tensión (MPa)**	**Módulo de elasticidad (MPa)**	**Elongación (%)**
C12-1	1,29	4,70	96%
C12-2	1,25	8,22	50%
C12-3	1,08	7,54	64%
Promedio	1,20	6,82	70%
PROBETAS ENSAYADAS			
			
OBSERVACIONES			
• En algunos casos se observan roturas múltiples pequeñas.			
GRÁFICA			

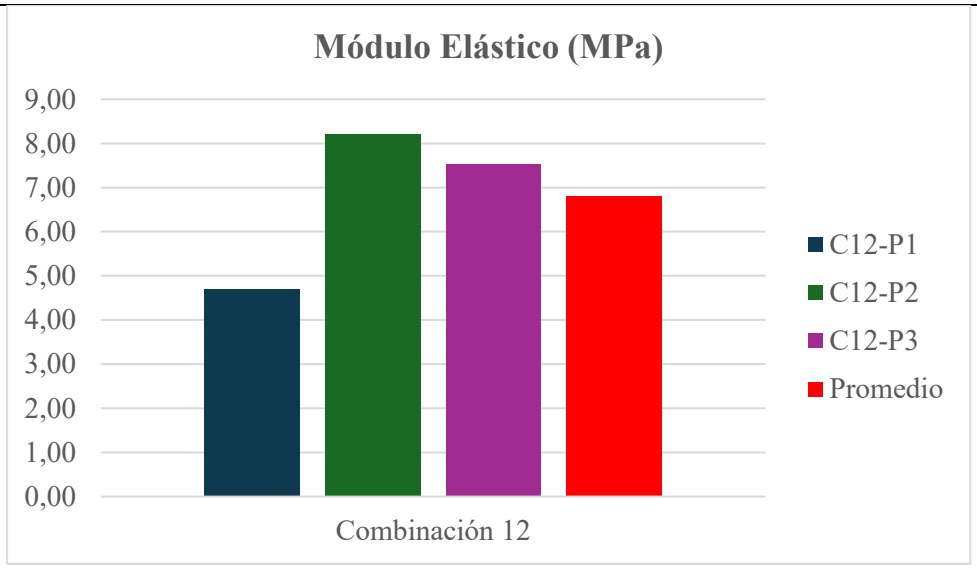
- **Tensión (MPa) vs Deformación (%)**



- **Gráfica de Máxima Tensión (MPa)**



- **Gráfica de Módulo de Elasticidad (MPa)**



APROBACIÓN Y VALIDACIÓN			
Elaborado por:	Germán Flores	**Aprobado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
Revisado por:	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.	**Validado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.

TABLA XXIX

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 13

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA** **CARRERA DE MECÁNICA**	
FORMULARIO DE OBTENCIÓN DE DATOS		
Velocidad	5 mm/min	**Tipo de ensayo**	Tracción
Fecha de informe	01/4/2026	**Número de muestras**	3
Codificación	Combinación13	**Equipo**	Shimadzu
Realizado por	Germán Flores	**Revisado por**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
PARÁMETROS DE PRUEBA			
Material	Bioplástico	**Norma**	ASTM D638-14

Base	Nopal (Mucílago)	**Tipo de probeta de acuerdo a la norma**	IV
Espesor promedio (mm)	0.5 mm	**Numero de probetas**	3
RESULTADOS			
Número de probetas	**Máxima Tensión (MPa)**	**Módulo de elasticidad (MPa)**	**Elongación (%)**
C13-1	0,98	20,40	7%
C13-2	0,72	17,55	7%
C13-3	0,66	19,26	29%
Promedio	0,79	19,07	14%
PROBETAS ENSAYADAS			

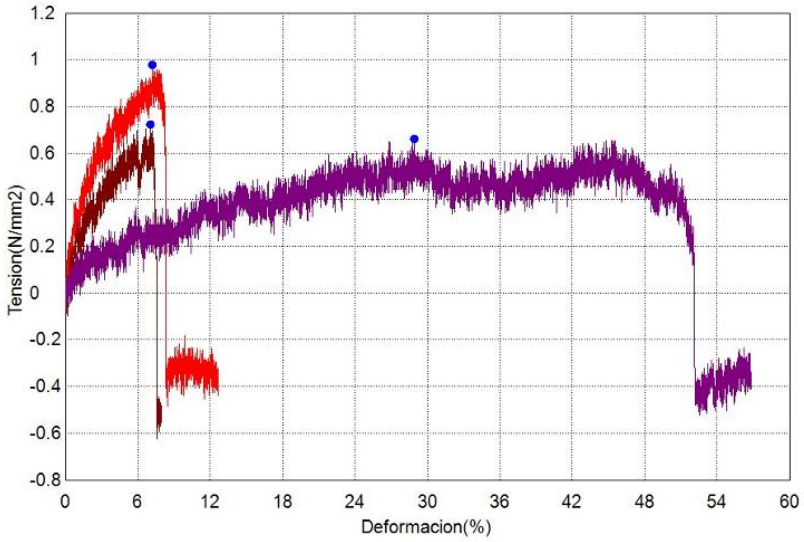


OBSERVACIONES

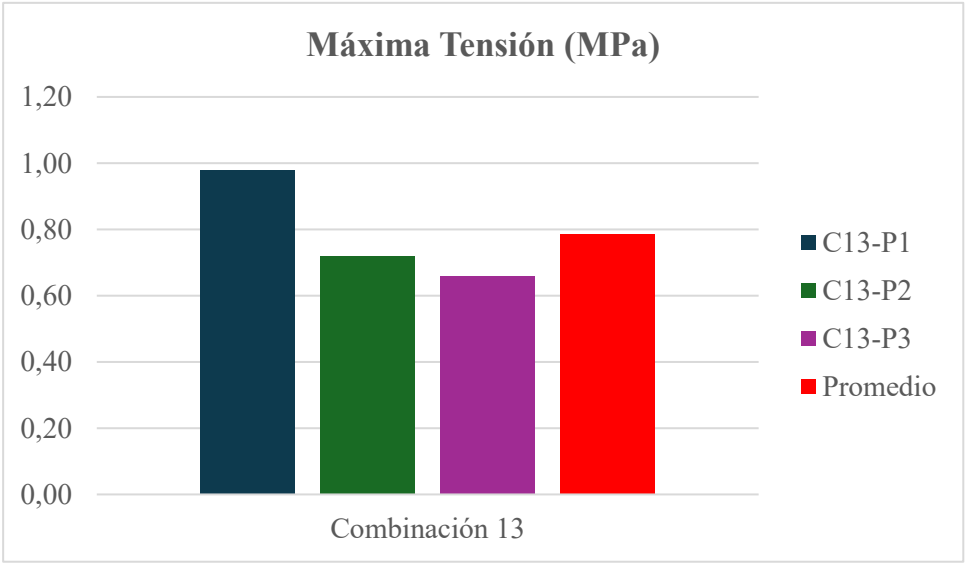
- Algunas probetas mostraron fracturas en cierta zona inicial de deformación seguida de una rotura.

GRÁFICA

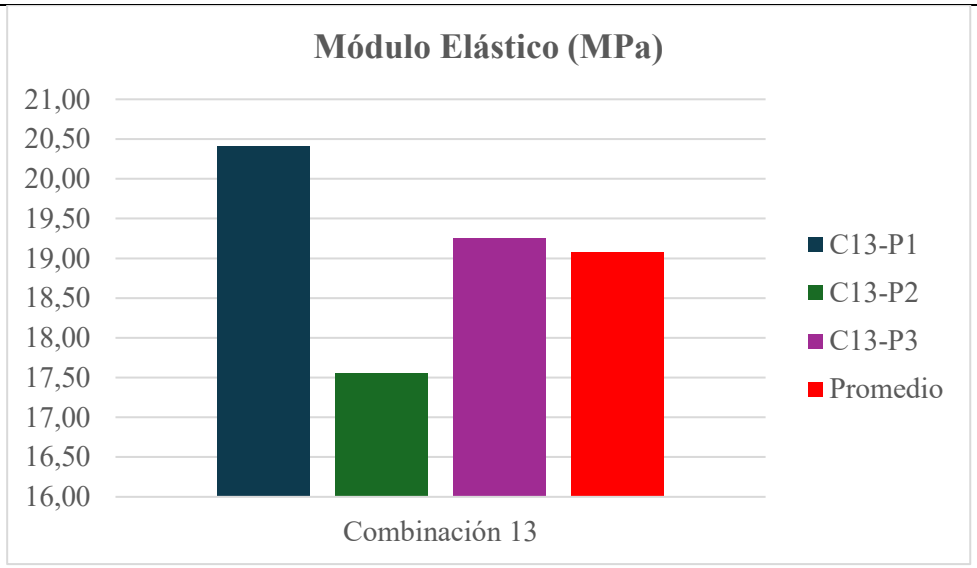
- **Tensión (MPa) vs Deformación (%)**



- **Gráfica de Máxima Tensión (MPa)**



- **Gráfica de Módulo de Elasticidad (MPa)**



APROBACIÓN Y VALIDACIÓN			
Elaborado por:	Germán Flores	**Aprobado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
Revisado por:	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.	**Validado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.

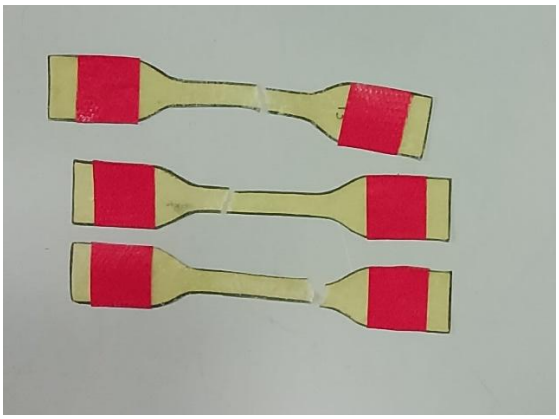
TABLA XXX

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 14

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA** **CARRERA DE MECÁNICA**	

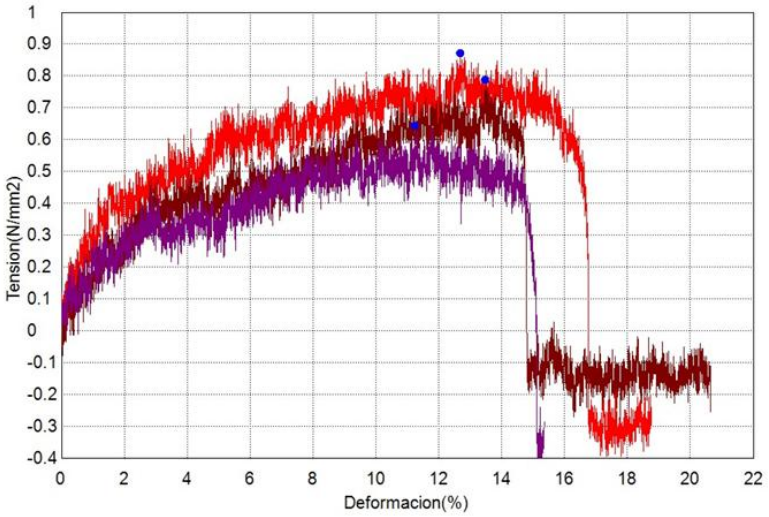
FORMULARIO DE OBTENCIÓN DE DATOS			
Velocidad	5 mm/min	**Tipo de ensayo**	Tracción
Fecha de informe	01/4/2026	**Número de muestras**	3
Codificación	Combinación14	**Equipo**	Shimadzu
Realizado por	Germán Flores	**Revisado por**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
PARÁMETROS DE PRUEBA			
Material	Bioplástico	**Norma**	ASTM D638-14

Base	Nopal (Mucílago)	**Tipo de probeta de acuerdo a la norma**	IV
Espesor promedio (mm)	0.5 mm	**Numero de probetas**	3
RESULTADOS			
Número de probetas	**Máxima Tensión (MPa)**	**Módulo de elasticidad (MPa)**	**Elongación (%)**
C14-1	0,87	15,30	13%
C14-2	0,79	12,32	13%
C14-3	0,64	12,77	11%
Promedio	0,77	13,46	12%
PROBETAS ENSAYADAS			

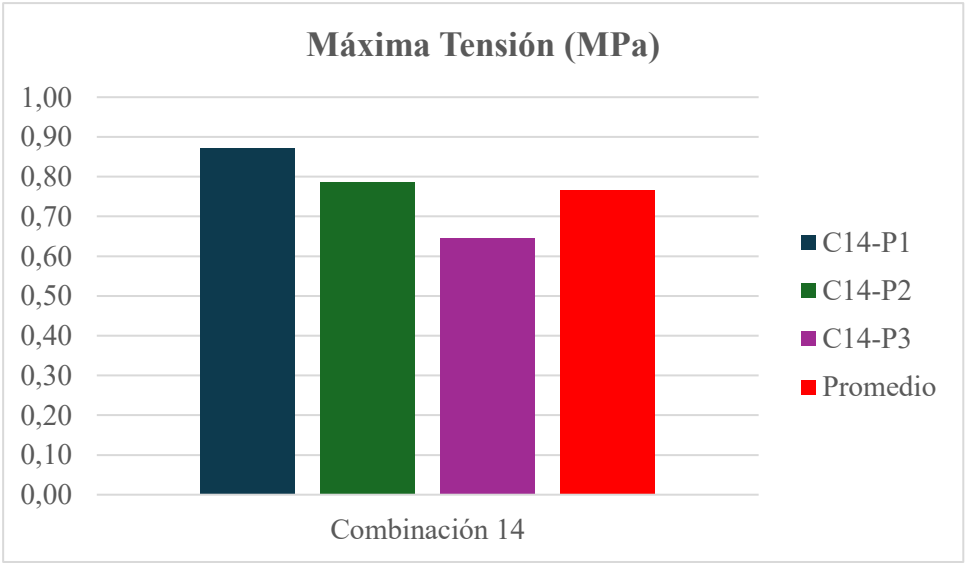


OBSERVACIONES
• Algunas probetas presenciaron cortes fibrosos con leves inclinaciones con respecto al eje longitudinal.
GRÁFICA

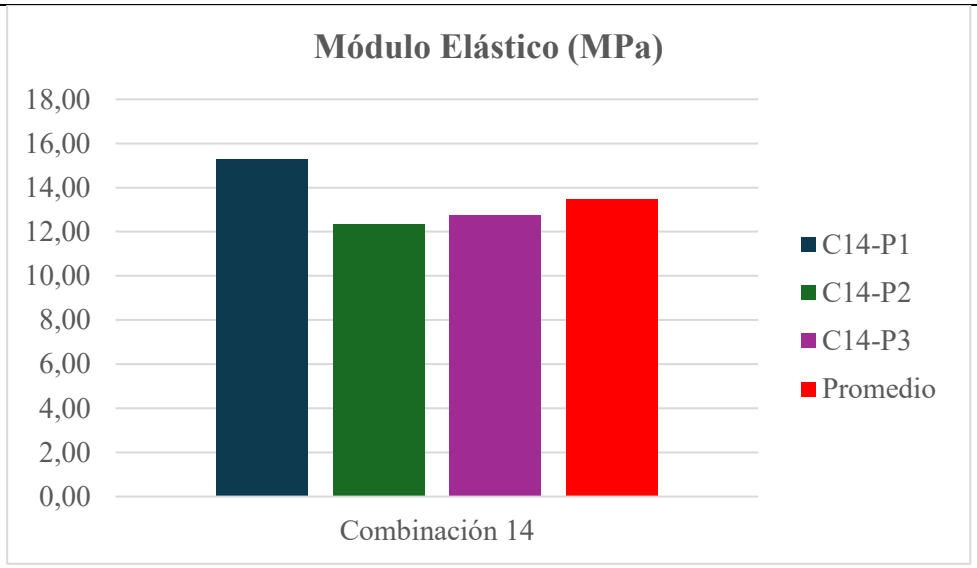
- **Tensión (MPa) vs Deformación (%)**



- **Gráfica de Máxima Tensión (MPa)**



- **Gráfica de Módulo de Elasticidad (MPa)**

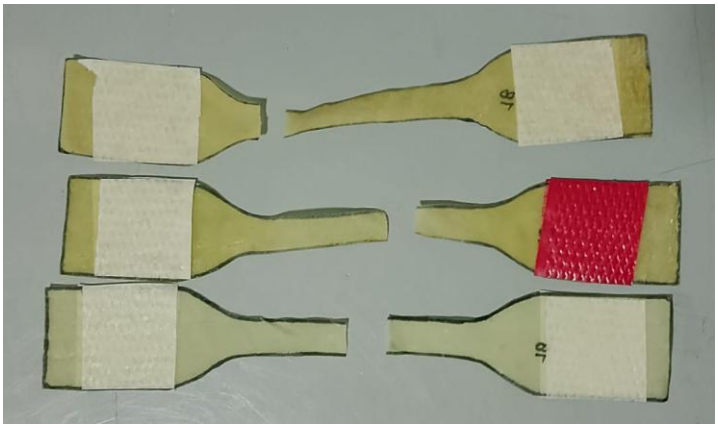


APROBACIÓN Y VALIDACIÓN			
Elaborado por:	Germán Flores	**Aprobado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
Revisado por:	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.	**Validado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.

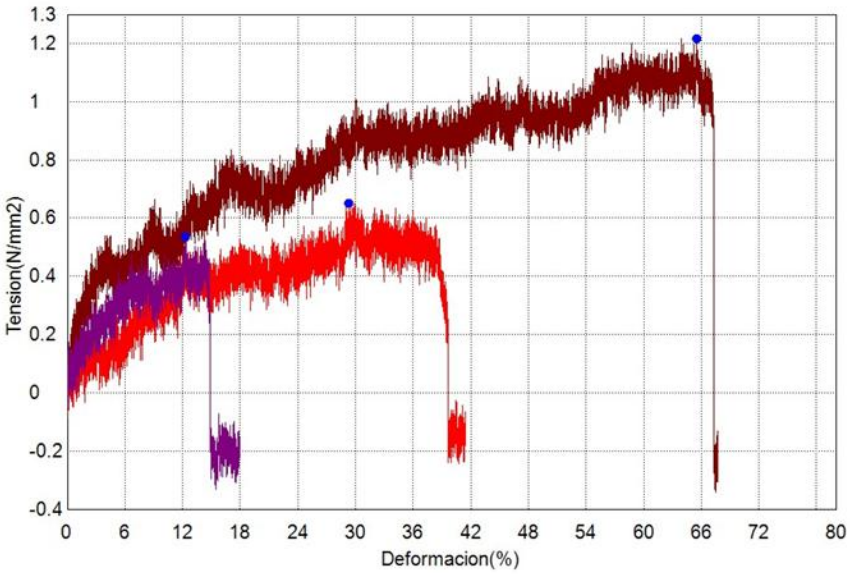
TABLA XXXI

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 15

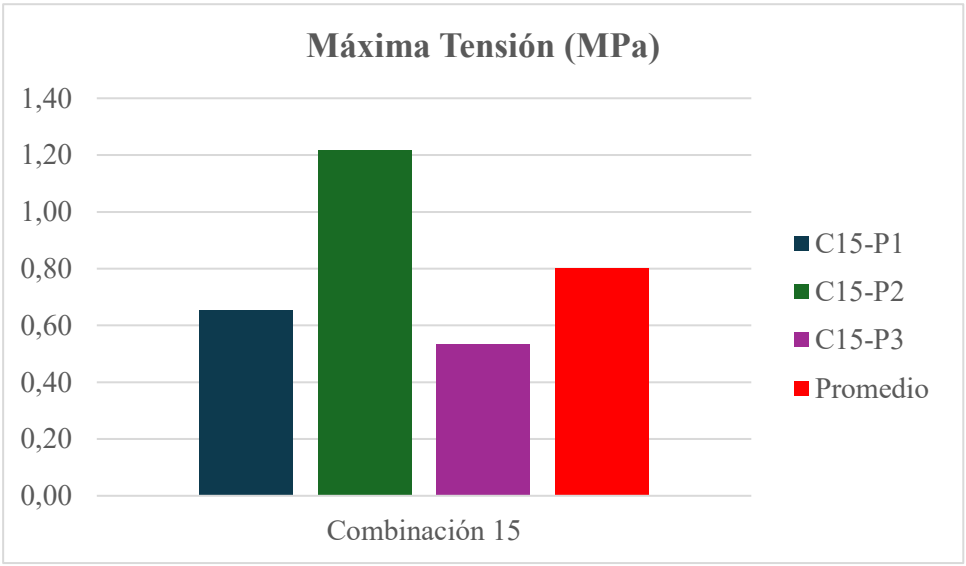
	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA** **CARRERA DE MECÁNICA**	
FORMULARIO DE OBTENCIÓN DE DATOS		
Velocidad	5 mm/min	**Tipo de ensayo**	Tracción
Fecha de informe	01/4/2026	**Número de muestras**	3
Codificación	Combinación15	**Equipo**	Shimadzu
Realizado por	Germán Flores	**Revisado por**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
PARÁMETROS DE PRUEBA			
Material	Bioplástico	**Norma**	ASTM D638-14

Base	Nopal (Mucílago)	**Tipo de probeta de acuerdo a la norma**	IV
Espesor promedio (mm)	0.5 mm	**Numero de probetas**	3
RESULTADOS			
Número de probetas	**Máxima Tensión (MPa)**	**Módulo de elasticidad (MPa)**	**Elongación (%)**
C15-1	0,65	2,35	29%
C15-2	1,22	7,02	66%
C15-3	0,54	5,06	12%
Promedio	0,80	4,81	36%
PROBETAS ENSAYADAS			
			
OBSERVACIONES			
• En algunos casos, la fractura no fue completamente limpia, mostrando desgarros progresivos del material.			
GRÁFICA			

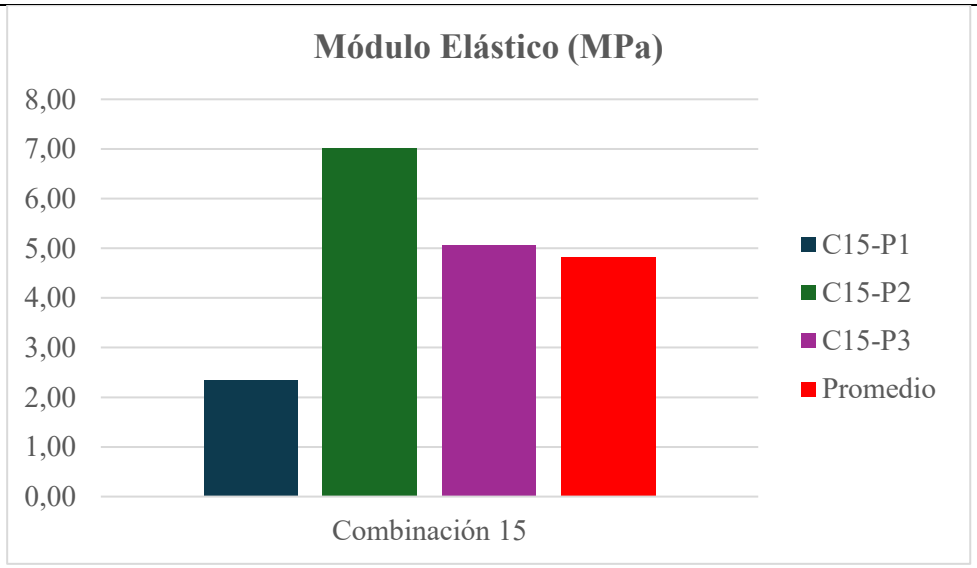
- **Tensión (MPa) vs Deformación (%)**



- **Gráfica de Máxima Tensión (MPa)**



- **Gráfica de Módulo de Elasticidad (MPa)**

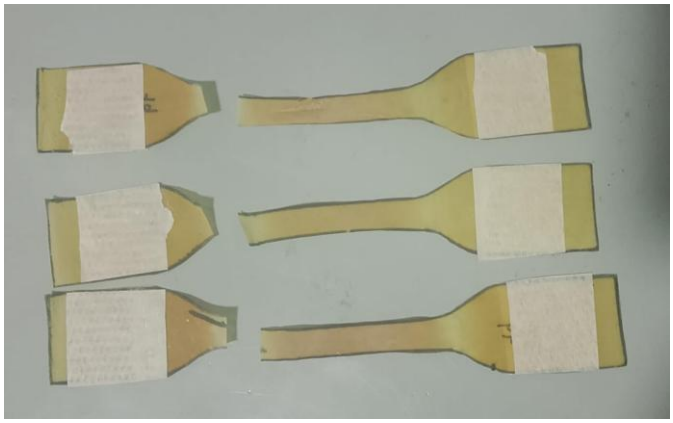


APROBACIÓN Y VALIDACIÓN			
Elaborado por:	Germán Flores	**Aprobado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
Revisado por:	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.	**Validado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.

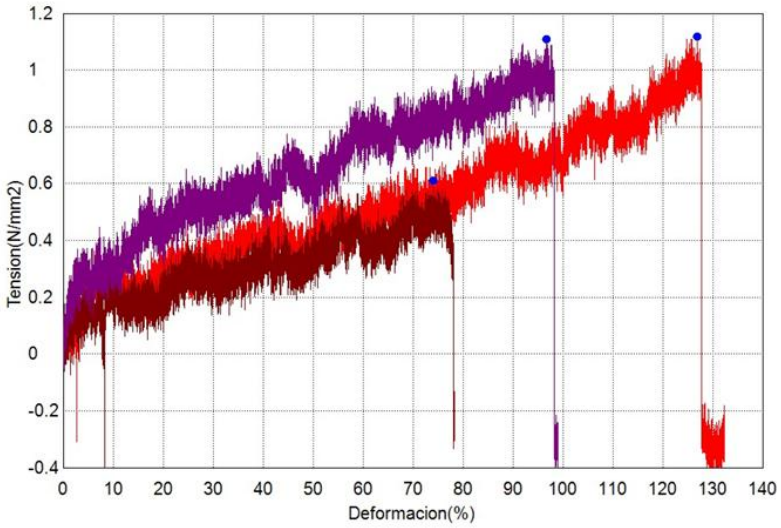
TABLA XXXII

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA COMBINACIÓN 16

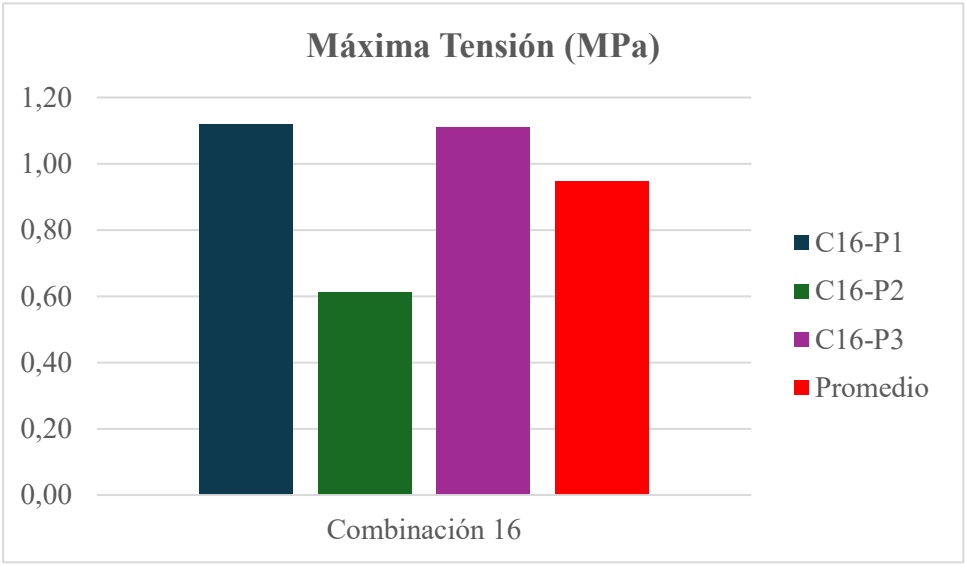
	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA** **CARRERA DE MECÁNICA**	
FORMULARIO DE OBTENCIÓN DE DATOS		
Velocidad	5 mm/min	**Tipo de ensayo**	Tracción
Fecha de informe	01/4/2026	**Número de muestras**	3
Codificación	Combinación16	**Equipo**	Shimadzu
Realizado por	Germán Flores	**Revisado por**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
PARÁMETROS DE PRUEBA			
Material	Bioplástico	**Norma**	ASTM D638-14

Base	Nopal (Mucílago)	**Tipo de probeta de acuerdo a la norma**	IV
Espesor promedio (mm)	0.5 mm	**Numero de probetas**	3
RESULTADOS			
Número de probetas	**Máxima Tensión (MPa)**	**Módulo de elasticidad (MPa)**	**Elongación (%)**
C16-1	1,12	2,84	127%
C16-2	0,61	4,47	74%
C16-3	1,11	8,47	97%
Promedio	0,95	5,26	99%
PROBETAS ENSAYADAS			
			
OBSERVACIONES			
• Se observo una fractura homogénea con un comportamiento bastante dúctil.			
GRÁFICA			

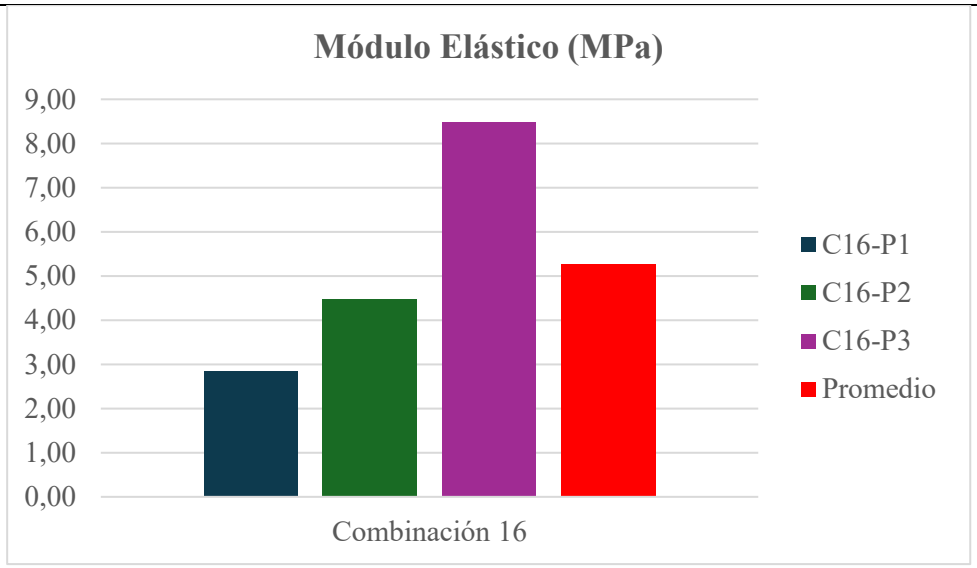
- **Tensión (MPa) vs Deformación (%)**



- **Gráfica de Máxima Tensión (MPa)**



- **Gráfica de Módulo de Elasticidad (MPa)**



APROBACIÓN Y VALIDACIÓN			
Elaborado por:	Germán Flores	**Aprobado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
Revisado por:	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.	**Validado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.

3.1.2. Fichas de ensayos de tracción de fundas plásticas

TABLA XXXIII

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DEL PLÁSTICO COMERCIAL 1P

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA** **CARRERA DE MECÁNICA**	
FORMULARIO DE OBTENCIÓN DE DATOS		

Velocidad	5 mm/min	**Tipo de ensayo**	Tracción
Fecha de informe	02/12/2025	**Número de muestras**	3
Codificación	Combinación 1P	**Equipo**	Shimadzu
Realizado por	Germán Flores	**Revisado por**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
PARÁMETROS DE PRUEBA			

Material	Polietileno Clorado	**Norma**	ASTM D638-14
Base	Funda para Celulares CTP	**Tipo de probeta de acuerdo a la norma**	IV
Espesor promedio (mm)	0.5 mm	**Numero de probetas**	3

RESULTADOS

Número de probetas	**Máxima Tensión (MPa)**	**Módulo de elasticidad (MPa)**	**Elongación (%)**
P1-1	0,90	5,48	351%
P1-2	0,78	7,73	106%
P1-3	0,72	4,15	361%
Promedio	0,80	5,79	273%

PROBETAS ENSAYADAS

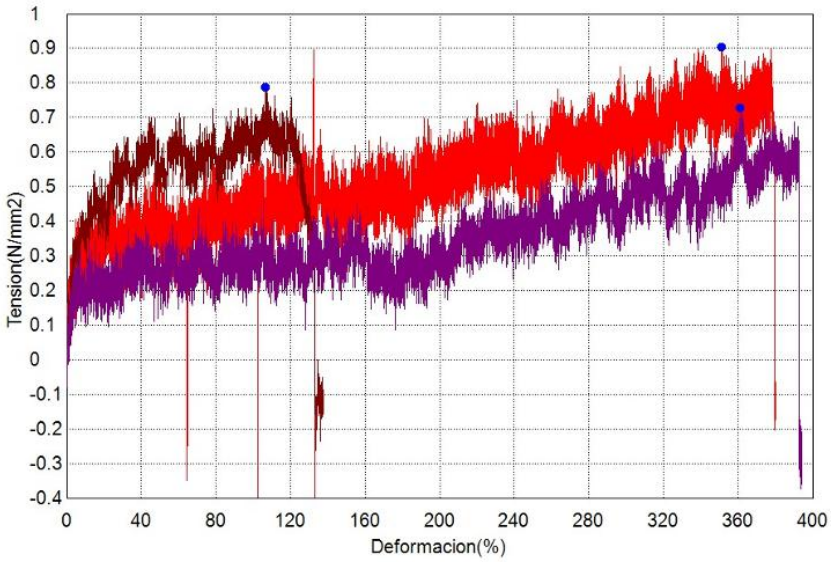


OBSERVACIONES

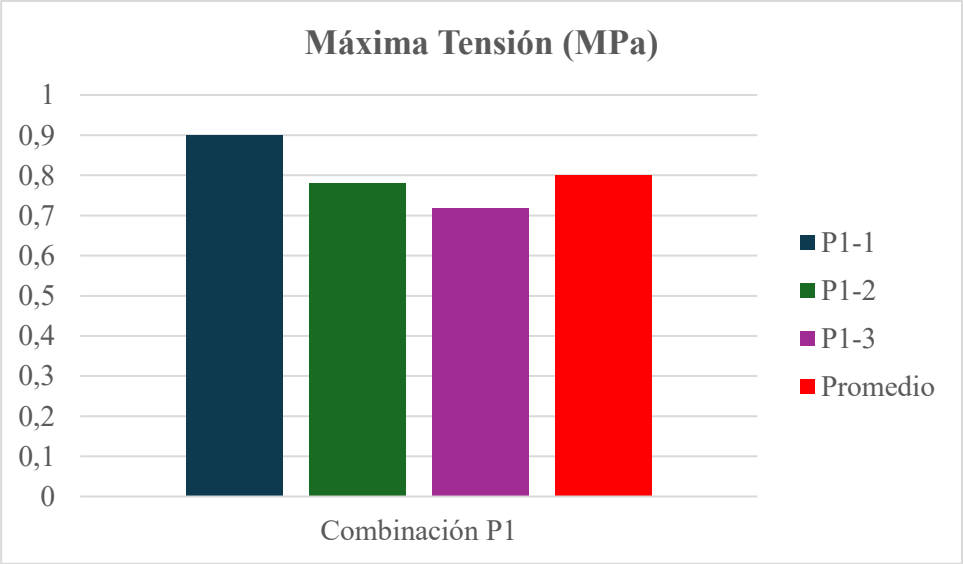
- Se observó al culminar los ensayos que las probetas de plástico sintético presentaron un mayor grado de deformación antes de alcanzar el punto máximo de fluencia en comparación al bioplástico.

GRÁFICA

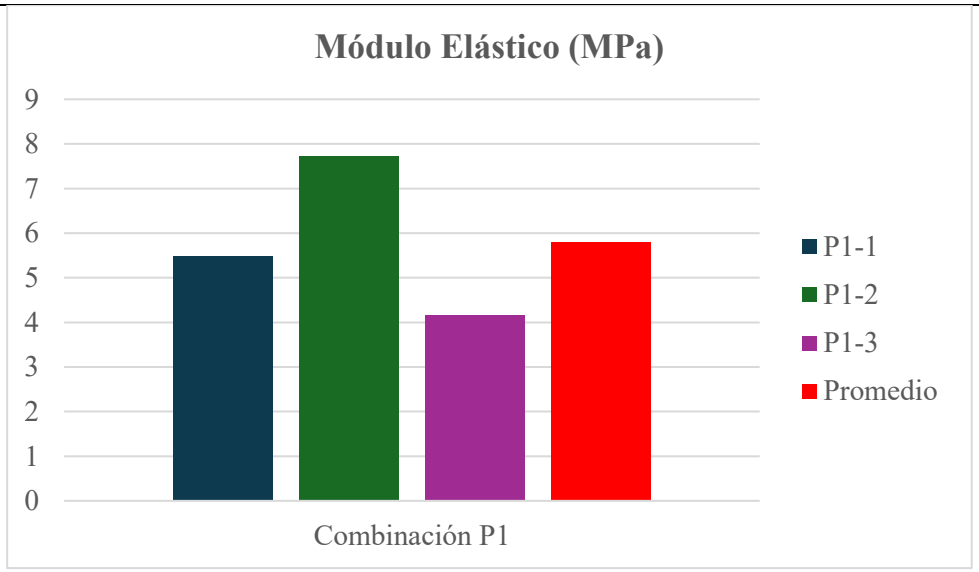
- Curva de Fuerza (N) vs Desplazamiento (mm)



- **Gráfica de Máxima Tensión (MPa)**



- **Gráfica de Módulo Elástico (MPa)**



APROBACIÓN Y VALIDACIÓN			
Elaborado por:	Germán Flores	**Aprobado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
Revisado por:	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.	**Validado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.

TABLA XXXIV

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE TRACCIÓN DEL PLÁSTICO COMERCIAL 2P

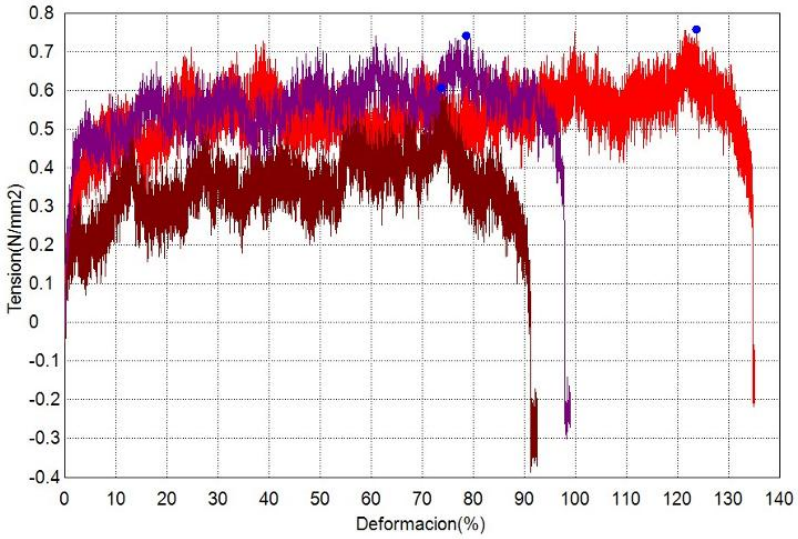
	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA** **CARRERA DE MECÁNICA**	
FORMULARIO DE OBTENCIÓN DE DATOS		
Velocidad	5 mm/min	**Tipo de ensayo**	Tracción
Fecha de informe	02/12/2025	**Número de muestras**	3
Codificación	Combinación 2P	**Equipo**	Shimadzu
Realizado por	Germán Flores	**Revisado por**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
PARÁMETROS DE PRUEBA			

Material	Polietileno	**Norma**	ASTM D638-14
Marca Comercial	Funda de Basura ‘El Torito’	**Tipo de probeta de acuerdo a la norma**	IV
Espesor promedio (mm)	0.5 mm	**Numero de probetas**	3
RESULTADOS			
Número de probetas	**Máxima Tensión (MPa)**	**Módulo de elasticidad (MPa)**	**Elongación (%)**
P2-1	0,75	15,82	123%
P2-2	0,60	21,93	73%
P2-3	0,74	27,88	78%
Promedio	0,70	21,88	92%
PROBETAS ENSAYADAS			

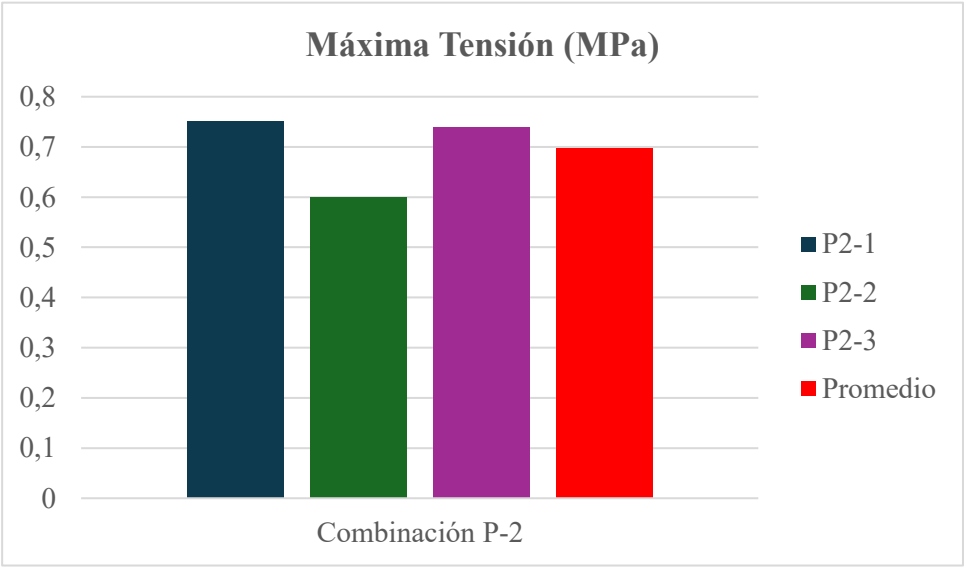


OBSERVACIONES
• Las probetas presentaron un alargamiento significativo demostrando buena ductilidad y absorción de energía.
GRÁFICA

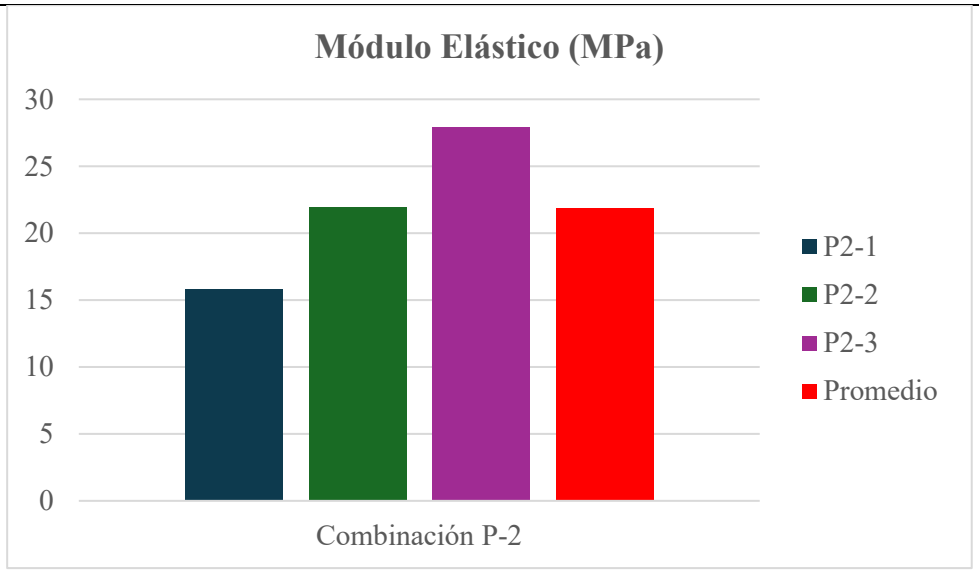
- **Curva de Fuerza (N) vs Desplazamiento (mm)**



- **Gráfica de Máxima Tensión (MPa)**



- **Gráfica de Modulo Elástico (MPa)**



APROBACIÓN Y VALIDACIÓN			
Elaborado por:	Germán Flores	**Aprobado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
Revisado por:	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.	**Validado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.

3.1.3. Biodegradabilidad

Los dos tipos de ensayos de biodegradabilidad se realizaron a un enfoque metodológico de la Norma (INTE/ISO 14855-1:2019) siendo el primer ensayo en un ambiente controlado y el segundo al medio ambiente.

3.1.3.1.Biodegradabilidad bajo condiciones controladas

El ensayo de biodegradabilidad realizado en condiciones controladas mediante el uso de compost como materia inóculo evidenció una degradación empezando las muestras de 2 gramos por cada combinación, tomando resultados de pesaje cada dos días durante un periodo de 48 días.

Cada pesaje se realizó la metodología de lavado con agua destilada y un secado para cada combinación, obteniendo valores confiables en el pesaje. Mientras que la tasa de degradación se tomó las diferencias de pesos (inicial y final) para su cálculo, donde se tomó la siguiente ecuación como recomienda la Norma (INTE/ISO 14855-1:2019).

$$Tasa\ de\ degradación\ (\%) = \frac{w_0 - w_f}{w_0} * 100 \qquad (3)$$

$$w_0 = Peso\ inicial$$

$$w_f = Peso\ final$$

Los resultados obtenidos de las 16 combinaciones en los ensayos de biodegradabilidad en condiciones controladas durante 48 días se agruparon en una ficha para un mejor análisis de la pérdida de masa en gramos y valores del porcentaje de degradación como se muestra en la TABLA XXXV.

TABLA XXXV

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE BIODEGRADABILIDAD EN CONDICIONES CONTROLADAS DE LAS 16 COMBINACIONES

<table>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="3">UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="6"><u>PRUEBAS DE BIODEGRADABILIDAD BAJO CONDICIONES CONTROLADAS</u></td></tr>
<tr><td colspan="6">DATOS INFORMATIVOS</td></tr>
<tr><td>Lugar de elaboración</td><td colspan="5">Laboratorio de Ensayo de Materiales</td></tr>
<tr><td>Tipo de estudio</td><td colspan="2">Trabajo Experimental</td><td>Codificación</td><td colspan="2">Combinación 1,2, 3…16</td></tr>
<tr><td>Realizado por</td><td colspan="2">Germán Flores</td><td>Revisado por</td><td colspan="2">Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.</td></tr>
<tr><td colspan="6">PARÁMETROS DE PRUEBA</td></tr>
<tr><td>Material</td><td colspan="2">Bioplástico</td><td>Peso de la probeta (gr)</td><td colspan="2">2 g</td></tr>
<tr><td>Base de la probeta</td><td colspan="2">Nopal (Mucílago)</td><td>Numero de probetas</td><td colspan="2">3</td></tr>
<tr><td>Norma</td><td colspan="5">ISO 14855-1</td></tr>
<tr><td colspan="6">MUESTRAS ENSAYADAS</td></tr>
<tr><td>Combinación 1</td><td>Almidón (g)</td><td>Gelatina (g)</td><td>Temperatura (°C)</td><td>Tiempo (min)</td><td></td></tr>
</table>

	7,182	0	40	5	
Combinación 2	5,3865	1,7955	40	5	
Combinación 3	3,591	3,591	40	5	
Combinación 4	1,7955	5,3865	40	5	
Combinación 5	7,182	0	60	5	
Combinación 6	5,3865	1,7955	60	5	
Combinación 7	3,591	3,591	60	5	
Combinación 8	1,7955	5,3865	60	5	
Combinación 9	7,182	0	40	10	
Combinación 10	5,3865	1,7955	40	10	
Combinación 11	3,591	3,591	40	10	
Combinación 12	1,7955	5,3865	40	10	

Combinación 13	7,182	0	60	10	
Combinación 14	5,3865	1,7955	60	10	
Combinación 15	3,591	3,591	60	10	
Combinación 16	1,7955	5,3865	60	10	

OBSERVACIONES

Se puedo destacar que, debido a la naturaleza heterogénea del compost, se presentó fenómenos como el "efecto cebado" el cual es un efecto que influye en la actividad microbiana y por ende influye en la variación de la degradación del material. Siendo la finalización de degradación de la novena probeta con corte en el día 78 aplicando el modelo matemático $y = 2{,}3373e^{-0{,}053x}$.

APROBACIÓN Y VALIDACIÓN

Elaborado por:	Germán Flores	**Aprobado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
Revisado por:	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.	**Validado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.

TABLA XXXVI

DATOS DE PÉRDIDA DE MASA EN (G) PROMEDIO Y ECUACIÓN EXPONENCIAL DEL COMPORTAMIENTO DE LAS 16 COMBINACIONES DURANTE 48 DÍAS DEL ENSAYO DE BIODEGRADABILIDAD EN CONDICIONES CONTROLADAS

Muestras	Día 0	Día 2	Día 4	Día 6	Día 8	Día 10	Día 12	Día 14	Día 16	Día 18	Día 20	Día 22	Día 24	Día 26	Día 28	Día 30	Día 32	Día 34	Día 36	Día 38	Día 40	Día 42	Día 44	Día 46	Día 48	Ecuación/Valor R cuadrado
1	2	1,95	1,92	1,86	1,77	1,65	1,51	1,38	1,26	1,18	1,1	0,92	0,83	0,71	0,63	0,58	0,54	0,49	0,44	0,41	0,38	0,35	0,33	0,31	0,29	$y = 2,3981e^{-0,045x}$
																										$R^2 = 0,9675$
2	2	1,97	1,95	1,91	1,85	1,72	1,63	1,53	1,49	1,41	1,31	1,16	1,02	0,86	0,82	0,77	0,72	0,66	0,6	0,56	0,52	0,48	0,45	0,42	0,4	$y = 2,4148e^{-0,038x}$
																										$R^2 = 0,9568$
3	2	1,99	1,92	1,84	1,73	1,59	1,5	1,42	1,33	1,27	1,19	1,08	0,96	0,82	0,79	0,75	0,71	0,68	0,65	0,61	0,57	0,54	0,51	0,47	0,44	$y = 2,1908e^{-0,034x}$
																										$R^2 = 0,9878$
4	2	1,96	1,89	1,81	1,7	1,56	1,48	1,37	1,3	1,24	1,16	1,04	0,92	0,81	0,78	0,76	0,74	0,71	0,69	0,66	0,61	0,57	0,54	0,5	0,47	$y = 2,0994e^{-0,032x}$
																										$R^2 = 0,9902$
5	2	1,88	1,83	1,77	1,69	1,6	1,57	1,46	1,38	1,33	1,26	1,18	1,07	0,95	0,93	0,89	0,84	0,79	0,74	0,7	0,66	0,62	0,57	0,53	0,49	$y = 2,1392e^{-0,03x}$
																										$R^2 = 0,9886$
6	2	1,89	1,86	1,8	1,72	1,62	1,54	1,45	1,36	1,31	1,24	1,16	1,05	0,98	0,96	0,92	0,88	0,84	0,81	0,78	0,76	0,71	0,68	0,65	0,61	$y = 2,0369e^{-0,025x}$
																										$R^2 = 0,9943$
7	2	1,92	1,88	1,82	1,74	1,63	1,55	1,46	1,31	1,26	1,19	1,11	1	0,89	0,87	0,83	0,79	0,75	0,72	0,69	0,66	0,61	0,57	0,54	0,5	$y = 2,1222e^{-0,03x}$
																										$R^2 = 0,9905$
8	2	1,87	1,82	1,76	1,68	1,54	1,46	1,36	1,15	1,1	1,03	0,95	0,87	0,81	0,79	0,73	0,68	0,66	0,6	0,55	0,51	0,48	0,47	0,41	0,37	$y = 2,1111e^{-0,035x}$
																										$R^2 = 0,9916$
9	2	1,86	1,79	1,71	1,6	1,44	1,33	1,15	0,98	0,9	0,81	0,72	0,65	0,59	0,57	0,51	0,46	0,42	0,38	0,33	0,3	0,26	0,21	0,17	0,14	$y = 2,3373e^{-0,053x}$
																										$R^2 = 0,9828$
10	2	1,93	1,84	1,76	1,65	1,54	1,44	1,32	1,18	1,1	1,02	0,89	0,78	0,66	0,62	0,56	0,51	0,45	0,4	0,36	0,32	0,28	0,26	0,2	0,16	$y = 2,5039e^{-0,052x}$
																										$R^2 = 0,9664$
11	2	1,99	1,89	1,81	1,7	1,56	1,48	1,33	1,2	1,14	1,04	0,91	0,79	0,69	0,64	0,59	0,54	0,51	0,48	0,45	0,42	0,38	0,34	0,31	0,26	$y = 2,3157e^{-0,044x}$
																										$R^2 = 0,9813$
12	2	1,81	1,79	1,71	1,6	1,46	1,38	1,27	1,15	1,09	1,01	0,9	0,77	0,68	0,62	0,58	0,54	0,52	0,49	0,43	0,39	0,35	0,31	0,26	0,21	$y = 2,2573e^{-0,045x}$
																										$R^2 = 0,9827$
13	2	1,92	1,87	1,81	1,73	1,63	1,55	1,39	1,21	1,16	1,09	1,01	0,9	0,82	0,8	0,77	0,74	0,71	0,63	0,59	0,55	0,51	0,48	0,45	0,42	$y = 2,1548e^{-0,034x}$
																										$R^2 = 0,9877$
14	2	1,95	1,9	1,84	1,76	1,66	1,59	1,42	1,31	1,26	1,19	1,11	1,02	0,91	0,89	0,84	0,79	0,74	0,7	0,66	0,61	0,58	0,55	0,49	0,4	$y = 2,2096e^{-0,032x}$
																										$R^2 = 0,9876$
15	2	1,9	1,85	1,79	1,71	1,61	1,56	1,48	1,36	1,31	1,24	1,16	1,05	0,94	0,92	0,88	0,84	0,8	0,76	0,72	0,69	0,65	0,63	0,6	0,55	$y = 2,0879e^{-0,028x}$
																										$R^2 = 0,9925$
16	2	1,89	1,84	1,78	1,7	1,59	1,52	1,41	1,34	1,3	1,23	1,15	1,04	0,91	0,89	0,84	0,79	0,75	0,72	0,68	0,64	0,6	0,57	0,54	0,5	$y = -0,0322x + 1,9007$
																										$R^2 = 0,9744$

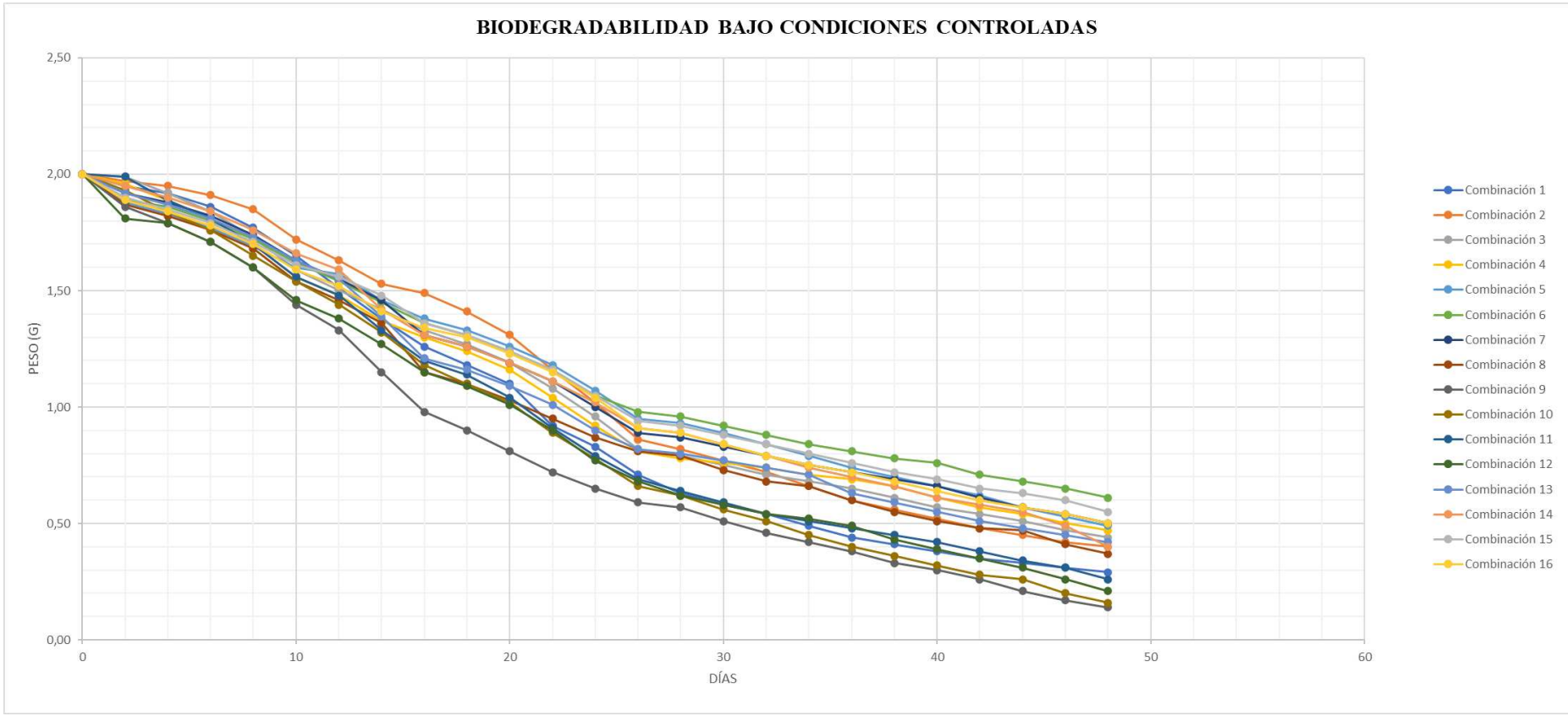


Fig 18. Gráfica del comportamiento de las probetas bajo condiciones controladas hasta el día 48. Peso (g) vs Días.

TABLA XXXVII

DATOS PROMEDIO DEL PORCENTAJE DE DEGRADACIÓN Y ECUACIÓN POLINÓMICA GRADO 2 DEL COMPORTAMIENTO DE LAS 16 COMBINACIONES DURANTE 48 DÍAS DEL ENSAYO DE BIODEGRADABILIDAD EN CONDICIONES CONTROLADAS

Muestras	Día 0	Día 2	Día 4	Día 6	Día 8	Día 10	Día 12	Día 14	Día 16	Día 18	Día 20	Día 22	Día 24	Día 26	Día 28	Día 30	Día 32	Día 34	Día 36	Día 38	Día 40	Día 42	Día 44	Día 46	Día 48	Ecuación/Valor R cuadrado
1	0	2,5	4	7	11,5	17,5	24,5	31	37	41	45	54	58,5	64,5	68,5	71	73	75,5	78	79,5	81	82,5	83,5	84,5	85,5	$y = -0,0295x^2 + 3,4245x - 8,674$ $R^2 = 0,9873$
2	0	1,5	2,5	4,5	7,5	14	18,5	23,5	25,5	29,5	34,5	42	49	57	59	61,5	64	67	70	72	74	76	77,5	79	80	$y = -0,0152x^2 + 2,6463x - 8,0214$ $R^2 = 0,9827$
3	0	0,5	4	8	13,5	20,5	25	29	33,5	36,5	40,5	46	52	59	60,5	62,5	64,5	66	67,5	69,5	71,5	73	74,5	76,5	78	$y = -0,025x^2 + 2,9552x - 6,0475$ $R^2 = 0,9926$
4	0	2	5,5	9,5	15	22	26	31,5	35	38	42	48	54	59,5	61	62	63	64,5	65,5	67	69,5	71,5	73	75	76,5	$y = -0,0274x^2 + 2,9857x - 4,6976$ $R^2 = 0,9926$
5	0	6	8,5	11,5	15,5	20	21,5	27	31	33,5	37	41	46,5	52,5	53,5	55,5	58	60,5	63	65	67	69	71,5	73,5	75,5	$y = -0,0136x^2 + 2,2536x - 0,8586$ $R^2 = 0,9964$
6	0	5,5	7	10	14	19	23	27,5	32	34,5	38	42	47,5	51	52	54	56	58	59,5	61	62	64,5	66	67,5	69,5	$y = -0,0203x^2 + 2,4498x - 2,0489$ $R^2 = 0,9958$
7	0	4	6	9	13	18,5	22,5	27	34,5	37	40,5	44,5	50	55,5	56,5	58,5	60,5	62,5	64	65,5	67	69,5	71,5	73	75	$y = -0,0221x^2 + 2,7x - 4,0262$ $R^2 = 0,9935$
8	0	6,5	9	12	16	23	27	32	42,5	45	48,5	52,5	56,5	59,5	60,5	63,5	66	67	70	72,5	74,5	76	76,5	79,5	81,5	$y = -0,0269x^2 + 3,0066x - 2,3684$ $R^2 = 0,994$
9	0	7	10,5	14,5	20	28	33,5	42,5	51	55	59,5	64	67,5	70,5	71,5	74,5	77	79	81	83,5	85	87	89,5	91,5	93	$y = -0,0368x^2 + 3,712x - 2,787$ $R^2 = 0,9934$
10	0	3,5	8	12	17,5	23	28	34	41	45	49	55,5	61	67	69	72	74,5	77,5	80	82	84	86	87	90	92	$y = -0,0269x^2 + 3,3113x - 4,8429$ $R^2 = 0,9957$
11	0	0,5	5,5	9,5	15	22	26	33,5	40	43	48	54,5	60,5	65,5	68	70,5	73	74,5	76	77,5	79	81	83	84,5	87	$y = -0,0314x^2 + 3,4523x - 7,1393$ $R^2 = 0,9926$
12	0	9,5	10,5	14,5	20	27	31	36,5	42,5	45,5	49,5	55	61,5	66	69	71	73	74	75,5	78,5	80,5	82,5	84,5	87	89,5	$y = -0,0267x^2 + 3,1398x - 1,0287$ $R^2 = 0,9954$
13	0	4	6,5	9,5	13,5	18,5	22,5	30,5	39,5	42	45,5	49,5	55	59	60	61,5	63	64,5	68,5	70,5	72,5	74,5	76	77,5	79	$y = -0,0259x^2 + 2,9756x - 4,6215$ $R^2 = 0,9913$
14	0	2,5	5	8	12	17	20,5	29	34,5	37	40,5	44,5	49	54,5	55,5	58	60,5	63	65	67	69,5	71	72,5	75,5	80	$y = -0,019x^2 + 2,6254x - 4,4795$ $R^2 = 0,9938$
15	0	5	7,5	10,5	14,5	19,5	22	26	32	34,5	38	42	47,5	53	54	56	58	60	62	64	65,5	67,5	68,5	70	72,5	$y = -0,0189x^2 + 2,4634x - 2,3224$ $R^2 = 0,9952$
16	0	5,5	8	11	15	20,5	24	29,5	33	35	38,5	42,5	48	54,5	55,5	58	60,5	62,5	64	66	68	70	71,5	73	75	$y = -0,0186x^2 + 2,4986x - 1,8612$ $R^2 = 0,9959$

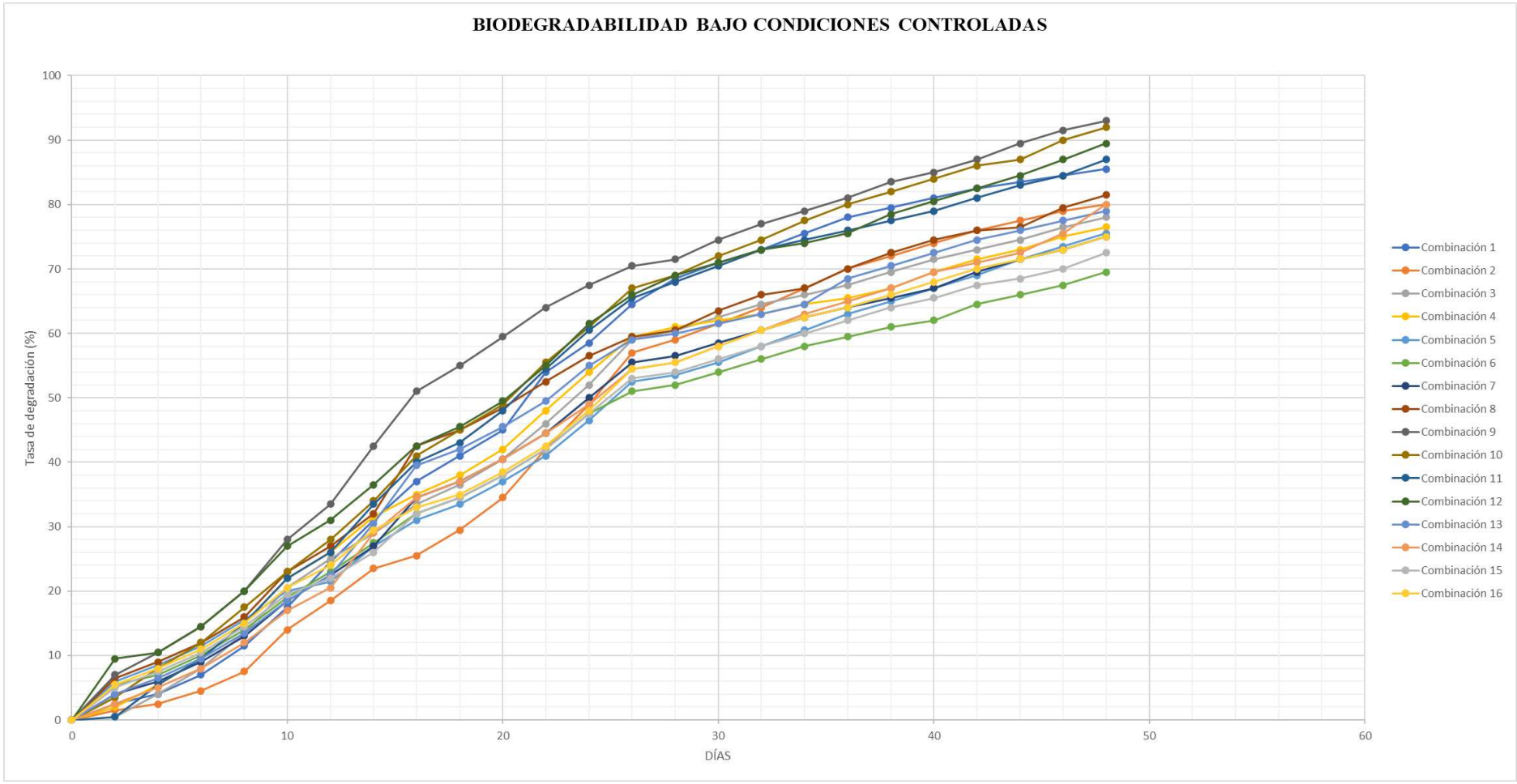


Fig 19. Gráfica del comportamiento de las probetas bajo condiciones controladas hasta el día 48. Tasa de degradación (%) vs Días.

3.1.3.2. Pruebas de Biodegradabilidad del polímero en el medio ambiente

El ensayo de biodegradabilidad realizado en condiciones del medio ambiente permitió evaluar el comportamiento del bioplástico en un entorno no controlado, más cercano a su disposición real, atribuyendo a la influencia de factores ambientales como la radiación solar, la precipitación, la disponibilidad de oxígeno y la diversidad microbiana presente en el entorno, empezando las muestras con un peso de 2 gramos por cada combinación, una humedad relativa de 73.2%, tomando resultados de pesaje cada dos días durante un periodo de 48 días.

Cada pesaje se realizó la metodología de lavado con agua destilada y un secado para cada combinación obteniendo valores confiables en el pesaje. Mientras que la tasa de degradación se tomó las diferencias de pesos (inicial y final) para su cálculo, donde se tomó la siguiente ecuación como recomienda la Norma INTE/ISO 14855-1:2019.

$$Tasa\ de\ degradación\ (\%) = \frac{w_0 - w_f}{w_0} * 100 \quad (3)$$

$$w_0 = Peso\ inicial$$

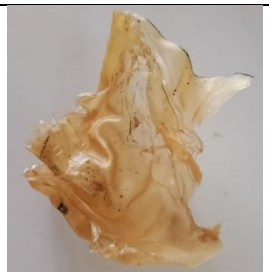
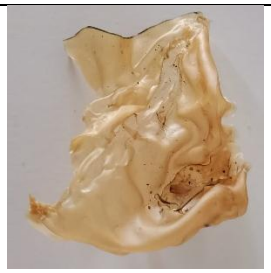
$$w_f = Peso\ final$$

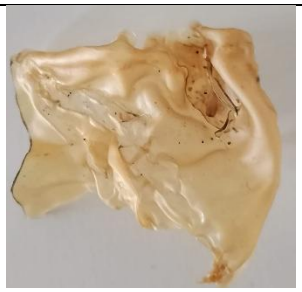
Los resultados obtenidos de las 16 combinaciones en los ensayos de biodegradabilidad al medio ambiente durante 48 días se agruparon en una ficha para un mejor análisis de la pérdida de masa en gramos y valores del porcentaje de degradación como se muestra en la TABLA XXXVIII.

TABLA 1

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO DE BIODEGRADABILIDAD AL MEDIO AMBIENTE DE LAS 16 COMBINACIONES

<table>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="4">UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="8"><u>PRUEBAS DE BIODEGRADABILIDAD BAJO CONDICIONES DEL MEDIO AMBIENTE</u></td></tr>
<tr><td colspan="8">DATOS INFORMATIVOS</td></tr>
<tr><td>Lugar de elaboración</td><td colspan="7">Laboratorio de Ensayo de Materiales</td></tr>
<tr><td>Tipo de estudio</td><td colspan="2">Trabajo Experimental</td><td>Codificación</td><td colspan="3">Combinación 1,2, 3…16</td></tr>
<tr><td>Realizado por</td><td colspan="2">Germán Flores</td><td>Revisado por</td><td colspan="3">Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.</td></tr>
<tr><td colspan="8">PARÁMETROS DE PRUEBA</td></tr>
<tr><td>Material</td><td colspan="2">Bioplástico</td><td>Peso de la probeta (gr)</td><td colspan="3">2 g</td></tr>
<tr><td>Base de la probeta</td><td colspan="2">Nopal (Mucílago)</td><td>Numero de probetas</td><td colspan="3">3</td></tr>
<tr><td>Norma</td><td colspan="7">ISO 14855-1</td></tr>
<tr><td colspan="8">MUESTRAS ENSAYADAS</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Combinación 1</td><td>Almidón (g)</td><td>Gelatina (g)</td><td>Temperatura (°C)</td><td>Tiempo (min)</td><td colspan="3" rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>7,182</td><td>0</td><td>40</td><td>5</td></tr>
</table>

Combinación 2	5,3865	1,7955	40	5	
Combinación 3	3,591	3,591	40	5	
Combinación 4	1,7955	5,3865	40	5	
Combinación 5	7,182	0	60	5	
Combinación 6	5,3865	1,7955	60	5	
Combinación 7	3,591	3,591	60	5	

Combinación 8	1,7955	5,3865	60	5	
Combinación 9	7,182	0	40	10	
Combinación 10	5,3865	1,7955	40	10	
Combinación 11	3,591	3,591	40	10	
Combinación 12	1,7955	5,3865	40	10	
Combinación 13	7,182	0	60	10	

Combinación 14	5,3865	1,7955	60	10	
Combinación 15	3,591	3,591	60	10	
Combinación 16	1,7955	5,3865	60	10	

OBSERVACIONES

Se observo una variabilidad mucho más grande con respecto al tiempo de degradación del material, atribuida a factores ambientales como la radiación solar, la disponibilidad de oxígeno, la precipitación y la diversidad microbiana presente en el entorno. Estas condiciones generaron un proceso de degradación mucho más rápido en comparación con el primer ensayo de biodegradabilidad realizado en condiciones controladas en compost, siendo la finalización de degradación de la novena probeta con corte en el día 68 aplicando el modelo matemático $y = 3{,}0437e^{-0{,}053x}$.

APROBACIÓN Y VALIDACIÓN

Elaborado por:	Germán Flores	**Aprobado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.
Revisado por:	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.	**Validado por:**	Ing. Juan Paredes Salinas, PhD.

TABLA XXXIX

DATOS DE PÉRDIDA DE MASA EN (G) PROMEDIO Y ECUACIÓN EXPONENCIAL DEL COMPORTAMIENTO DE LAS 16 COMBINACIONES DURANTE 48 DÍAS DEL ENSAYO DE BIODEGRADABILIDAD AL MEDIO AMBIENTE

Muestras	Día 0	Día 2	Día 4	Día 6	Día 8	Día 10	Día 12	Día 14	Día 16	Día 18	Día 20	Día 22	Día 24	Día 26	Día 28	Día 30	Día 32	Día 34	Día 36	Día 38	Día 40	Día 42	Día 44	Día 46	Día 48	Ecuación/Valor R cuadrado
1	2,00	2,00	1,98	1,96	1,87	1,81	1,73	1,67	1,62	1,55	1,49	1,41	1,32	1,23	1,16	0,98	0,89	0,8	0,72	0,65	0,53	0,46	0,39	0,31	0,23	$y = 2{,}801e^{-0{,}041x}$
																										$R^2 = 0{,}8735$
2	2,00	2,00	1,97	1,95	1,85	1,8	1,75	1,7	1,66	1,59	1,51	1,43	1,34	1,28	1,2	1,1	0,98	0,9	0,82	0,72	0,63	0,54	0,47	0,39	0,31	$y = 2{,}6534e^{-0{,}036x}$
																										$R^2 = 0{,}8871$
3	2,00	2,00	1,98	1,94	1,83	1,77	1,71	1,65	1,58	1,51	1,42	1,33	1,27	1,21	1,15	1,09	0,99	0,91	0,86	0,81	0,77	0,73	0,69	0,65	0,48	$y = 2{,}323e^{-0{,}028x}$
																										$R^2 = 0{,}9664$
4	2,00	2,00	1,96	1,93	1,82	1,75	1,69	1,64	1,58	1,51	1,44	1,39	1,3	1,24	1,18	1,09	1	0,92	0,87	0,83	0,79	0,75	0,68	0,61	0,51	$y = 2{,}3168e^{-0{,}027x}$
																										$R^2 = 0{,}9638$
5	2,00	2,00	1,97	1,95	1,89	1,75	1,73	1,69	1,66	1,57	1,56	1,46	1,47	1,43	1,36	1,29	1,21	1,13	1,08	1,02	0,95	0,87	0,82	0,74	0,67	$y = 2{,}2625e^{-0{,}022x}$
																										$R^2 = 0{,}9519$
6	2,00	2,00	1,98	1,96	1,82	1,74	1,72	1,68	1,64	1,59	1,55	1,44	1,45	1,39	1,34	1,28	1,22	1,14	1,1	1,04	0,96	0,89	0,84	0,75	0,69	$y = 2{,}2313e^{-0{,}021x}$
																										$R^2 = 0{,}9607$
7	2,00	2,00	1,97	1,94	1,84	1,76	1,7	1,66	1,62	1,57	1,52	1,47	1,42	1,37	1,31	1,25	1,19	1,11	1,07	1	0,93	0,87	0,81	0,73	0,66	$y = 2{,}2416e^{-0{,}022x}$
																										$R^2 = 0{,}9632$
8	2,00	2,00	1,98	1,96	1,88	1,8	1,72	1,64	1,6	1,56	1,5	1,46	1,39	1,32	1,27	1,22	1,17	1,11	1,01	0,93	0,87	0,8	0,74	0,67	0,61	$y = 2{,}2993e^{-0{,}024x}$
																										$R^2 = 0{,}9572$
9	2,00	2,00	1,99	1,96	1,8	1,65	1,5	1,45	1,41	1,35	1,29	1,22	1,15	1,09	1	0,89	0,8	0,72	0,6	0,48	0,39	0,3	0,21	0,16	0,1	$y = 3{,}0437e^{-0{,}053x}$
																										$R^2 = 0{,}8765$
10	2,00	2,00	1,94	1,9	1,85	1,8	1,76	1,72	1,68	1,64	1,6	1,56	1,51	1,43	1,36	1,27	1,19	1,11	1,05	0,94	0,86	0,74	0,67	0,59	0,5	$y = 2{,}4169e^{-0{,}026x}$
																										$R^2 = 0{,}8934$
11	2,00	2,00	1,96	1,92	1,8	1,72	1,64	1,58	1,5	1,43	1,38	1,31	1,26	1,2	1,11	1	0,94	0,86	0,79	0,71	0,64	0,53	0,5	0,37	0,31	$y = 2{,}5153e^{-0{,}035x}$
																										$R^2 = 0{,}933$
12	2,00	2,00	1,98	1,96	1,8	1,71	1,66	1,6	1,53	1,46	1,4	1,34	1,28	1,22	1,14	1,05	0,97	0,89	0,81	0,73	0,67	0,55	0,49	0,4	0,33	$y = 2{,}5158e^{-0{,}034x}$
																										$R^2 = 0{,}9293$
13	2,00	2,00	1,99	1,95	1,83	1,74	1,69	1,64	1,59	1,54	1,5	1,42	1,37	1,32	1,28	1,2	1,14	1,07	1	0,92	0,85	0,8	0,73	0,67	0,6	$y = 2{,}2801e^{-0{,}024x}$
																										$R^2 = 0{,}9613$
14	2,00	2,00	1,97	1,94	1,86	1,77	1,7	1,63	1,57	1,51	1,46	1,39	1,32	1,27	1,21	1,16	1,09	1	0,91	0,83	0,77	0,72	0,65	0,6	0,56	$y = 2{,}3317e^{-0{,}027x}$
																										$R^2 = 0{,}9584$
15	2,00	2,00	1,96	1,92	1,81	1,7	1,63	1,56	1,5	1,45	1,4	1,32	1,23	1,18	1,12	1,04	0,93	0,87	0,81	0,75	0,7	0,66	0,6	0,56	0,5	$y = 2{,}3124e^{-0{,}029x}$
																										$R^2 = 0{,}9706$
16	2,00	2,00	1,97	1,94	1,8	1,73	1,66	1,59	1,53	1,47	1,41	1,3	1,24	1,16	1,08	0,99	0,9	0,83	0,75	0,69	0,63	0,58	0,5	0,42	0,37	$y = 2{,}4755e^{-0{,}034x}$
																										$R^2 = 0{,}9441$

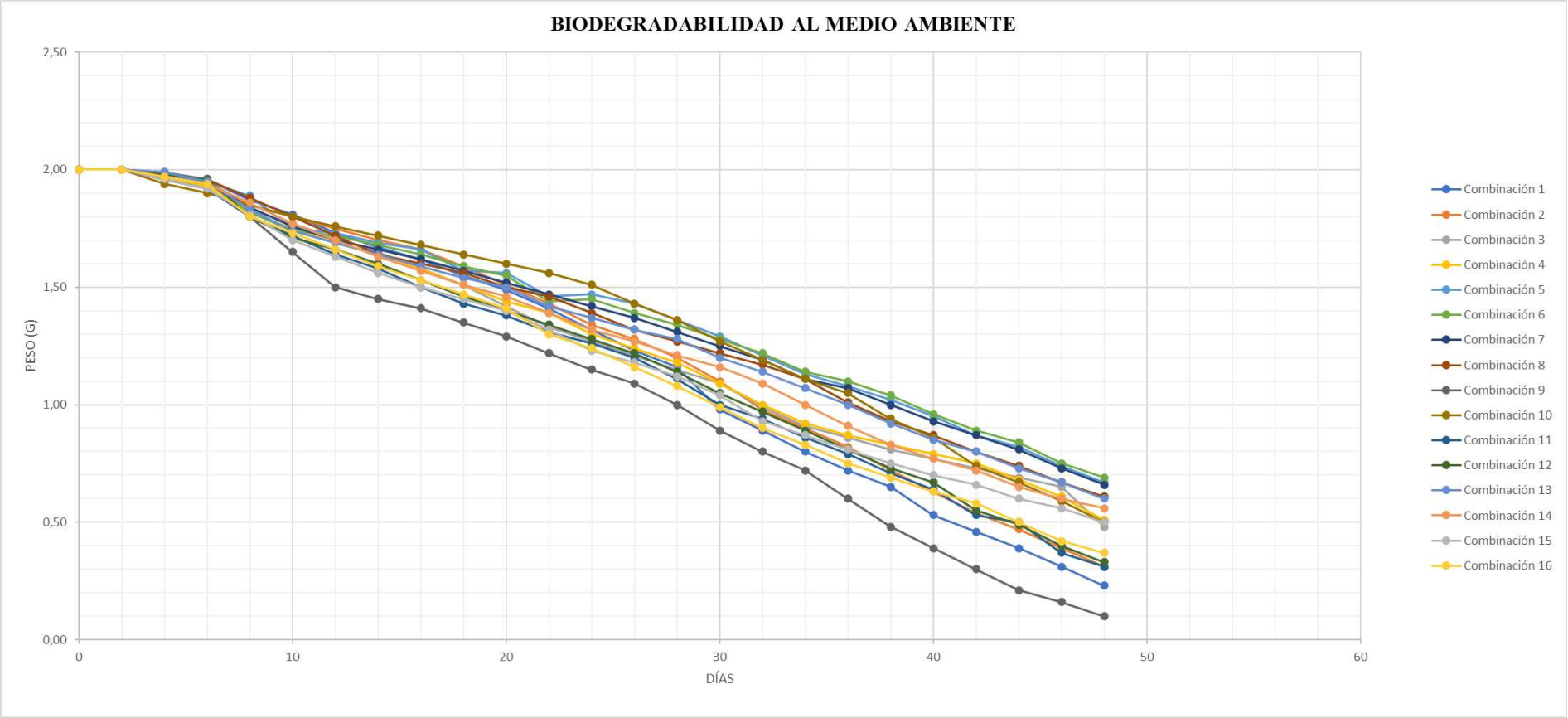


Fig 20. Gráfica del comportamiento de las probetas al medio ambiente hasta el día 48. Peso (g) vs Días.

TABLA XL

DATOS PROMEDIO DEL PORCENTAJE DE DEGRADACIÓN Y ECUACIÓN POLINÓMICA GRADO 2 DEL COMPORTAMIENTO DE LAS 16 COMBINACIONES DURANTE 48 DÍAS DEL ENSAYO DE BIODEGRADABILIDAD AL MEDIO AMBIENTE.

Muestras	Día 0	Día 2	Día 4	Día 6	Día 8	Día 10	Día 12	Día 14	Día 16	Día 18	Día 20	Día 22	Día 24	Día 26	Día 28	Día 30	Día 32	Día 34	Día 36	Día 38	Día 40	Día 42	Día 44	Día 46	Día 48	Ecuación/Valor R cuadrado
1	0	0	1	2	6,5	9,5	13,5	16,5	19	22,5	25,5	29,5	34	38,5	42	51	55,5	60	64	67,5	73,5	77	80,5	84,5	88,5	$y = 0,0152x^2 + 1,2676x - 3,8892$ $R^2 = 0,9952$
2	0	0	1,5	2,5	7,5	10	12,5	15	17	20,5	24,5	28,5	33	36	40	45	51	55	59	64	68,5	73	76,5	80,5	84,5	$y = 0,0165x^2 + 1,0838x - 2,7267$ $R^2 = 0,9975$
3	0	0	1	3	8,5	11,5	14,5	17,5	21	24,5	29	33,5	36,5	39,5	42,5	45,5	50,5	54,5	57	59,5	61,5	63,5	65,5	67,5	76	$y = -0,0015x^2 + 1,7108x - 4,5253$ $R^2 = 0,9943$
4	0	0	2	3,5	9	12,5	15,5	18	21	24,5	28	30,5	35	38	41	45,5	50	54	56,5	58,5	60,5	62,5	66	69,5	74,5	$y = 0,0007x^2 + 1,5803x - 3,4725$ $R^2 = 0,9964$
5	0	0	1,5	2,5	5,5	12,5	13,5	15,5	17	21,5	22	27	26,5	28,5	32	35,5	39,5	43,5	46	49	52,5	56,5	59	63	66,5	$y = 0,0082x^2 + 1,0197x - 1,4251$ $R^2 = 0,9958$
6	0	0	1	2	9	13	14	16	18	20,5	22,5	28	27,5	30,5	33	36	39	43	45	48	52	55,5	58	62,5	65,5	$y = 0,006x^2 + 1,0925x - 1,3424$ $R^2 = 0,9957$
7	0	0	1,5	3	8	12	15	17	19	21,5	24	26,5	29	31,5	34,5	37,5	40,5	44,5	46,5	50	53,5	56,5	59,5	63,5	67	$y = 0,0054x^2 + 1,1584x - 1,5421$ $R^2 = 0,9978$
8	0	0	1	2	6	10	14	18	20	22	25	27	30,5	34	36,5	39	41,5	44,5	49,5	53,5	56,5	60	63	66,5	69,5	$y = 0,0057x^2 + 1,2384x - 2,5933$ $R^2 = 0,997$
9	0	0	0,5	2	10	17,5	25	27,5	29,5	32,5	35,5	39	42,5	45,5	50	55,5	60	64	70	76	80,5	85	89,5	92	95	$y = 0,0052x^2 + 1,8439x - 3,3407$ $R^2 = 0,9933$
10	0	0	3	5	7,5	10	12	14	16	18	20	22	24,5	28,5	32	36,5	40,5	44,5	47,5	53	57	63	66,5	70,5	75	$y = 0,0205x^2 + 0,5871x + 0,5342$ $R^2 = 0,9981$
11	0	0	2	4	10	14	18	21	25	28,5	31	34,5	37	40	44,5	50	53	57	60,5	64,5	68	73,5	75	81,5	84,5	$y = 0,0053x^2 + 1,5622x - 2,5952$ $R^2 = 0,9981$
12	0	0	1	2	10	14,5	17	20	23,5	27	30	33	36	39	43	47,5	51,5	55,5	59,5	63,5	66,5	72,5	75,5	80	83,5	$y = 0,007x^2 + 1,4701x - 2,7021$ $R^2 = 0,9974$
13	0	0	0,5	2,5	8,5	13	15,5	18	20,5	23	25	29	31,5	34	36	40	43	46,5	50	54	57,5	60	63,5	66,5	70	$y = 0,0044x^2 + 1,2963x - 2,2154$ $R^2 = 0,997$
14	0	0	1,5	3	7	11,5	15	18,5	21,5	24,5	27	30,5	34	36,5	39,5	42	45,5	50	54,5	58,5	61,5	64	67,5	70	72	$y = 0,0033x^2 + 1,4499x - 3,1677$ $R^2 = 0,9972$
15	0	0	2	4	9,5	15	18,5	22	25	27,5	30	34	38,5	41	44	48	53,5	56,5	59,5	62,5	65	67	70	72	75	$y = -0,0036x^2 + 1,8436x - 3,827$ $R^2 = 0,9964$
16	0	0	1,5	3	10	13,5	17	20,5	23,5	26,5	29,5	35	38	42	46	50,5	55	58,5	62,5	65,5	68,5	71	75	79	81,5	$y = 0,0019x^2 + 1,7282x - 4,025$ $R^2 = 0,997$

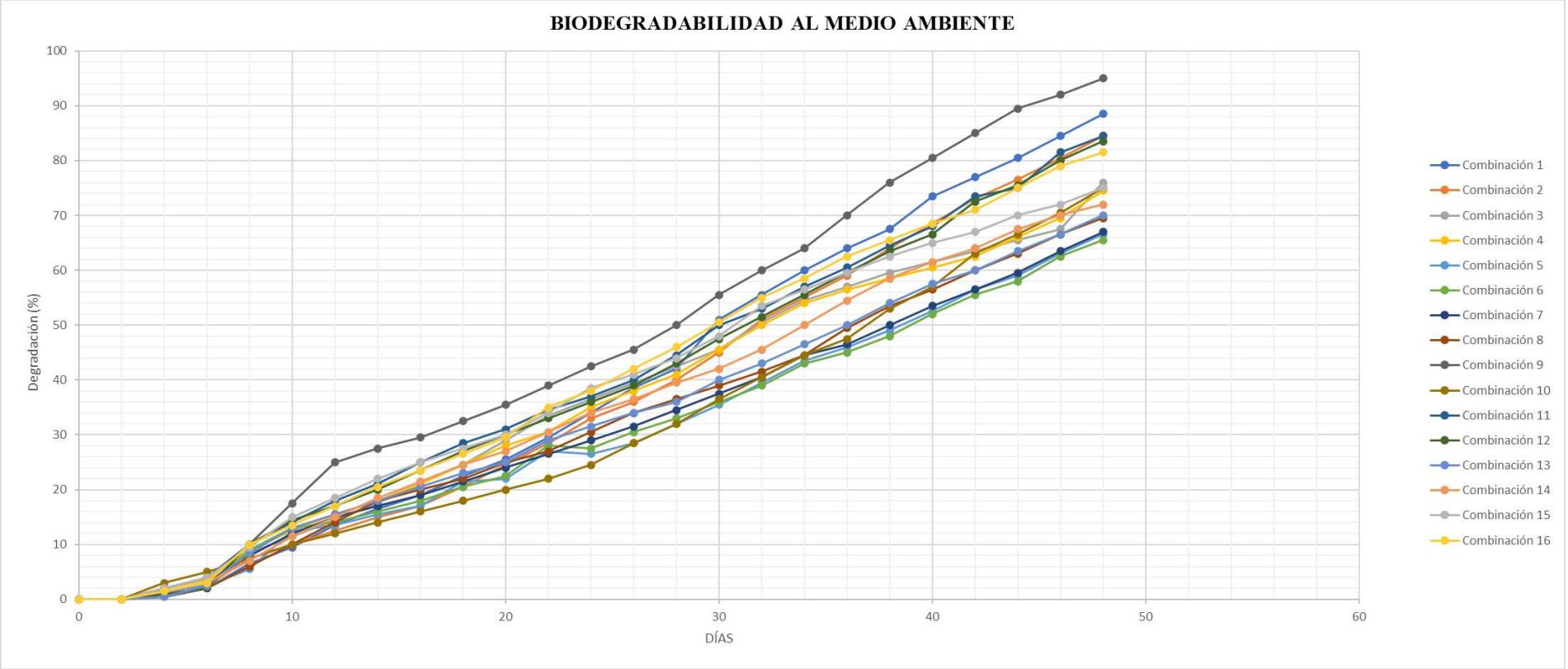


Fig 21 . Gráfica del comportamiento de las probetas al medio ambiente hasta el día 48. Tasa de degradación (%) vs Días.

3.2. Discusión de resultados

Se recopiló los datos de los ensayos de tracción y biodegradabilidad para su comparación con plásticos comerciales y obtener las mejores combinaciones.

3.2.1. Discusión de resultados de ensayos de tracción de biopolímeros

En la TABLA XLI, se recolectaron los resultados promedio de los ensayos de tracción que se realizó a las 16 combinaciones y a 2 plásticos comerciales (Polietileno Clorado y Polietileno).

TABLA XLI

RESULTADOS PROMEDIO DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN

N combinación	Esfuerzo Máximo a la tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Elongación (%)
1	0,79	7,35	32%
2	0,77	9,11	14%
3	0,63	5,58	56%
4	1,61	24,36	50%
5	0,72	6,49	16%
6	0,61	5,23	17%
7	0,65	6,91	25%
8	1,31	8,96	70%
9	0,64	9,19	28%
10	0,53	5,84	10%
11	0,58	6,65	16%
12	1,20	6,82	70%
13	0,79	19,07	14%
14	0,77	13,46	12%
15	0,80	4,81	36%
16	0,95	5,26	99%
Plástico comercial 1	0,80	5,79	273%
Plástico comercial 2	0,70	21,88	92%

La Fig 22, representa los valores promedios de los esfuerzos máximos a la tracción de las 16 combinaciones comparando con los valores promedios de los esfuerzos máximos a la tracción de los 2 plásticos comerciales (Polietileno Clorado y Polietileno) utilizados.

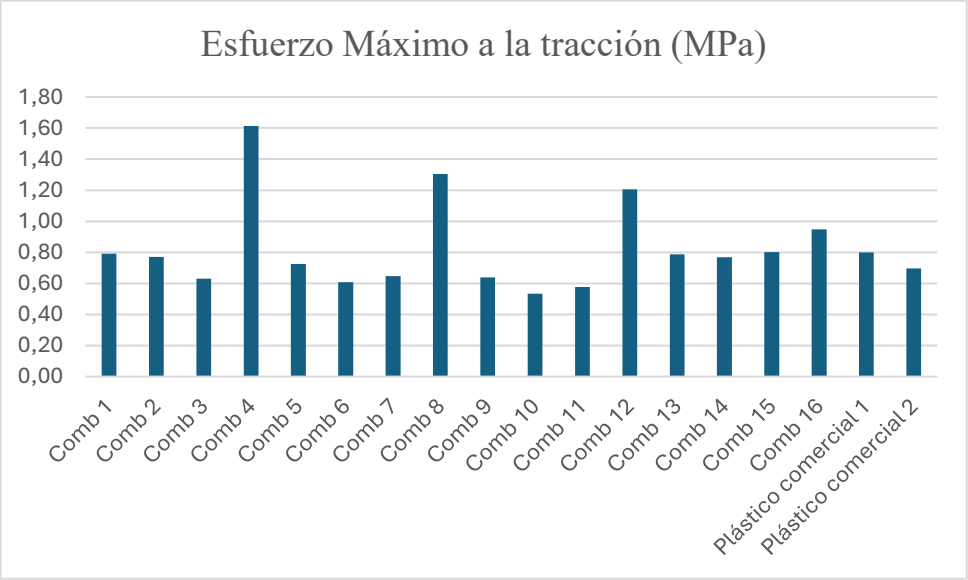


Fig 22. Gráfica de barras de la comparación de resultados de esfuerzo máximo a la tracción del bioplástico y plásticos comerciales.

La Fig 23, representa los valores promedios del módulo de elasticidad de las 16 combinaciones, junto con los valores promedios del módulo de elasticidad de los 2 plásticos comerciales (Polietileno Clorado y Polietileno).

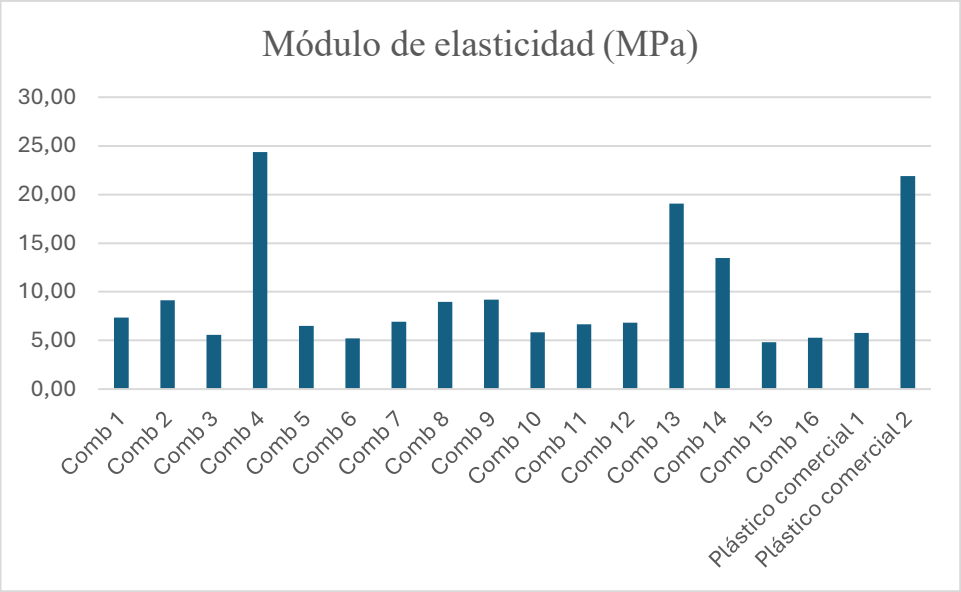


Fig 23. Gráfica de barras de la comparación de resultados del módulo de elasticidad del bioplástico y plásticos comerciales.

La Fig 24, representa los valores promedios del porcentaje de elongación de las 16 combinaciones y los 2 plásticos comerciales (Polietileno Clorado y Polietileno).

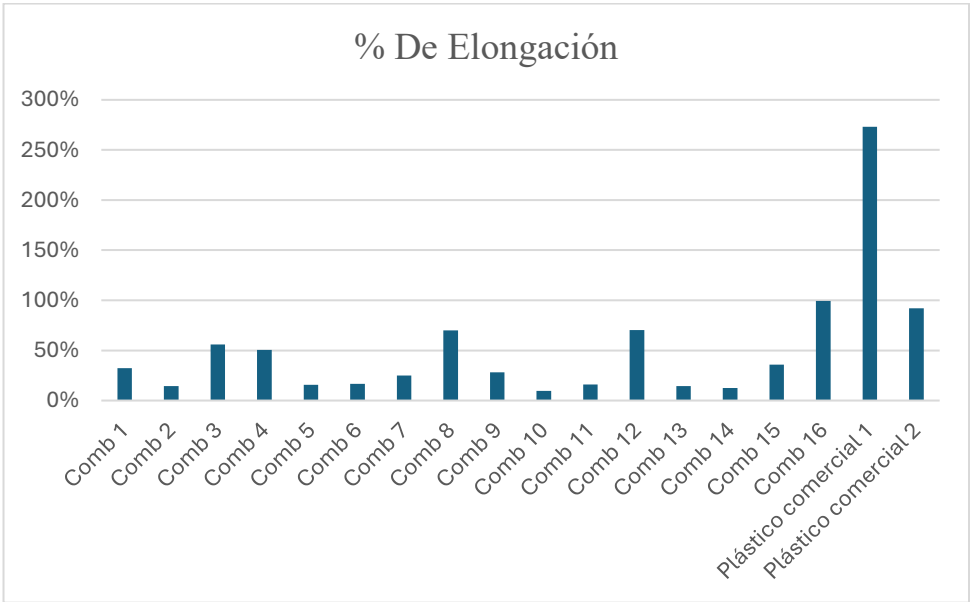


Fig 24. Gráfica de barras de la comparación de resultados de porcentaje de elongación del bioplástico y plásticos comerciales.

Los resultados de los ensayos de tracción de las 16 combinaciones de bioplástico y los plásticos comerciales evidenciaron que ciertas formulaciones del bioplástico presentaron mejores resultados en el esfuerzo máximo a la tracción y módulo de elasticidad a diferencia de los dos plásticos comerciales. La combinación 4 alcanzó el mayor esfuerzo máximo a la tracción con 1,61 MPa, superando a los plásticos comerciales (Polietileno Clorado y Polietileno) con 0,80 MPa y 0,70 MPa, lo que demuestra una mayor resistencia mecánica del bioplástico.

En el módulo de elasticidad, combinaciones como la número 4 con 24,36 MPa y la combinación 13 con 19,07 MPa evidenciaron resultados más elevados, superando a los valores expuestos por el plástico comercial 1 (Polietileno Clorado) y cercanos al plástico comercial 2 (Polietileno), esto dejando como evidencia una mayor rigidez estructural y resistencia a la deformación. Esto permite comparar el comportamiento del bioplástico con materiales plásticos utilizados en aplicaciones semirrígidas y de embalaje.

En cuanto al porcentaje de elongación, los resultados de los plásticos comerciales presentaron mayores valores debido a su alta flexibilidad. Sin embargo, la combinación 16 alcanzó una elongación de 99%, superando al plástico comercial 2 evidenciando su potencial de deformación antes de la fractura.

3.2.2. Comparación con los mejores resultados

Se escogieron los 3 mejores resultados de cada propiedad de ensayo de tracción del bioplástico, porcentaje de elongación, módulo de elasticidad y esfuerzo máximo a la tracción.

En la Fig 25, se presenta un diagrama de araña donde se agruparon los 3 mejores resultados del esfuerzo máximo a le tensión de las 16 combinaciones, en conjunto con los 2 valores de los plásticos comerciales (Polietileno Clorado y Polietileno).

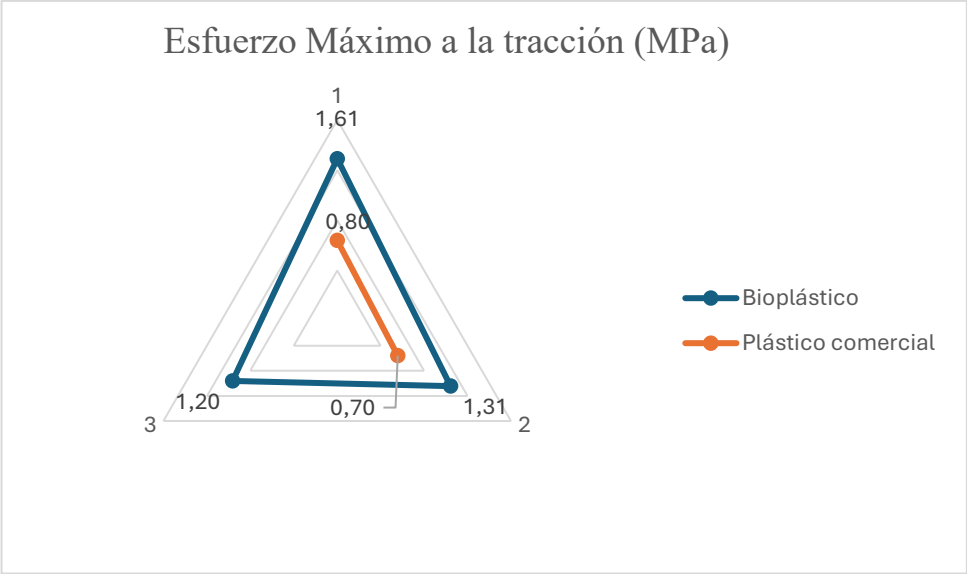


Fig 25. Gráfica radial de esfuerzo máximo a la tracción de los 3 mejores resultados del bioplástico vs plástico comercial.

En la Fig 26, se presenta un diagrama de araña donde se agruparon los 3 mejores resultados del módulo de elasticidad de las 16 combinaciones, en conjunto con los 2 valores de los plásticos comerciales (Polietileno Clorado y Polietileno).

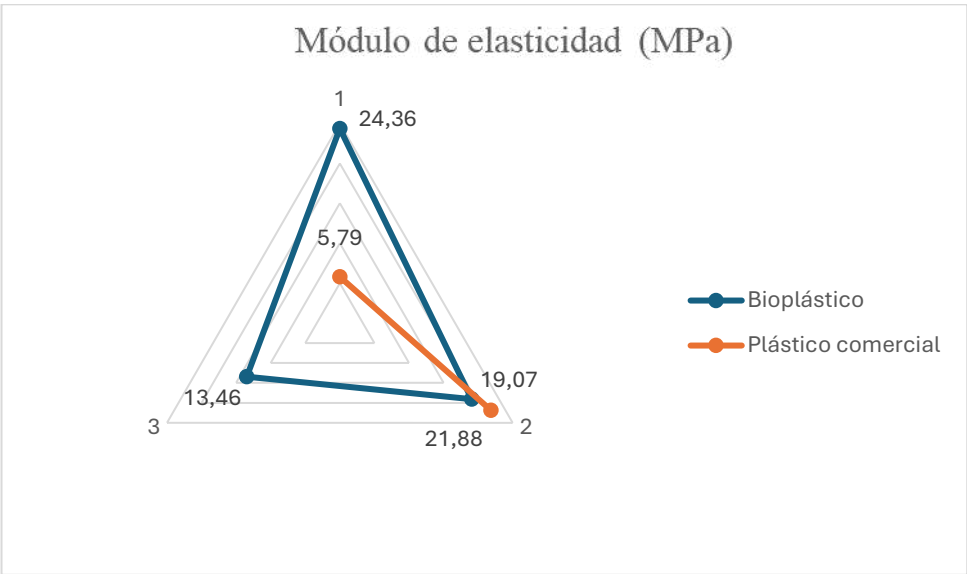


Fig 26. Gráfica radial del módulo de elasticidad de los 3 mejores resultados del bioplástico vs plástico comercial.

En la Fig 27, se presenta un diagrama de araña donde se agruparon los 3 mejores resultados del porcentaje de elongación de las 16 combinaciones, en conjunto con los 2 valores de los plásticos comerciales (Polietileno Clorado y Polietileno).

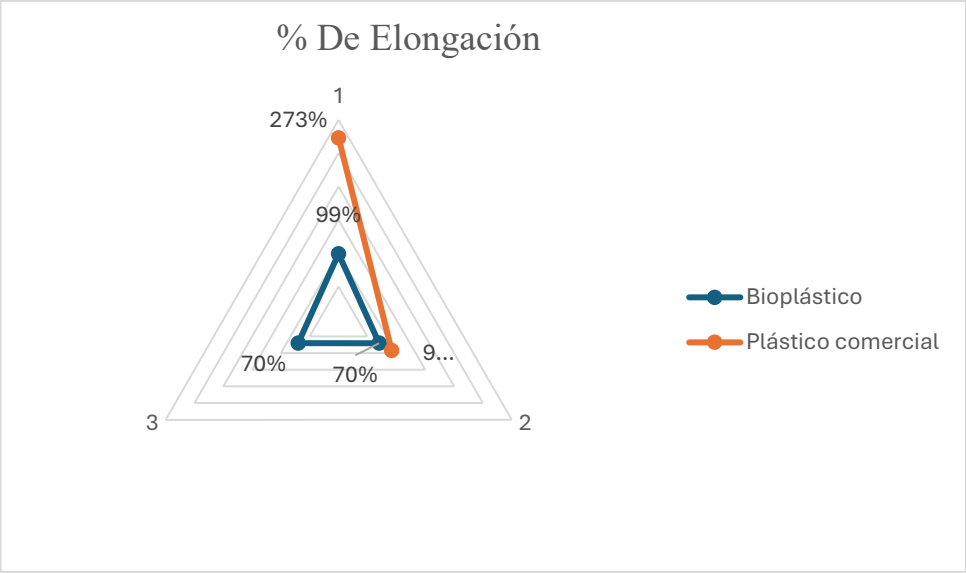


Fig 27. Gráfica radial del porcentaje de elongación de los 3 mejores resultados del bioplástico vs plástico comercial.

Tomando en cuenta los mejores resultados del esfuerzo máximo a la tracción, se evidencio que la combinación 4 con 1,61 MPa presentó el valor más alto entre todas las combinaciones realizadas, superando la resistencia de los plásticos comerciales evaluados. Esto deja en evidencia que ciertas combinaciones del bioplástico poseen una alta capacidad para soportar esfuerzos mecánicos.

Las combinaciones 4, 13, 14, con 24,36MPa, 19,07 MPa, 13,46 MPa respectivamente resaltaron en los mejores resultados para el módulo de elasticidad, superando al plástico comercial 1(Polietileno Clorado) con 5,79 MPa y cercanos a los valores del plástico comercial 2 (Polietileno) con 21,88 MPa, mostrando una mayor rigidez y estabilidad estructural del bioplástico.

Para el porcentaje de elongación, el plástico comercial 1 (Polietileno Clorado) presentó el valor más alto con 273 % gracias a sus características altamente flexibles. Mientras que la combinación 16 presento los mejores resultados entre los bioplásticos, alcanzando una elongación de 99%, valor que supera al plástico comercial 2

(Polietileno) con 92%, mostrando un mejoramiento en la flexibilidad del biopolímero por esta combinación.

3.2.3. Resultados de biodegradabilidad bajo condiciones controladas

Se estima que la biodegradabilidad al 100% para todas las probetas en condiciones controladas se produce de los 64 a los 80 días.

En la TABLA XLII, se muestran los resultados de las 16 combinaciones de los ensayos de biodegradabilidad, sobresaliendo las combinaciones 9, 10 y 12, alcanzando perdidas de masa del 93%, 92% y 89,5% respectivamente en 48 días, demostrando una rápida degradación del bioplástico frente a la acción microbiana presente.

En comparación con plásticos comerciales convencionales, el bioplástico presenta tiempos de degradación considerablemente bajos, evidenciando una ventaja ambiental importante frente a plásticos derivados del petróleo.

TABLA XLII

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE BIODEGRADABILIDAD EN CONDICIONES CONTROLADAS

Combinaciones	Peso final (g)	T. Degr. Final (%)
Comb 1	0,29	85,5
Comb 2	0,4	80
Comb 3	0,44	78
Comb 4	0,47	76,5
Comb 5	0,49	75,5
Comb 6	0,61	69,5
Comb 7	0,5	75
Comb 8	0,37	81,5
Comb 9	0,14	93
Comb 10	0,16	92
Comb 11	0,26	87
Comb 12	0,21	89,5
Comb 13	0,42	79
Comb 14	0,4	80
Comb 15	0,55	72,5
Comb 16	0,5	75

En la Fig 28, se muestran los resultados del peso final en (g) del ensayo de biodegradabilidad bajo condiciones controladas hasta el día 48.

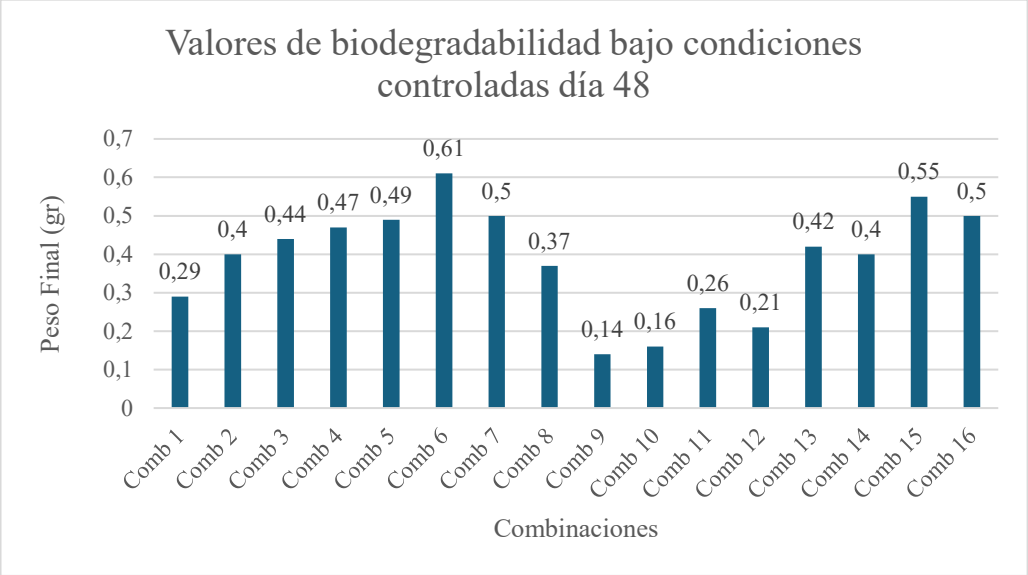


Fig 28. Gráfica de barras del peso final en (g) de biodegradabilidad bajo condiciones controladas hasta el día 48.

En la Fig 29, se muestran los resultados de la tasa de biodegradabilidad en (%) del ensayo de biodegradabilidad bajo condiciones controladas hasta el día 48.

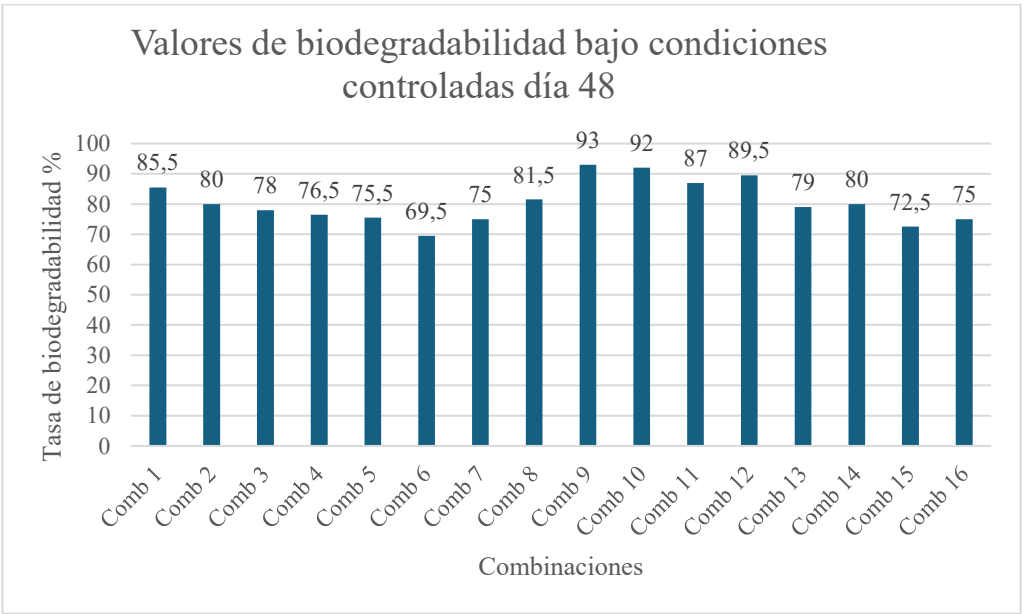


Fig 29. Gráfica de barras de tasa de degradación bajo condiciones controladas hasta el día 48.

3.2.4. Resultados y discusión de biodegradabilidad al ambiente

Se estima que la biodegradabilidad al 100% de todas las probetas del ensayo de biodegradación al medio ambiente.

En la TABLA XLIII, se muestran los resultados de las 16 combinaciones de los ensayos de biodegradabilidad al ambiente, sobresaliendo las combinaciones 9, 1 y 11, alcanzando perdidas de masa del 95%, 88.5% y 84,5% respectivamente en 48 días, demostrando una rápida degradación del bioplástico frente a la acción microbiana presente.

En comparación con plásticos comerciales convencionales, el bioplástico presenta tiempos de degradación considerablemente bajos incluso bajo condiciones ambientales.

TABLA XLIII

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE BIODEGRADABILIDAD EN CONDICIONES DEL MEDIO AMBIENTE.

Combinaciones	Peso final (g)	T. Degr. Final (%)
Comb 1	0,23	88,5
Comb 2	0,31	84,5
Comb 3	0,48	76
Comb 4	0,51	74,5
Comb 5	0,67	66,5
Comb 6	0,69	65,5
Comb 7	0,66	67
Comb 8	0,61	69,5
Comb 9	0,1	95
Comb 10	0,5	75
Comb 11	0,31	84,5
Comb 12	0,33	83,5
Comb 13	0,6	70
Comb 14	0,56	72
Comb 15	0,5	75
Comb 16	0,37	81,5

En la Fig 30, se muestran los resultados del peso final en (g) del ensayo de biodegradabilidad al medio ambiente hasta el día 48.

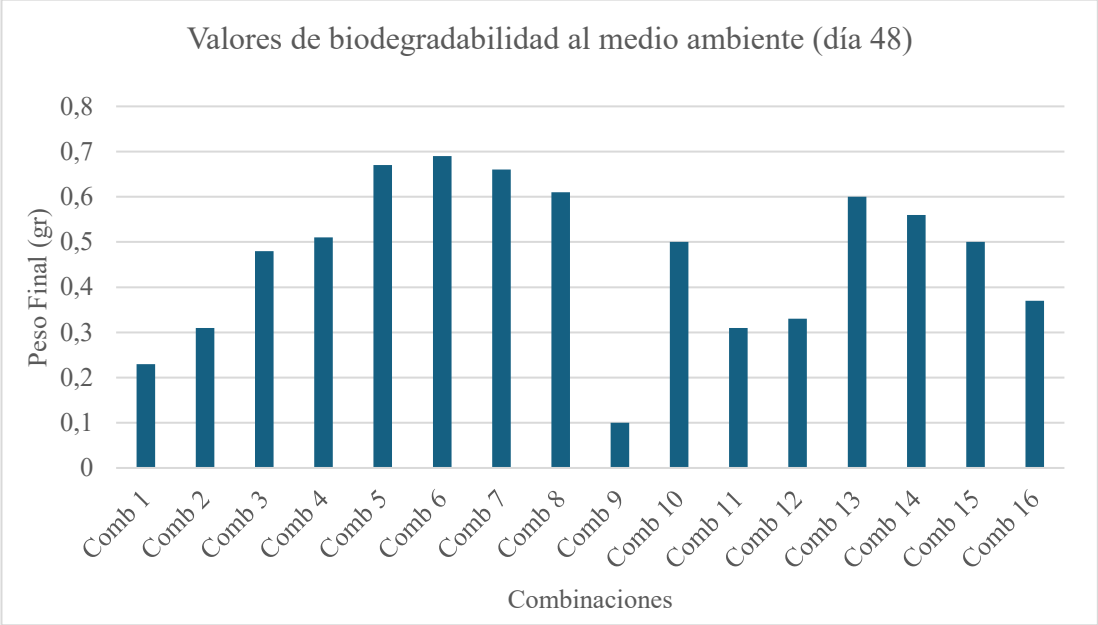


Fig 30. Gráfica de barras del peso final en (g) de biodegradabilidad al medio ambiente hasta el día 48.

En la Fig 31, se muestran los resultado de la tasa de degradación en (%) del ensayo de biodegradabilidad al medio ambiente hasta el día 48.

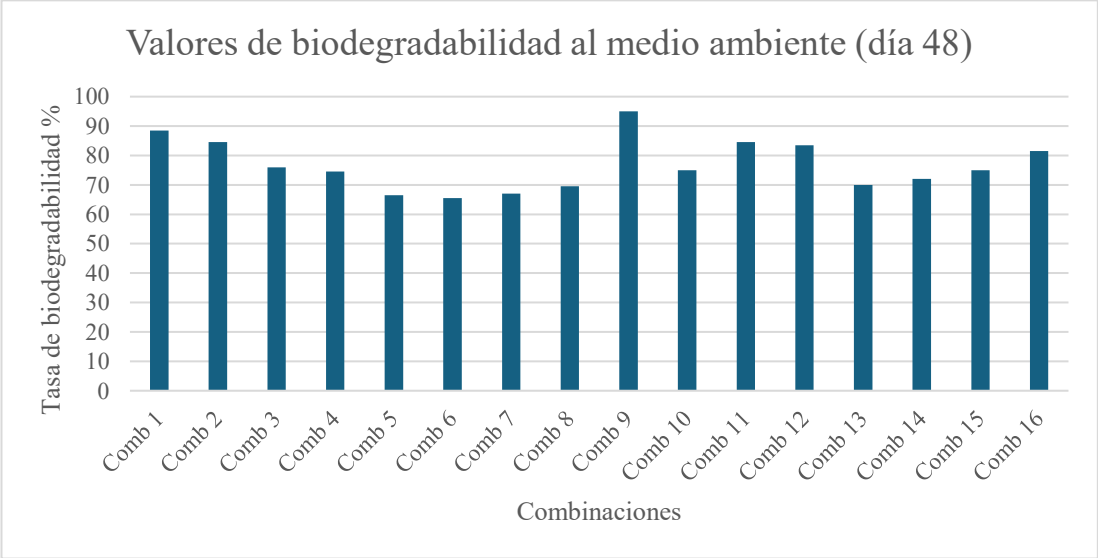


Fig 31. Gráfica de barras de la tasa de degradación al medio ambiente hasta el día 48.

3.3. Análisis de optimización de datos

3.3.1. Análisis de datos (Matriz de datos)

En base a los ensayos desarrollados, para empezar, se presenta la matriz de diseño, de 16 combinaciones, generada de acuerdo con los factores y niveles de estudio, esta matriz y su correspondiente codificación se muestran en la TABLA XLIV y TABLA XLV, respectivamente.

TABLA XLIV

MATRIZ DE DISEÑO PARA EL DISEÑO POR MEZCLAS

Comb.	Almidón (%)	Gelatina (%)	Temp (°C)	Tiempo (min)
1	1	0	40	5
2	0,75	0,25	40	5
3	0,5	0,5	40	5
4	0,25	0,75	40	5
5	1	0	60	5
6	0,75	0,25	60	5
7	0,5	0,5	60	5
8	0,25	0,75	60	5
9	1	0	40	10
10	0,75	0,25	40	10
11	0,5	0,5	40	10
12	0,25	0,75	40	10
13	1	0	60	10
14	0,75	0,25	60	10
15	0,5	0,5	60	10
16	0,25	0,75	60	10

TABLA XLV

CODIFICACIÓN DE LOS NIVELES DE LAS VARIABLES PARA EL DISEÑO POR MEZCLAS

	Niveles		Unidades		Niveles		Unidades
	0	1			5	10	
Almidón	0	7,182	Gramos	**Temperatura**	40	60	G. centígrados.
Gelatina	0	7,182	Gramos	**Tiempo**	5	10	Minutos

Se disponen los datos en la matriz de diseño generada, cada una de las combinaciones las tres replicas, estos datos de muestran en la TABLA XLVI.

TABLA XLVI

COMBINACIONES Y VALORES DE LAS PROPIEDADES

Comb.	Propiedades a Tracción			Ensayo Biodegradabilidad			
				Param. Controlados		Ambiente. No Controlados.	
	Esf. Máx. (MPa)	Mód. Elast. (MPa)	Elong. (%)	Biodeg. (g)	Degrad. (%)	Biodeg. (g)	Degrad. (%)
1	0,887	9,399	0,232	0,10	95,0	0,24	88,0
1	0,710	7,070	0,296	0,12	94,0	0,23	88,5
1	0,774	5,571	0,438	0,14	93,0	0,22	89,0
2	0,895	9,776	0,119	0,39	80,5	0,32	84,0
2	1,031	10,401	0,227	0,40	80,0	0,31	84,5
2	0,384	0,158	0,087	0,41	79,5	0,30	85,0
3	0,721	6,290	0,602	0,43	78,5	0,49	75,5
3	0,522	3,250	0,767	0,44	78,0	0,48	76,0
3	0,649	7,190	0,305	0,45	77,5	0,47	76,5
4	1,544	26,180	0,594	0,46	77,0	0,52	74,0
4	1,725	25,037	0,315	0,47	76,5	0,51	74,5
4	1,574	21,857	0,601	0,48	76,0	0,50	75,0
5	0,665	2,546	0,239	0,48	76,0	0,68	66,0
5	0,676	9,563	0,104	0,49	75,5	0,67	66,5

5	0,832	7,373	0,132	0,50	75,0	0,66	67,0
6	0,689	7,271	0,159	0,60	70,0	0,70	65,0
6	0,546	5,072	0,165	0,61	69,5	0,69	65,5
6	0,588	3,342	0,178	0,62	69,0	0,68	66,0
7	0,615	9,598	0,106	0,49	75,5	0,67	66,5
7	0,641	5,349	0,357	0,50	75,0	0,66	67,0
7	0,681	5,791	0,284	0,51	74,5	0,65	67,5
8	1,152	8,148	0,384	0,36	82,0	0,62	69,0
8	1,550	11,615	0,836	0,37	81,5	0,61	69,5
8	1,213	7,117	0,882	0,38	81,0	0,60	70,0
9	0,689	6,622	0,406	0,15	92,5	0,11	94,5
9	0,522	8,675	0,288	0,14	93,0	0,10	95,0
9	0,705	12,284	0,151	0,13	93,5	0,09	95,5
10	0,620	7,471	0,100	0,17	91,5	0,51	74,5
10	0,538	5,628	0,109	0,16	92,0	0,50	75,0
10	0,445	4,424	0,078	0,15	92,5	0,49	75,5
11	0,644	8,927	0,163	0,27	86,5	0,32	84,0
11	0,527	5,060	0,157	0,26	87,0	0,31	84,5
11	0,559	5,958	0,159	0,25	87,5	0,30	85,0
12	1,293	4,696	0,964	0,22	89,0	0,34	83,0
12	1,245	8,220	0,502	0,21	89,5	0,33	83,5
12	1,076	7,535	0,640	0,20	90,0	0,32	84,0
13	0,978	20,404	0,072	0,43	78,5	0,61	69,5
13	0,721	17,552	0,071	0,42	79,0	0,60	70,0
13	0,660	19,255	0,289	0,41	79,5	0,59	70,5
14	0,872	15,299	0,127	0,41	79,5	0,57	71,5
14	0,787	12,322	0,135	0,40	80,0	0,56	72,0
14	0,644	12,770	0,112	0,39	80,5	0,55	72,5
15	0,652	2,353	0,293	0,56	72,0	0,51	74,5
15	1,216	7,020	0,656	0,55	72,5	0,50	75,0
15	0,535	5,064	0,123	0,54	73,0	0,49	75,5
16	1,118	2,843	1,269	0,51	74,5	0,38	81,0

16	0,612	4,472	0,741	0,50	75,0	0,37	81,5
16	1,110	8,472	0,968	0,49	75,5	0,36	82,0

Con la información contenida en la tabla anterior se efectúa el análisis de cada una de las propiedades en base al diseño empleado.

3.4. Análisis del Esfuerzo Máximo a la Tracción

La primera propiedad analizada es el Esfuerzo máximo a la tracción, para este proceso se parte de la revisión de los supuestos paramétricos: Normalidad, igualdad de varianza de los tratamientos e independencia de las observaciones.

3.4.1. Revisión de supuestos paramétricos

La revisión de los supuestos paramétricos se la efectúa en los residuos de los datos. Estos supuestos se verifican con la revisión de las gráficas presentadas a continuación.

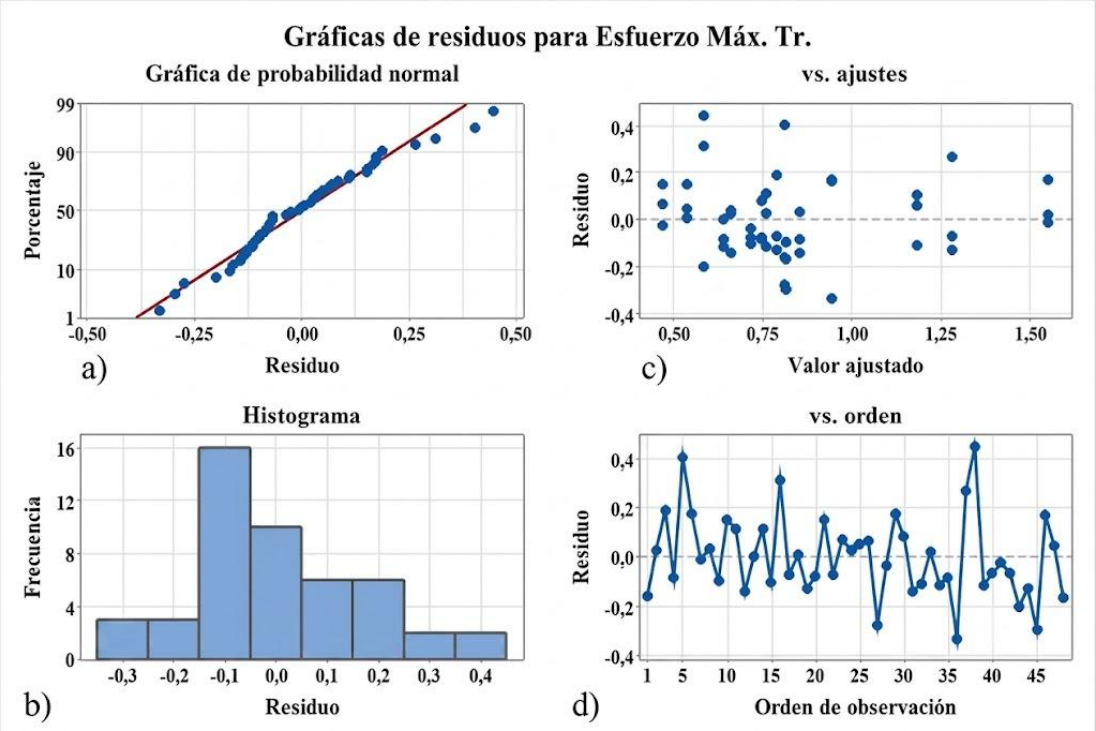


Fig 32. Gráficas de residuos para el Esfuerzo a Tracción.

De acuerdo con la información contenida en las gráficas presentadas se pudo dar por verificados los supuestos en base a los siguientes criterios:

La gráfica a), se define como gráfica de probabilidad normal, en esta, los residuos se distribuyen sobre la línea normal, con ligeras desviaciones en los extremos; además la gráfica b), el histograma, se muestran las barras de frecuencia con una concentración de datos alrededor de la media de residuos, con una ligera desviación respecto al valor nulo, lo cual marca una tendencia similar a la del gráfico de la probabilidad normal. Con esto se entiende que, los datos provienen de una distribución normal, localizándose dentro del margen aceptable.

La grafica c), de residuos versus ajustes, en la que los residuos se distribuyen homogéneamente alrededor de una franja horizontal, próximos al valor medio de cero, lo que se entiende que, a pesar del incremento o disminución de los ajustes, los residuos se mantienen contantes. Con esto se infiere que, la varianza de los tratamientos es igual.

Finalmente, la gráfica d), la de residuos versus orden, al no evidenciar que se trace un patrón claramente definido, se encuentra que los datos se distribuyen de manera aleatoria sobre la gráfica. Con esto se entiende que, los datos son independientes entre sí, con lo que se verificaría el tercer y último de los supuestos paramétricos.

3.4.2. Análisis de la varianza

Con la verificación de los supuestos paramétricos, se tiene una alta confiabilidad en los resultados que se obtienen con el análisis de la varianza del Esfuerzo máximo a la tracción, en ese sentido, se presenta la tabla ANOVA descrita a continuación.

TABLA XLVII

ANÁLISIS DE LA VARIANZA DEL ESFUERZO A LA TRACCIÓN

Fuente	**GL**	**SC Ajust.**	**MC Ajust.**	**Valor F**	**Valor p**
Regresión	11	3,693	0,336	9,38	0,000
Lineal	1	1,521	2,843	79,39	0,000
Temperatura	1	0,006	0,213	5,94	0,020
Tiempo	1	0,130	0,306	8,54	0,006
Cuadrático					
Almidón*Gelatina	1	1,343	1,343	37,50	0,000

Almidón*Temperatura	1	0,118	0,236	6,60	0,014
Almidón*Tiempo	1	0,129	0,276	7,70	0,009
Cúbico especial					
Almidón*Gelatina*Temperatura	1	0,119	0,119	3,32	0,077
Almidón*Gelatina*Tiempo	1	0,146	0,146	4,09	0,051
Almidón*Temperatura*Tiempo	1	0,158	0,043	1,20	0,280
Gelatina*Temperatura*Tiempo	1	0,001	0,014	0,38	0,541
Cuártica					
Almidón*Gelatina*Temperatura*Tiempo	1	0,022	0,022	0,60	0,442
Error residual	36	1,289	0,036		
Falta de ajuste	4	0,294	0,073	2,36	0,074
Error puro	32	0,995	0,031		
Total	47	4,982			

Con la aplicación del análisis de la varianza se genera un modelo matemático de regresión que acopla los datos del Esfuerzo a la Tracción a una línea estándar, para poder predecir y entender el comportamiento de cada uno de los parámetros, en ese sentido, el modelo generado explica la variabilidad de los datos del Esfuerzo a la Tracción en un 74,13%, este parámetro se define como el coeficiente de determinación.

En el análisis de la varianza se muestra el valor de la significancia calculada (valor-p) de cada uno de los componentes del modelo generado, con ello se evidencia lo relevantes que son los términos lineales, cuadráticos, sin embargo, los términos cúbicos especiales y cuárticos no son relevantes para el modelo.

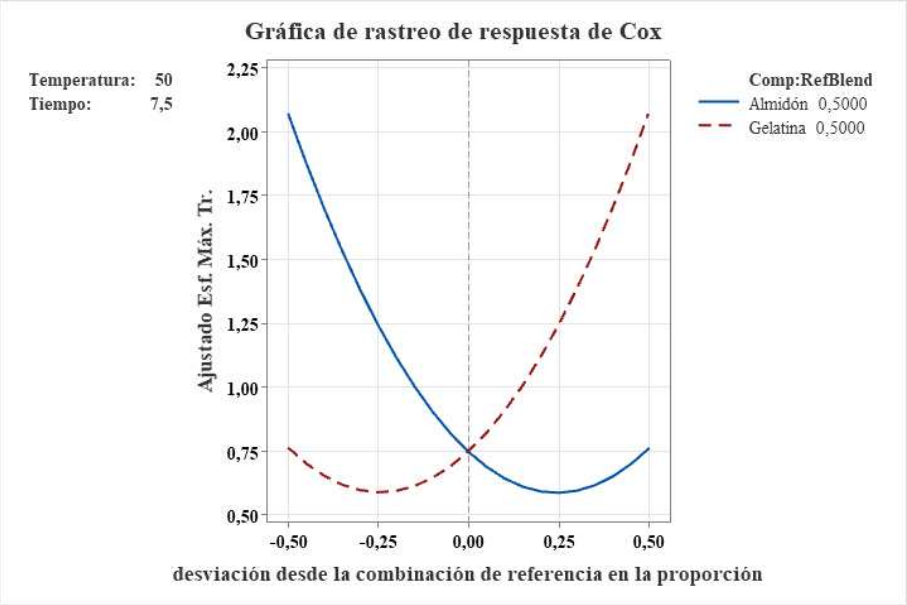
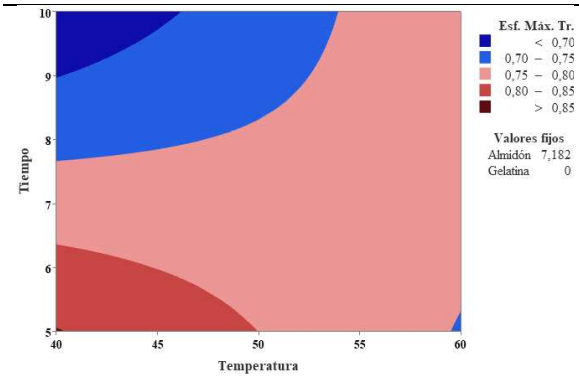
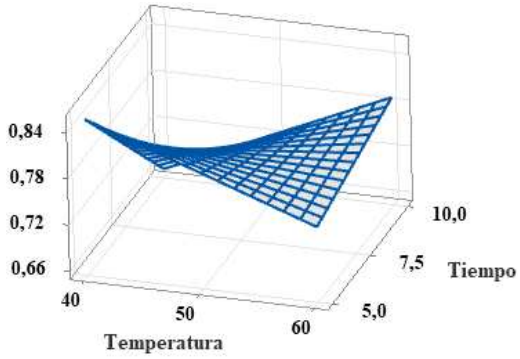


Fig 33. Gráfica de trazas para el Esfuerzo a la Tracción.

Para analizar el comportamiento de los parámetros y entender la importancia relativa de estos, se revisa la gráfica de trazas para el Esfuerzo a la Tracción, en la que se visualiza que, el o los parámetros que tienen mayor relevancia sobre la propiedad analizada, en este caso son tanto el Almidón y la Gelatina.

TABLA XLVIII

GRÁFICAS DE CONTORNO Y DE SUPERFICIE DEL ESFUERZO A LA TRACCIÓN

Gráficas de contorno	**Gráficas de superficie**
	

Con el modelo de regresión generado tras el análisis de la varianza del Esfuerzo a la Tracción, se construyen la gráfica de contorno y la gráfica de superficie, estas se presentan en la TABLA XLVIII. En las gráficas se puede revisar de acuerdo con la gama de colores que, las marcas que presentan una tonalidad roja mantienen valores

elevados de la propiedad analizada, además, se tiene una disposición del modelo en tres dimensiones lo que hace más notorio el punto donde se obtienen mejores valores de la propiedad.

En ese sentido, se nota un incremento en los valores del Esfuerzo a la Tracción cuando se emplea un menor tiempo y menor temperatura.

3.4.3. Optimización individual

Para finalizar el Análisis del Esfuerzo a la Tracción, se efectúa el proceso de optimización, con el que se vinculan los cuatro parámetros de estudio de manera colectiva.

TABLA XLIX

OPTIMIZACIÓN DEL ESFUERZO A LA TRACCIÓN

Parámetros		**Propiedades**	
Almidón	1,7955 g	Esfuerzo Máximo a la Tracción	1,5521 MPa
Gelatina	5,3865 g		
Temperatura	40 °C		
Tiempo	5 min		

Con este análisis se entiende que, la combinación que brinda mejores valores de la propiedad mecánica analizada es la que involucra los siguientes parámetros: almidón con 1,7955 gramos, gelatina con 5,3865 gramos, temperatura a 40°C y con un tiempo de 5 minutos, con lo que se obtiene un esfuerzo a la tracción de 1,5521 MPa.

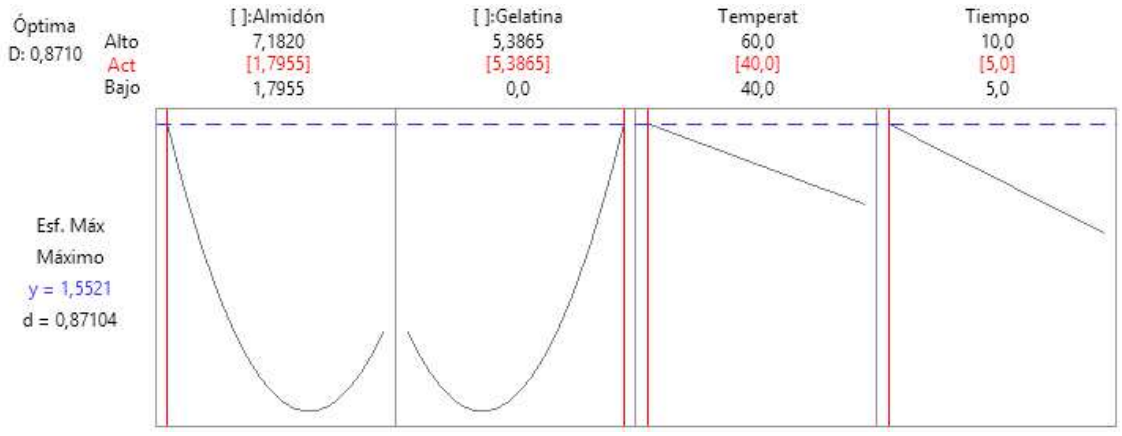


Fig 34. Gráfica de optimización del Esfuerzo Máximo a la Tracción.

3.5. Análisis del Módulo de Elasticidad a la Tracción

En este apartado se va a analizar el Módulo de Elasticidad a la Tracción, para este proceso, al igual que en la propiedad anterior, se parte de la revisión de los supuestos paramétricos: Normalidad, igualdad de varianza de los tratamientos e independencia de las observaciones.

3.5.1. Revisión de supuestos paramétricos

La revisión de los supuestos paramétricos se la efectúa en los residuos de los datos. Estos supuestos se verifican con la revisión de las gráficas presentadas a continuación.

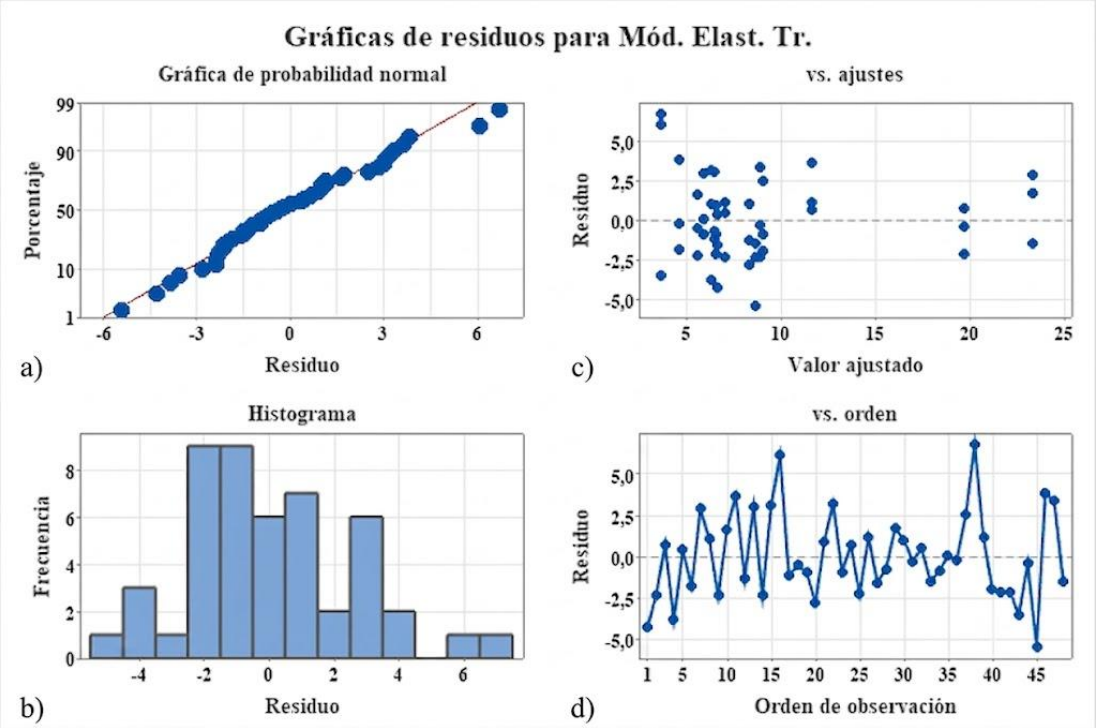


Fig 35. Gráficas de residuos para el Módulo de Elasticidad a la Tracción.

De acuerdo con la información contenida en las gráficas presentadas se pude dar por verificados los supuestos en base a los siguientes criterios:

La gráfica a), se define como gráfica de probabilidad normal, en esta, los residuos se distribuyen sobre la línea normal, con ligeras desviaciones en los extremos; además la gráfica b), el histograma, se muestran las barras de frecuencia con una concentración de datos alrededor de la media de residuos, con una ligera desviación respecto al valor

nulo, lo cual marca una tendencia similar a la del gráfico de la probabilidad normal. Con esto se entiende que, los datos provienen de una distribución normal, localizándose dentro del margen aceptable.

La gráfica c), de residuos versus ajustes, en la que los residuos se distribuyen homogéneamente alrededor de una franja horizontal, próximos al valor medio de cero, lo que se entiende que, a pesar del incremento o disminución de los ajustes, los residuos se mantienen contantes. Con esto se infiere que, la varianza de los tratamientos es igual.

Finalmente, la gráfica d), la de residuos versus orden, al no evidenciar que se trace un patrón claramente definido, se encuentra que los datos se distribuyen de manera aleatoria sobre la gráfica. Con esto se entiende que, los datos son independientes entre sí, con lo que se verificaría el tercer y último de los supuestos paramétricos.

3.5.2. Análisis de la varianza

Con la verificación de los supuestos paramétricos, se tiene una alta confiabilidad en los resultados que se obtienen con el análisis de la varianza del Módulo de Elasticidad a la Tracción, en ese sentido, se presenta la tabla ANOVA descrita a continuación.

TABLA L

ANÁLISIS DE LA VARIANZA DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD A LA TRACCIÓN

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	11	1269,19	115,381	13,35	0,000
Lineal	1	0,24	115,148	13,32	0,001
Temperatura	1	1,04	144,124	16,67	0,000
Tiempo	1	0,06	198,763	22,99	0,000
Cuadrático					
Almidón*Gelatina	1	194,90	194,898	22,55	0,000
Almidón*Temperatura	1	267,79	233,079	26,96	0,000
Almidón*Tiempo	1	498,63	365,177	42,25	0,000
Cúbico especial					
Almidón*Gelatina*Temperatura	1	34,18	34,178	3,95	0,054

Almidón*Gelatina*Tiempo	1	32,10	32,099	3,71	0,062
Almidón*Temperatura*Tiempo	1	151,84	128,069	14,82	0,000
Gelatina*Temperatura*Tiempo	1	23,75	87,724	10,15	0,003
Cuártica					
Almidón*Gelatina*Temperatura*Tiempo	1	64,67	64,674	7,48	0,010
Error residual	36	311,19	8,644		
Falta de ajuste	4	90,33	22,583	3,27	0,023
Error puro	32	220,85	6,902		
Total	47	1580,38			

Con la aplicación del análisis de la varianza se genera un modelo matemático de regresión que acopla los datos del Módulo de Elasticidad a la Tracción a una línea estándar, para poder predecir y entender el comportamiento de cada uno de los parámetros, en ese sentido, el modelo generado explica la variabilidad de los datos del Módulo de Elasticidad a la Tracción en un 80,31%, este parámetro se define como el coeficiente de determinación.

En el análisis de la varianza se muestra el valor de la significancia calculada (valor-p) de cada uno de los componentes del modelo generado, con ello se evidencia lo relevantes que son los términos lineales, cuadráticos, sin embargo, los términos cúbicos especiales y cuárticos no son relevantes para el modelo.

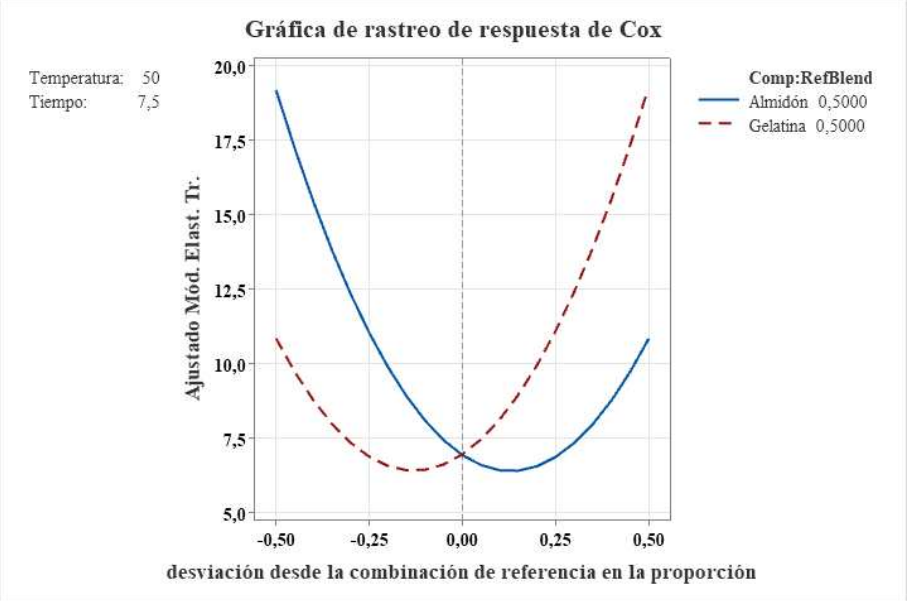
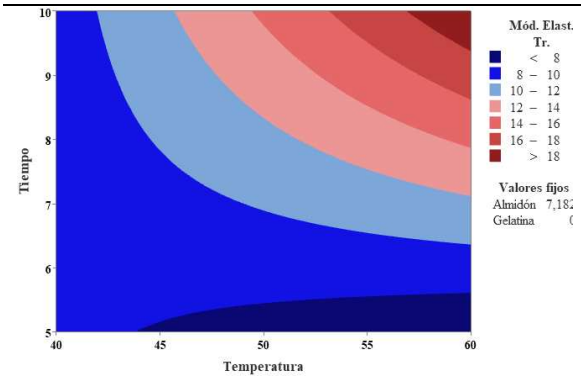
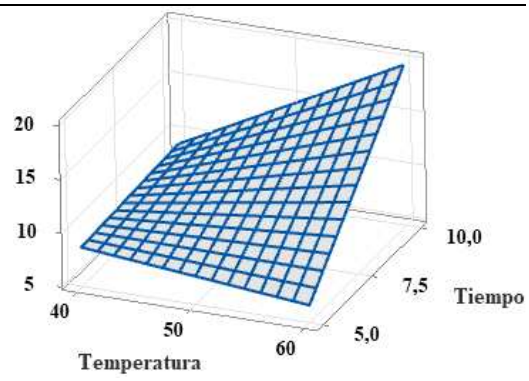


Fig 36. Gráfica de trazas para el Módulo de Elasticidad a la Tracción.

Para analizar el comportamiento de los parámetros y entender la importancia relativa de estos, se revisa la gráfica de trazas para el Módulo de Elasticidad a la Tracción, en la que se visualiza que, el o los parámetros que tienen mayor relevancia sobre la propiedad analizada, en este caso son tanto el Almidón y la Gelatina.

TABLA LI

GRÁFICAS DE CONTORNO Y DE SUPERFICIE DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD A LA TRACCIÓN

Graficas de contorno	**Graficas de superficie**
	

Con el modelo de regresión generado tras el análisis de la varianza del Módulo de Elasticidad a la Tracción, se construyen la gráfica de contorno y la gráfica de superficie, estas se presentan en la tabla antes mostrada. En las gráficas se puede revisar de acuerdo con la gama de colores que, las marcas que presentan una tonalidad roja mantienen valores elevados de la propiedad analizada, además, se tiene una disposición del modelo en tres dimensiones lo que hace más notorio el punto donde se obtienen mejores valores de la propiedad.

En ese sentido, se nota un incremento en los valores del Módulo de Elasticidad a la Tracción cuando se emplea un menor tiempo y menor temperatura.

3.5.3. Optimización individual

Para finalizar el Análisis del Módulo de Elasticidad a la Tracción, se efectúa el proceso de optimización, con el que se vinculan los cuatro parámetros de estudio de manera colectiva.

TABLA LII

OPTIMIZACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD A LA TRACCIÓN

Parámetros		Propiedades	
Almidón	1,7955 g	Módulo de Elasticidad a la Tracción	23,3272 MPa
Gelatina	5,3865 g		
Temperatura	40 °C		
Tiempo	5 min		

Con este análisis se entiende que, la combinación que brinda mejores valores de la propiedad mecánica analizada es la que involucra los siguientes parámetros: almidón con 1,7955 gramos, gelatina con 5,3865 gramos, temperatura a 40°C y con un tiempo de 5 minutos, con lo que se obtiene un Módulo de Elasticidad a la Tracción de 23,3272 MPa.

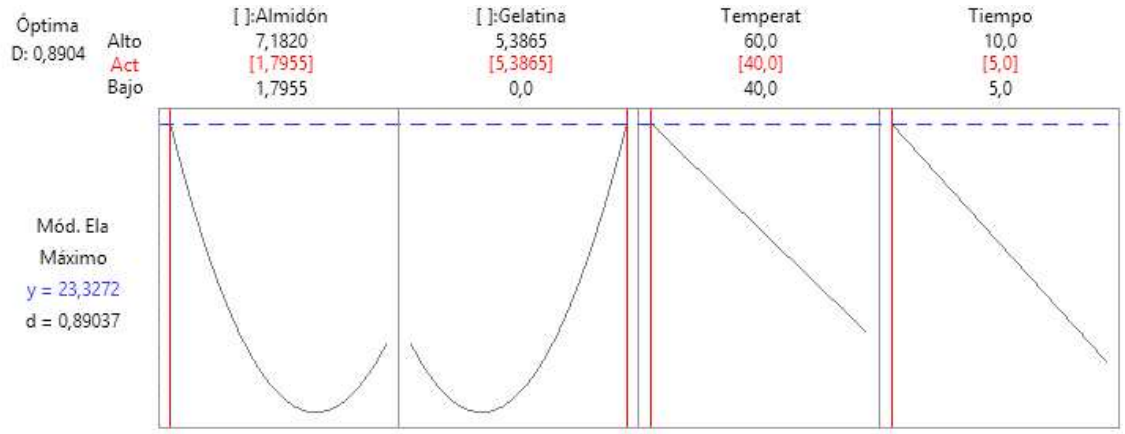


Fig 37. Gráfica de optimización del Módulo de Elasticidad a la Tracción.

3.6. Análisis de la Elongación

En este apartado se va a analizar la Elongación, para este proceso, al igual que en la propiedad anterior, se parte de la revisión de los supuestos paramétricos: Normalidad, igualdad de varianza de los tratamientos e independencia de las observaciones.

3.6.1. Revisión de supuestos paramétricos

La revisión de los supuestos paramétricos se la efectúa en los residuos de los datos. Estos supuestos de verifican con la revisión de las gráficas presentadas a continuación.

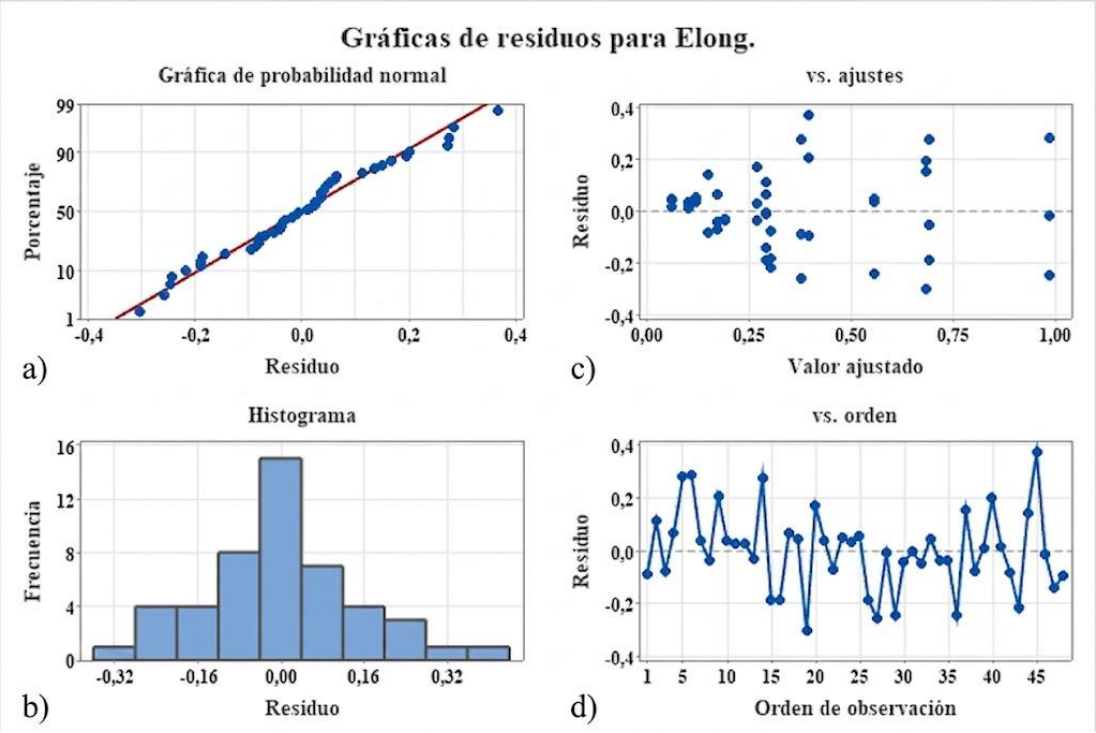


Fig 38. Gráficas de residuos para la Elongación.

De acuerdo con la información contenida en las gráficas presentadas se pude dar por verificados los supuestos en base a los siguientes criterios:

La gráfica a), se define como gráfica de probabilidad normal, en esta, los residuos se distribuyen sobre la línea normal, con ligeras desviaciones en los extremos; además la gráfica c), el histograma, se muestran las barras de frecuencia con una concentración de datos alrededor de la media de residuos, con una ligera desviación respecto al valor nulo, lo cual marca una tendencia similar a la del gráfico de la probabilidad normal. Con esto se entiende que, los datos provienen de una distribución normal, localizándose dentro del margen aceptable.

La gráfica c), de residuos versus ajustes, en la que los residuos se distribuyen homogéneamente alrededor de una franja horizontal, próximos al valor medio de cero, lo que se entiende que, a pesar del incremento o disminución de los ajustes, los residuos se mantienen contantes. Con esto se infiere que, la varianza de los tratamientos es igual.

Finalmente, la gráfica d), la de residuos versus orden, al no evidenciar que se trace un patrón claramente definido, se encuentra que los datos se distribuyen de manera

aleatoria sobre la gráfica. Con esto se entiende que, los datos son independientes entre sí, con lo que se verificaría el tercer y último de los supuestos paramétricos.

3.6.2. Análisis de la varianza

Con la verificación de los supuestos paramétricos, se tiene una alta confiabilidad en los resultados que se obtienen con el análisis de la varianza de la Elongación, en ese sentido, se presenta la tabla ANOVA descrita a continuación.

TABLA LIII

ANÁLISIS DE LA VARIANZA DE LA ELONGACIÓN

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	11	2,95375	0,26852	9,21	0,000
Lineal	1	1,71865	2,25987	77,50	0,000
Temperatura	1	0,00300	0,07651	2,62	0,114
Tiempo	1	0,00054	0,18810	6,45	0,016
Cuadrático					
Almidón*Gelatina	1	0,71284	0,71284	24,45	0,000
Almidón*Temperatura	1	0,18224	0,13229	4,54	0,040
Almidón*Tiempo	1	0,07754	0,20189	6,92	0,012
Cúbico especial					
Almidón*Gelatina*Temperatura	1	0,01127	0,01127	0,39	0,538
Almidón*Gelatina*Tiempo	1	0,12515	0,12515	4,29	0,046
Almidón*Temperatura*Tiempo	1	0,03778	0,00165	0,06	0,813
Gelatina*Temperatura*Tiempo	1	0,05577	0,00240	0,08	0,776
Cuártica					
Almidón*Gelatina*Temperatura*Tiempo	1	0,02898	0,02898	0,99	0,325
Error residual	36	1,04968	0,02916		
Falta de ajuste	4	0,19262	0,04815	1,80	0,154
Error puro	32	0,85706	0,02678		
Total	47	4,00343			

Con la aplicación del análisis de la varianza se genera un modelo matemático de regresión que acopla los datos de la Elongación a una línea estándar, para poder predecir y entender el comportamiento de cada uno de los parámetros, en ese sentido, el modelo generado explica la variabilidad de los datos de la Elongación en un 73,78%, este parámetro se define como el coeficiente de determinación.

En el análisis de la varianza se muestra el valor de la significancia calculada (valor-p) de cada uno de los componentes del modelo generado, con ello se evidencia lo relevantes que son los términos lineales, cuadráticos, sin embargo, los términos cúbicos especiales y cuárticos no son relevantes para el modelo.

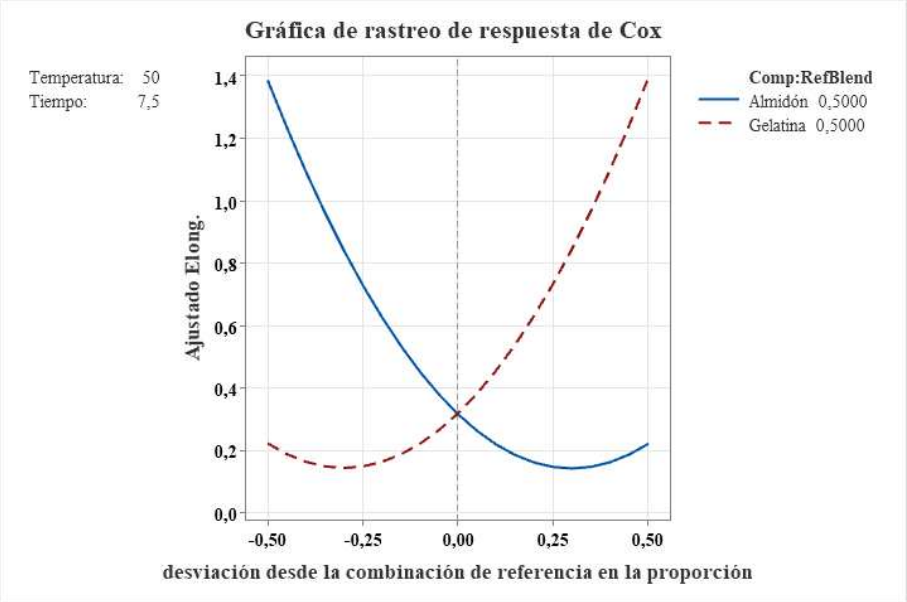
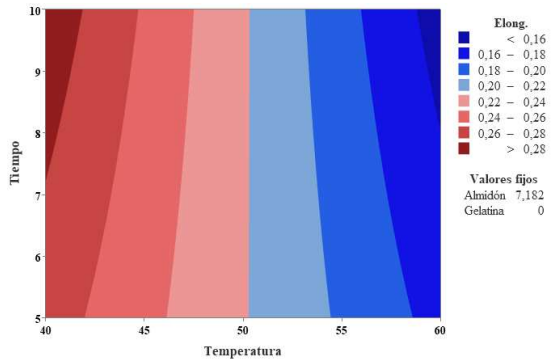
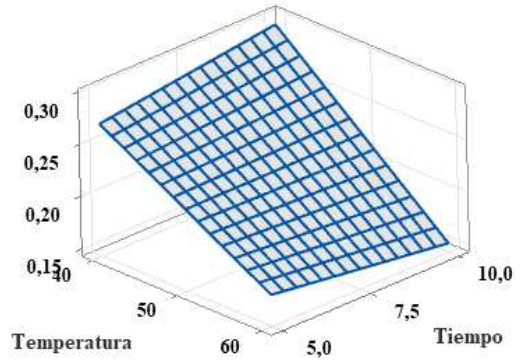


Fig 39. Gráfica de trazas para la Elongación.

Para analizar el comportamiento de los parámetros y entender la importancia relativa de estos, se revisa la gráfica de trazas para la Elongación, en la que se visualiza que, el o los parámetros que tienen mayor relevancia sobre la propiedad analizada, en este caso son tanto el Almidón y la Gelatina.

TABLA LIV

GRÁFICAS DE CONTORNO Y DE SUPERFICIE LA ELONGACIÓN

Graficas de contorno	Graficas de superficie
	

Con el modelo de regresión generado tras el análisis de la varianza de la Elongación, se construyen la gráfica de contorno y la gráfica de superficie, estas se presentan en la tabla antes mostrada. En las gráficas se puede revisar de acuerdo con la gama de colores que, las marcas que presentan una tonalidad roja mantienen valores elevados de la propiedad analizada, además, se tiene una disposición del modelo en tres dimensiones lo que hace más notorio el punto donde se obtienen mejores valores de la propiedad.

En ese sentido, se nota un incremento en los valores de la Elongación cuando se emplea un menor tiempo y menor temperatura.

3.6.3. Optimización individual

Para finalizar el Análisis de la Elongación, se efectúa el proceso de optimización, con el que se vinculan los cuatro parámetros de estudio de manera colectiva.

TABLA LV

OPTIMIZACIÓN DE LA ELONGACIÓN

Parámetros		Propiedades	
Almidón	5,1689 g	Elongación	0,0580 %
Gelatina	2,0131 g		
Temperatura	40 °C		
Tiempo	10 min		

Con este análisis se entiende que, la combinación que brinda mejores valores de la propiedad mecánica analizada es la que involucra los siguientes parámetros: almidón con 5,1689 gramos, gelatina con 2,0131 gramos, temperatura a 40°C y con un tiempo de 10 minutos, con lo que se obtiene una Elongación de 0,0580 %.

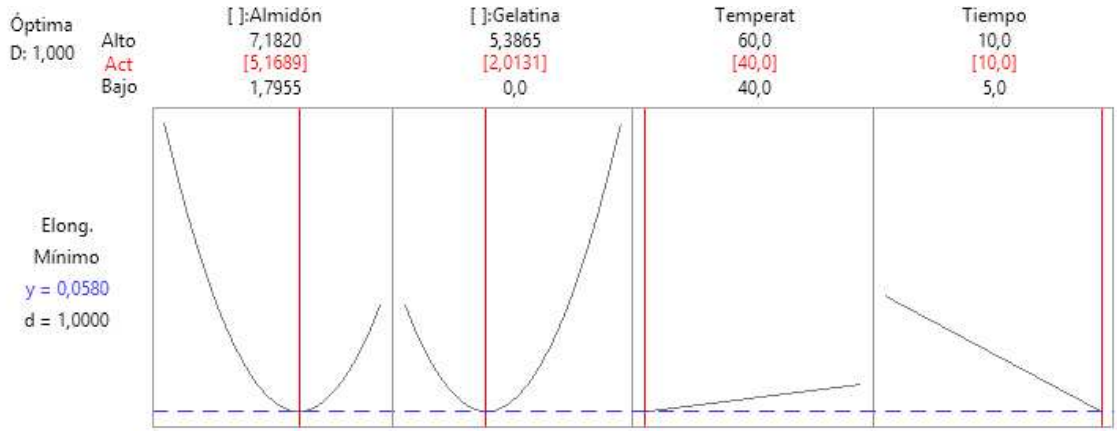


Fig 40. Gráfica de optimización de la Elongación.

3.7. Análisis de la Tasa de degradación con parámetros controlados

En este apartado se va a analizar la Tasa de degradación con parámetros controlados, para este proceso, al igual que en la propiedad anterior, se parte de la revisión de los supuestos paramétricos: Normalidad, igualdad de varianza de los tratamientos e independencia de las observaciones.

3.7.1. Revisión de supuestos paramétricos

La revisión de los supuestos paramétricos se la efectúa en los residuos de los datos. Estos supuestos de verifican con la revisión de las gráficas presentadas a continuación.

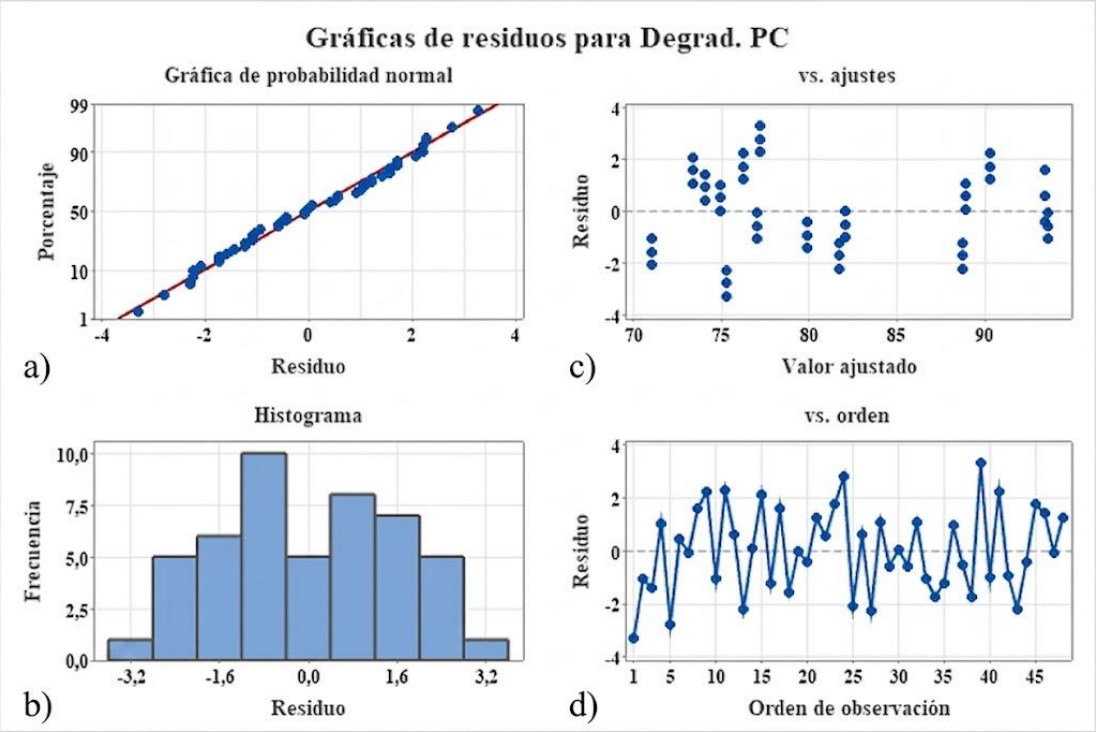


Fig 41. Gráficas de residuos para la Tasa de degradación con parámetros controlados.

De acuerdo con la información contenida en las gráficas presentadas se pude dar por verificados los supuestos en base a los siguientes criterios:

La gráfica a), se define como gráfica de probabilidad normal, en esta, los residuos se distribuyen sobre la línea normal, con ligeras desviaciones en los extremos; además la gráfica b), el histograma, se muestran las barras de frecuencia con una concentración de datos alrededor de la media de residuos, con una ligera desviación respecto al valor nulo, lo cual marca una tendencia similar a la del gráfico de la probabilidad normal. Con esto se entiende que, los datos provienen de una distribución normal, localizándose dentro del margen aceptable.

La gráfica c), de residuos versus ajustes, en la que los residuos se distribuyen homogéneamente alrededor de una franja horizontal, próximos al valor medio de cero, lo que se entiende que, a pesar del incremento o disminución de los ajustes, los residuos se mantienen contantes. Con esto se infiere que, la varianza de los tratamientos es igual.

Finalmente, la gráfica d), la de residuos versus orden, al no evidenciar que se trace un patrón claramente definido, se encuentra que los datos se distribuyen de manera

aleatoria sobre la gráfica. Con esto se entiende que, los datos son independientes entre sí, con lo que se verificaría el tercer y último de los supuestos paramétricos.

3.7.2. Análisis de la varianza

Con la verificación de los supuestos paramétricos, se tiene una alta confiabilidad en los resultados que se obtienen con el análisis de la varianza de la Tasa de degradación con parámetros controlados, en ese sentido, se presenta la tabla ANOVA descrita a continuación.

TABLA LVI

ANÁLISIS DE LA VARIANZA DE LA TASA DE DEGRADACIÓN CON PARÁMETROS CONTROLADOS

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	11	2545,20	231,382	71,16	0,000
Lineal	1	163,35	1,350	0,42	0,523
Temperatura	1	1260,75	1,960	0,60	0,443
Tiempo	1	270,75	26,347	8,10	0,007
Cuadrático					
Almidón*Gelatina	1	168,75	168,750	51,90	0,000
Almidón*Temperatura	1	205,35	79,350	24,40	0,000
Almidón*Tiempo	1	0,60	48,600	14,95	0,000
Cúbico especial					
Almidón*Gelatina*Temperatura	1	0,75	0,750	0,23	0,634
Almidón*Gelatina*Tiempo	1	75,00	75,000	23,07	0,000
Almidón*Temperatura*Tiempo	1	21,02	18,189	5,59	0,024
Gelatina*Temperatura*Tiempo	1	378,13	87,097	26,79	0,000
Cuártica					
Almidón*Gelatina*Temperatura*Tiempo	1	0,75	0,750	0,23	0,634
Error residual	36	117,05	3,251		
Falta de ajuste	4	107,55	26,888	90,57	0,000
Error puro	32	9,50	0,297		
Total	47	2662,25			

Con la aplicación del análisis de la varianza se genera un modelo matemático de regresión que acopla los datos de la Tasa de degradación con parámetros controlados a una línea estándar, para poder predecir y entender el comportamiento de cada uno de los parámetros, en ese sentido, el modelo generado explica la variabilidad de los datos de la Tasa de degradación con parámetros controlados en un 95,60%, este parámetro se define como el coeficiente de determinación.

En el análisis de la varianza se muestra el valor de la significancia calculada (valor-p) de cada uno de los componentes del modelo generado, con ello se evidencia lo relevantes que es el término asociado al tiempo, cuadráticos, sin embargo, el término asociado a la temperatura, los términos cúbicos especiales y cuárticos no son relevantes para el modelo.

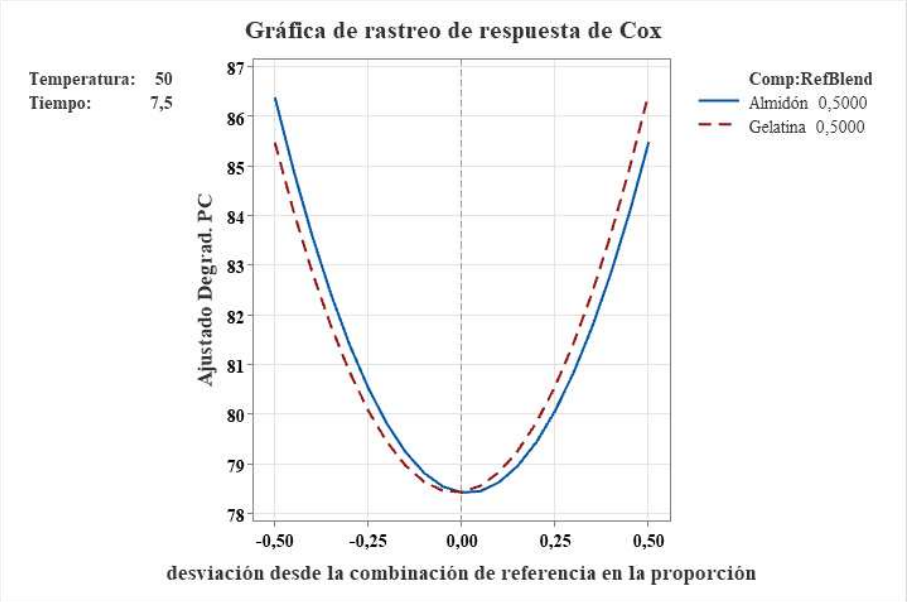
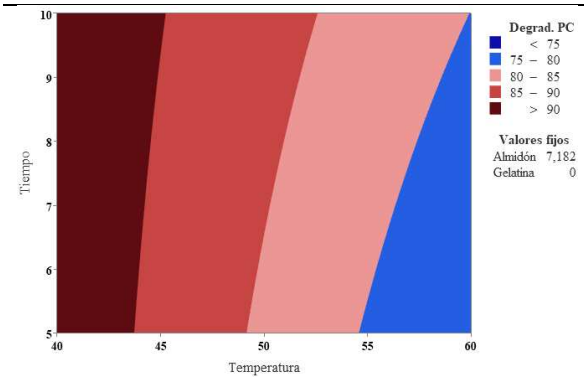
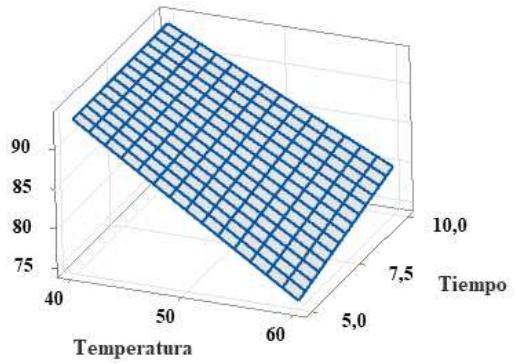


Fig 42. Gráfica de trazas para la Tasa de degradación con parámetros controlados.

Para analizar el comportamiento de los parámetros y entender la importancia relativa de estos, se revisa la gráfica de trazas para la Tasa de degradación con parámetros controlados, en la que se visualiza que, el o los parámetros que tienen mayor relevancia sobre la propiedad analizada, en este caso son tanto el Almidón y la Gelatina.

TABLA LVII

GRÁFICAS DE CONTORNO Y DE SUPERFICIE LA TASA DE DEGRADACIÓN CON PARÁMETROS CONTROLADOS

Graficas de contorno	Graficas de superficie
	

Con el modelo de regresión generado tras el análisis de la varianza de la Tasa de degradación con parámetros controlados, se construyen la gráfica de contorno y la gráfica de superficie, estas se presentan en la tabla antes mostrada. En las gráficas se puede revisar de acuerdo con la gama de colores que, las marcas que presentan una tonalidad roja mantienen valores elevados de la propiedad analizada, además, se tiene una disposición del modelo en tres dimensiones lo que hace más notorio el punto donde se obtienen mejores valores de la propiedad.

En ese sentido, se nota un incremento en los valores de la Tasa de degradación con parámetros controlados cuando se emplea un menor tiempo y menor temperatura.

3.7.3. Optimización individual

Para finalizar el Análisis de la Tasa de degradación con parámetros controlados, se efectúa el proceso de optimización, con el que se vinculan los cuatro parámetros de estudio de manera colectiva.

TABLA LVIII

OPTIMIZACIÓN DE LA TASA DE DEGRADACIÓN CON PARÁMETROS CONTROLADOS

Parámetros		Propiedades	
Almidón	5,1669 g	Tasa de degradación con	71,03 %
Gelatina	2,0151 g		

Temperatura	60 °C	parámetros
Tiempo	5 min	controlados

Con este análisis se entiende que, la combinación que brinda mejores valores de la propiedad mecánica analizada es la que involucra los siguientes parámetros: almidón con 5,1669 gramos, gelatina con 2,0151 gramos, temperatura a 60°C y con un tiempo de 5 minutos, con lo que se obtiene una Tasa de degradación con parámetros controlados de 71,03 %.

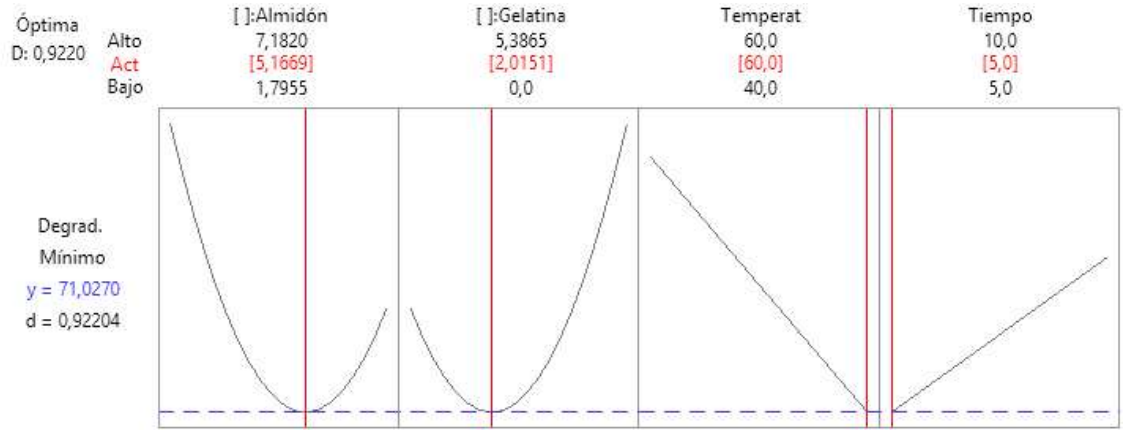


Fig 43. Gráfica de optimización de la Tasa de degradación con parámetros controlados.

3.8. Análisis de la Tasa de degradación en ambiente no controlado

En este apartado se va a analizar la Tasa de degradación en ambiente no controlado, para este proceso, al igual que en la propiedad anterior, se parte de la revisión de los supuestos paramétricos: Normalidad, igualdad de varianza de los tratamientos e independencia de las observaciones.

3.8.1. Revisión de supuestos paramétricos

La revisión de los supuestos paramétricos se la efectúa en los residuos de los datos. Estos supuestos de verifican con la revisión de las gráficas presentadas a continuación.

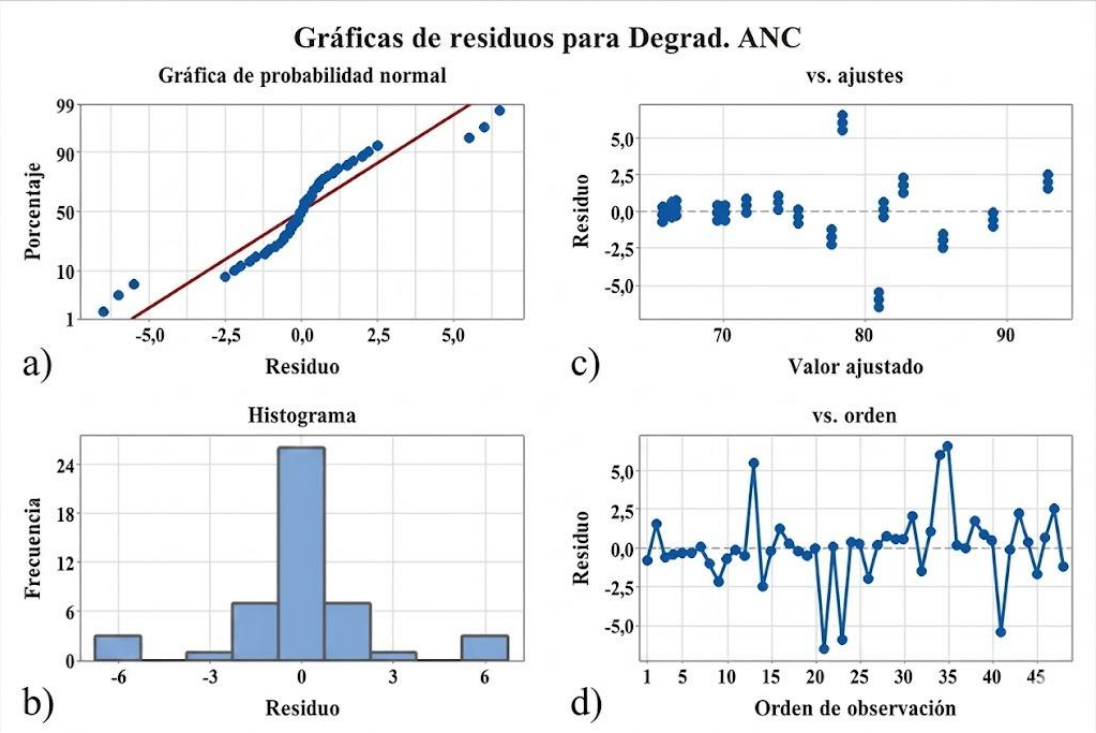


Fig 44. Gráficas de residuos para la Tasa de degradación en ambiente no controlado.

De acuerdo con la información contenida en las gráficas presentadas se pude dar por verificados los supuestos en base a los siguientes criterios:

La gráfica a), se define como gráfica de probabilidad normal, en esta, los residuos se distribuyen sobre la línea normal, con ligeras desviaciones en los extremos; además la gráfica b), el histograma, se muestran las barras de frecuencia con una concentración de datos alrededor de la media de residuos, con una ligera desviación respecto al valor nulo, lo cual marca una tendencia similar a la del gráfico de la probabilidad normal. Con esto se entiende que, los datos provienen de una distribución normal, localizándose dentro del margen aceptable.

La gráfica c), de residuos versus ajustes, en la que los residuos se distribuyen homogéneamente alrededor de una franja horizontal, próximos al valor medio de cero, lo que se entiende que, a pesar del incremento o disminución de los ajustes, los residuos se mantienen contantes. Con esto se infiere que, la varianza de los tratamientos es igual.

Finalmente, gráfica d), la de residuos versus orden, al no evidenciar que se trace un patrón claramente definido, se encuentra que los datos se distribuyen de manera

aleatoria sobre la gráfica. Con esto se entiende que, los datos son independientes entre sí, con lo que se verificaría el tercer y último de los supuestos paramétricos.

3.8.2. Análisis de la varianza

Con la verificación de los supuestos paramétricos, se tiene una alta confiabilidad en los resultados que se obtienen con el análisis de la varianza de la Tasa de degradación en ambiente no controlado, en ese sentido, se presenta la tabla ANOVA descrita a continuación.

TABLA LIX

ANÁLISIS DE LA VARIANZA DE LA TASA DE DEGRADACIÓN EN AMBIENTE NO CONTROLADO

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	11	3094,34	281,304	37,63	0,000
Lineal	1	28,36	35,651	4,77	0,036
Temperatura	1	1674,42	8,965	1,20	0,281
Tiempo	1	371,30	205,889	27,54	0,000
Cuadrático					
Almidón*Gelatina	1	163,17	163,172	21,83	0,000
Almidón*Temperatura	1	571,96	134,251	17,96	0,000
Almidón*Tiempo	1	103,36	154,401	20,65	0,000
Cúbico especial					
Almidón*Gelatina*Temperatura	1	34,17	34,172	4,57	0,039
Almidón*Gelatina*Tiempo	1	57,42	57,422	7,68	0,009
Almidón*Temperatura*Tiempo	1	36,10	0,040	0,01	0,942
Gelatina*Temperatura*Tiempo	1	9,03	22,139	2,96	0,094
Cuártica					
Almidón*Gelatina*Temperatura*Tiempo	1	45,05	45,047	6,03	0,019
Error residual	36	269,11	7,475		
Falta de ajuste	4	261,11	65,278	261,11	0,000
Error puro	32	8,00	0,250		
Total	47	3363,45			

Con la aplicación del análisis de la varianza se genera un modelo matemático de regresión que acopla los datos de la Tasa de degradación en ambiente no controlado a una línea estándar, para poder predecir y entender el comportamiento de cada uno de los parámetros, en ese sentido, el modelo generado explica la variabilidad de los datos de la Tasa de degradación en ambiente no controlado en un 92,00%, este parámetro se define como el coeficiente de determinación.

En el análisis de la varianza se muestra el valor de la significancia calculada (valor-p) de cada uno de los componentes del modelo generado, con ello se evidencia lo relevantes que es el término asociado al tiempo, cuadráticos y el cuártico; sin embargo, el término asociado a la temperatura y los términos cúbicos especiales no son relevantes para el modelo.

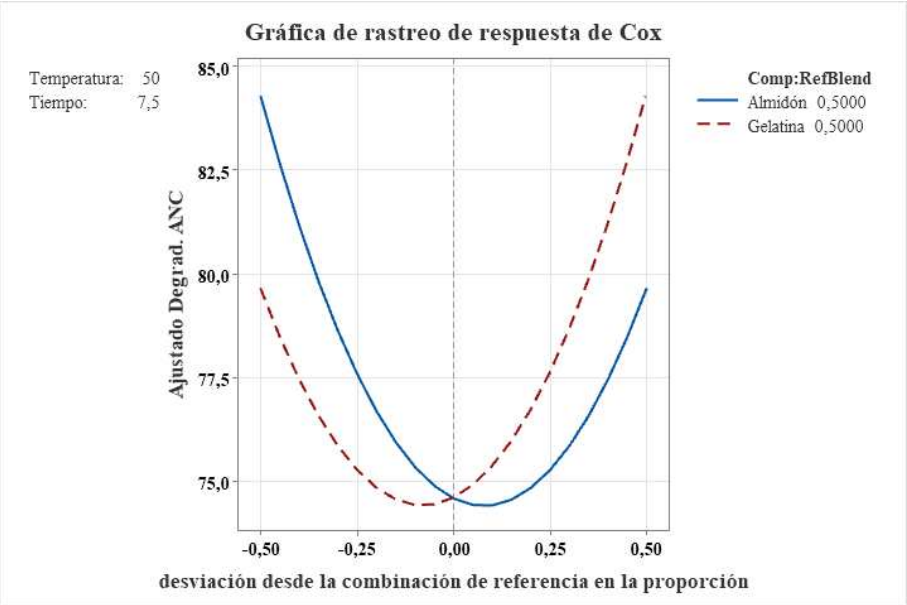
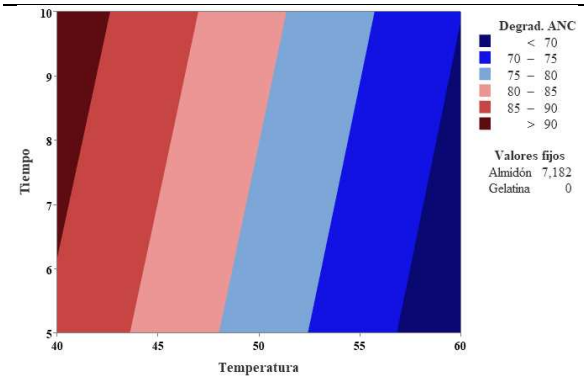
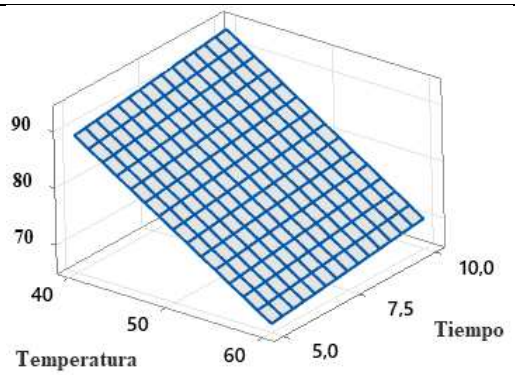


Fig 45. Gráfica de trazas para la Tasa de degradación en ambiente no controlado.

Para analizar el comportamiento de los parámetros y entender la importancia relativa de estos, se revisa la gráfica de trazas para la Tasa de degradación en ambiente no controlado, en la que se visualiza que, el o los parámetros que tienen mayor relevancia sobre la propiedad analizada, en este caso son tanto el Almidón y la Gelatina.

TABLA LX

GRÁFICAS DE CONTORNO Y DE SUPERFICIE LA TASA DE DEGRADACIÓN EN AMBIENTE NO CONTROLADO

Graficas de contorno	Graficas de superficie
	

Con el modelo de regresión generado tras el análisis de la varianza de la Tasa de degradación en ambiente no controlado, se construyen la gráfica de contorno y la gráfica de superficie, estas se presentan en la tabla antes mostrada. En las gráficas se puede revisar de acuerdo con la gama de colores que, las marcas que presentan una tonalidad roja mantienen valores elevados de la propiedad analizada, además, se tiene una disposición del modelo en tres dimensiones lo que hace más notorio el punto donde se obtienen mejores valores de la propiedad.

En ese sentido, se nota un incremento en los valores de la Tasa de degradación en ambiente no controlado cuando se emplea un menor tiempo y menor temperatura.

3.8.3. Optimización individual

Para finalizar el Análisis de la Tasa de degradación en ambiente no controlado, se efectúa el proceso de optimización, con el que se vinculan los cuatro parámetros de estudio de manera colectiva.

TABLA LXI

OPTIMIZACIÓN DE LA TASA DE DEGRADACIÓN EN AMBIENTE NO CONTROLADO

Parámetros		Propiedades		
Almidón	5,5534 g	Tasa de degradación en		65,72 %
Gelatina	1,6286 g			

Temperatura	60 °C	ambiente	no
Tiempo	5 min	controlado	

Con este análisis se entiende que, la combinación que brinda mejores valores de la propiedad mecánica analizada es la que involucra los siguientes parámetros: almidón con 5,5534 gramos, gelatina con 1,6286 gramos, temperatura a 60°C y con un tiempo de 5 minutos, con lo que se obtiene una Tasa de degradación con parámetros controlados de 65,72 %.

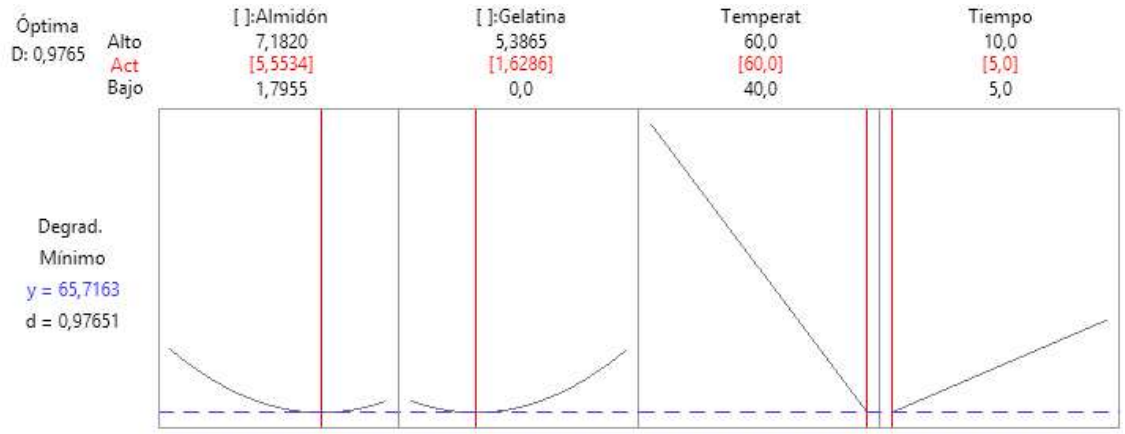


Fig 46. Gráfica de optimización de la Tasa de degradación en ambiente no controlado.

3.9. Verificación de hipótesis

Para la verificación de hipótesis se utilizó la optimización global y los datos obtenidos presentados en la TABLA LXII. En el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos de tracción y biodegradabilidad realizados a las 16 combinaciones establecidas mediante el diseño experimental DOE-Mezclas, evidenciaron que la variación en los porcentajes de almidón y gelatina, así como la temperatura y el tiempo de curado, influyeron significativamente en las propiedades mecánicas del bioplástico, tales como el módulo de elasticidad, esfuerzo máximo a la tracción y porcentaje de deformación. De igual manera, dichas variables tuvieron incidencia directa en la biodegradabilidad del material, observándose diferencias en las tasas y tiempos de degradación entre las combinaciones evaluadas.

3.9.1. Optimización global

Tendiendo los análisis individuales de cada una de las propiedades obtenidas a través del Ensayo a Tracción, el Ensayo de biodegradabilidad con parámetros controlados y el Ensayo de Biodegradabilidad en ambiente no controlado, se genera el proceso de optimización global que muestra la mezcla que aproveche de manera óptima las propiedades analizadas.

TABLA LXII

OPTIMIZACIÓN GLOBAL DE PROPIEDADES

Parámetros		**Propiedades**	
Almidón	1,7955 g	Esfuerzo máximo a la Tracción	1,5521 MPa
Gelatina	5,3865 g	Módulo de elasticidad a la Tracción	23,3272 MPa
Temperatura	40 °C	Elongación	0,5567 %
Tiempo	5 min	Tasa de degradación con parámetros controlados	77,0750 %
		Tasa de degradación en ambiente no controlado	73,9250 %

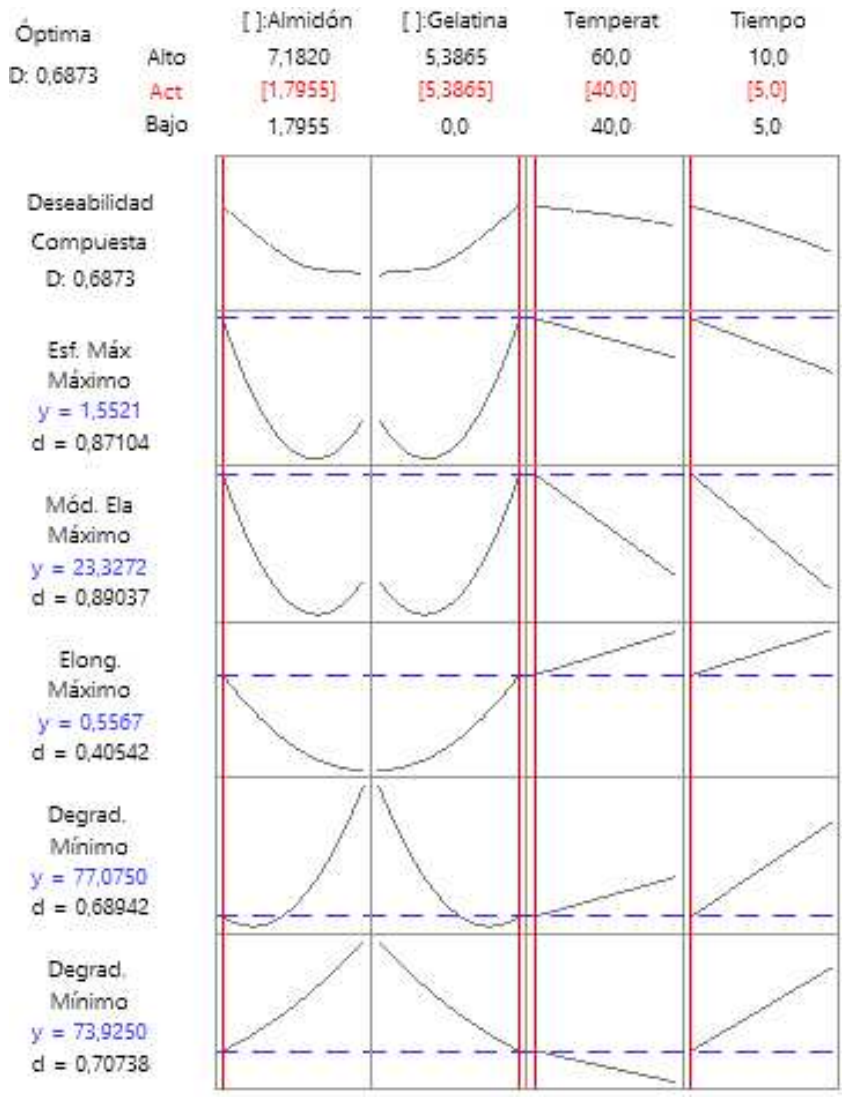


Fig 47. Gráfica optimización global.

Tanto en la TABLA LXII, como en la Fig 47, gráfica de optimización global, se puede apreciar los valores de la mezcla optima, en ese sentido se tienen los valores codificados en función de las proporciones, además de tener los valores de las cantidades de cada componente asociado al punto óptimo estimado.

Es así como se tienen que la mezcla requerida para obtener los mejores resultados de las propiedades de tracción de biodegradabilidad son los siguientes: 1,7955 gramos de almidón, 5,3865 gramos de gelatina a una temperatura de 40 °C y a un tiempo de 5 minutos, se obtuvieron los siguientes valores de las propiedades evaluadas: un esfuerzo máximo a la tracción de 1,5521 MPa, un módulo de elasticidad a la tracción de 23,3272

MPa, una elongación de 0,5567 %, una tasa de degradación bajo parámetros controlados de 77,0750 % y una tasa de degradación en ambiente no controlado de 73,9250 %.

En base a los datos obtenidos se puede decir que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa: La variación en los porcentajes de almidón y gelatina, la temperatura y el tiempo de curado en la obtención de bioplástico natural a partir de la hoja de tuna andina mediante Diseño de Experimentos (DOE-MEZCLAS), influye significativamente en las propiedades mecánicas (módulo de elasticidad, esfuerzo y deformación) y en la biodegradabilidad del material.

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Se determinó los parámetros físico-químicos de las variables que intervienen en el proceso de obtención del bioplástico, identificando el almidón, gelatina, temperatura y tiempo de curado como variables de mayor impacto, mientras que la glicerina junto con el vinagre fueron componentes con menor influencia en la obtención del bioplástico.
- Se obtuvo probetas por cada una de las 16 combinaciones para someterlas a ensayos de tracción y biodegradabilidad bajo normas internacionales. Los resultados de los ensayos de tracción evidenciaron que determinadas combinaciones alcanzaron propiedades mecánicas competitivas frente a los plásticos comerciales con los que se comparó, destacando la combinación 4 con el mayor esfuerzo máximo a la tracción de 1,61 MPa y módulo de elasticidad de 24,36 MPa, mientras que la combinación 16 evidenció el mayor porcentaje de elongación con un 99%. En relación con la biodegradabilidad todas las combinaciones presentaron una alta capacidad de degradación en condiciones controladas y al medio ambiente, destacando la combinación 9 con una tasa de degradación del 93% en condiciones controladas y un 95% al medio ambiente durante 48 días del ensayo.
- Se evaluó las propiedades mecánicas con el software especializado, con el análisis estadístico se generaron modelos matemáticos ajustados a los datos medidos para cada una de las propiedades evaluadas. A partir de ello, se obtuvieron valores de ajuste o coeficientes de determinación (R^2), los cuales permiten explicar la proporción de la variabilidad total de las mediciones representada por los modelos matemáticos, alcanzando valores de hasta el 95,60 %. Asimismo, otro parámetro analizado mediante el ANOVA fue la significancia del modelo (valor-p), cuyos resultados evidencian, en todas las propiedades estudiadas, la existencia de un punto óptimo como es el caso de la optimización global con cantidades de 1,7955 gramos de

almidón, 5,3865 gramos de gelatina a una temperatura de 40 °C y a un tiempo de 5 minutos, se obtuvieron los siguientes valores de las propiedades evaluadas: un esfuerzo máximo a la tracción de 1,5521 MPa, un módulo de elasticidad a la tracción de 23,3272 MPa, una elongación de 0,5567 %, una tasa de degradación bajo parámetros controlados de 77,0750 % y una tasa de degradación en ambiente no controlado de 73,9250 %.

- Se concluye que el método mejor identificado para la obtención del mucílago consistió en la recolección y clasificación de las mejores hojas de tuna andina seguido de su lavado, picado y reposo en agua durante dos días, logrando obtener una sustancia homogénea de mucílago, facilitando la mezcla durante el proceso de cocción del bioplástico.
- En conclusión, el método más adecuado para la producción del bioplástico se logró al integrar primero el mucílago, seguido de la glicerina, posteriormente el vinagre y finalmente la gelatina junto con el almidón, para después someter a la mezcla a agitación y cocción simultáneamente. Gracias a este orden se consiguió una mezcla homogénea, reduciendo la formación de grumos ayudando a la uniformidad del bioplástico.

4.2. Recomendaciones

- Es recomendable para futuras investigaciones realizar una microscopía que permita visualizar la estructura a nivel microscópico para observar detalles que no se lograría visualizar a simple vista ya sea para evaluar la estructura interna, homogeneidad y distribución de los componentes, permitiendo una correlación entre las propiedades mecánicas y su estructura a nivel celular.
- Se recomienda que, para garantizar una mezcla uniforme y homogénea, conviene la utilización de una máquina agitador y calentador encargado de agitar y calentar la mezcla a niveles constantes evitando la acumulación de grumos de almidón dentro de la mezcla.
- En recomendación para un beneficio en la facilidad del desmolde y mejorar el acabado superficial de las probetas, es preferible fabricar moldes con vidrio u otros materiales completamente lisos que no favorezcan la adherencia a la mezcla, incluso se recomienda la fabricación de moldes con las medidas

exactas del diseño de la probeta dada por la Norma AST D638 evitando así el cortado de las probetas.

- Con el propósito de obtener mejores resultados durante la etapa de secado, se recomienda secar las mezclas en un ambiente hermético donde la mezcla evite contaminarse con agentes externos como el polvo, lluvia o partículas transportadas por el viento.
- Para mejorar o aumentar las propiedades del bioplástico, es recomendable investigar la incorporación de nuevos plastificantes o aditivos naturales que modifiquen o agreguen características mecánicas, como la cera de abeja que puede llegar a darle rasgos hidrofóbicos al bioplástico, ampliando sus posibles aplicaciones industriales.

BIBLIOGRAFÍA

[1] E. Herrera-Ibarra *et al.*, “Preparation of Surgical Thread from a Bioplastic Based on Nopal Mucilage”, *Polymers (Basel)*, vol. 15, núm. 9, pp. 1–2, abr. 2023, doi: 10.3390/polym15092112.

[2] A. Y. Guadarrama-Lezama, J. Castaño, G. Velázquez, H. Carrillo-Navas, y J. Alvarez-Ramírez, “Effect of nopal mucilage addition on physical, barrier and mechanical properties of citric pectin-based films”, *J Food Sci Technol*, vol. 55, núm. 9, pp. 3739–3748, 2018, doi: 10.1007/s13197-018-3304-x.

[3] F. Mannai, L. Mechi, F. Alimi, A. K. D. Alsukaibi, M. N. Belgacem, y. Moussaoui, “Biodegradable composite films based on mucilage from Opuntia ficus-indica (Cactaceae): Microstructural, functional and thermal properties”, *Int J Biol Macromol*, vol. 252, p. 126456, dic. 2023, doi: 10.1016/J.IJBIOMAC.2023.126456.

[4] D. Rossi, E. Mioni, M. Zancato, A. Bettero, y S. Rossi, “Development of a tensiometric model for surface energy characterization of raw coffee beans”, *J Food Eng*, vol. 112, núm. 4, pp. 352–357, oct. 2012, doi: 10.1016/J.JFOODENG.2012.04.006.

[5] P. R. Meza, L. U. Quipuzco, y V. C. Meza, “‘Elaboración de bioplásticos y determinación de su biodegradabilidad-Proyecto de laboratorio’”, *Revista del Instituto de Investigación de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos* , vol. 22, núm. 43, pp. 67–80, jun. 2019.

[6] M. Chico y T. Sampedro, “Producción de bioplásticos y sus aplicaciones como empaque de alimentos: PLA Y PHB”, *Ciencia e Ingeniería*, vol. 29, núm. 2, pp. 31–56, dic. 2022.

[7] F. Stupenengo, “Materiales Compuestos”, en *Materiales y Materias Primas*, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, 2011, 10, pp. 7–25.

[8] C. Edil da Costa, F. Velasco López, y J. M. Torralba Castelló, “Materiales compuestos de matriz metálica. I parte. Tipos, propiedades, aplicaciones”, *Revista de Metalurgia*, vol. 36, núm. 3, pp. 179–192, jun. 2000, doi: 10.3989/revmetalm.2000.v36.i3.570.

[9] G. Duffo, “Biomateriales”, en *Materiales y materias primas*, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, 2011, 8, pp. 9–37.

[10] N. M. S. Mahdi, A. K. Hassan, F. J. Al-Hasani, y W. A. M. Al-Jawher, “Classification Of Biomaterials and Their Applications”, *Journal Port Science Research*, vol. 7, núm. 3, pp. 281–299, ago. 2024, doi: 10.36371/port.2024.3.7.

[11] H. UludaÄŸ, “Grand Challenges in Biomaterials”, *Front Bioeng Biotechnol*, vol. 2, oct. 2014, doi: 10.3389/fbioe.2014.00043.

[12] Mohini Chandrashekhar Upadhye, Mohini Chetan Kuchekar, Rohini Revansiddhappa Pujari, y Nutan Uttam Sable, “Biopolymers: A comprehensive review”, *Open Access Research Journal of Science and Technology*, vol. 4, núm. 1, pp. 013–018, ene. 2022, doi: 10.53022/oarjst.2022.4.1.0070.

[13] M. Sharma, N. Tellili, I. Kacem, y T. Rouissi, “Microbial Biopolymers: From Production to Environmental Applications—A Review”, *Applied Sciences*, vol. 14, núm. 12, p. 5081, jun. 2024, doi: 10.3390/app14125081.

[14] W. Mei, G. Chen, J. Bao, M. Song, Y. Li, y C. Luo, “Interactions between microplastics and organic compounds in aquatic environments: A mini review”, *Science of The Total Environment*, vol. 736, p. 139472, sep. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139472.

[15] E. Díaz-Montes, “Polysaccharides: Sources, Characteristics, Properties, and Their Application in Biodegradable Films”, *Polysaccharides*, vol. 3, núm. 3, pp. 480–501, jun. 2022, doi: 10.3390/polysaccharides3030029.

[16] C. Holland, K. Numata, J. Rnjak-Kovacina, y F. P. Seib, “The Biomedical Use of Silk: Past, Present, Future”, *Adv Healthc Mater*, vol. 8, núm. 1, ene. 2019, doi: 10.1002/adhm.201800465.

[17] K. W. A. Lee *et al.*, “Polynucleotides in Aesthetic Medicine: A Review of Current Practices and Perceived Effectiveness”, *Int J Mol Sci*, vol. 25, núm. 15, p. 8224, jul. 2024, doi: 10.3390/ijms25158224.

[18] S. Senevirathna, “Biopolymers: Structure, properties, extraction methods and applications”, vol. 1, pp. 18–30, oct. 2022.

[19] A. Baumann y J. Hausmann, “Compression Fatigue Testing Setups for Composites—A Review”, *Adv Eng Mater*, vol. 23, núm. 2, feb. 2021, doi: 10.1002/adem.202000646.

[20] A. Singh, A. K. Trivedi, M. K. Gupta, y H. Singh, “Static, dynamic mechanical, and thermal analysis of coir/epoxy composites: Effect of hollow glass microspheres reinforcement”, *Polym Compos*, vol. 44, núm. 12, pp. 8529–8540, dic. 2023, doi: 10.1002/pc.27717.

[21] D. Venegas Vásconez, “CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE BARRIDO”, octubre de 2017. doi: 10.13140/RG.2.2.12849.79204.

[22] F. Farivar, P. Lay Yap, R. U. Karunagaran, y D. Losic, “Thermogravimetric Analysis (TGA) of Graphene Materials: Effect of Particle Size of Graphene, Graphene Oxide and Graphite on Thermal Parameters”, *C (Basel)*, vol. 7, núm. 2, p. 41, abr. 2021, doi: 10.3390/c7020041.

[23] M. A. Bashir, “Use of Dynamic Mechanical Analysis (DMA) for Characterizing Interfacial Interactions in Filled Polymers”, *Solids*, vol. 2, núm. 1, pp. 108–120, mar. 2021, doi: 10.3390/solids2010006.

[24] “Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement”, el 1 de julio de 2020, *ASTM International, West Conshohocken, PA*. doi: 10.1520/D0792-20.

[25] “Test Method for Water Absorption of Plastics”, el 1 de septiembre de 2022, *ASTM International, West Conshohocken, PA*. doi: 10.1520/D0570-22.

[26] “Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus”, el 1 de enero de 2017, *ASTM International, West Conshohocken, PA*. doi: 10.1520/G0099-17.

[27] B. Wang, S. Zhong, T.-L. Lee, K. S. Fancey, y J. Mi, “Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: A state-of-the-art review”, *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 12, núm. 4, p. 168781402091376, abr. 2020, doi: 10.1177/1687814020913761.

[28] I. Papa, V. Lopresto, y A. Langella, “Ultrasonic inspection of composites materials: Application to detect impact damage”, *International Journal of*

Lightweight Materials and Manufacture, vol. 4, núm. 1, pp. 37–42, mar. 2021, doi: 10.1016/j.ijlmm.2020.04.002.

[29] M. C., . B., y . V., "Desarrollo de una Metodología para la Obtención de Diagramas de Exposición Radiográfica para Probetas de Acero y Aluminio Mediante el Uso de un Equipo Generador de Rayos X", *Revista Politécnica*, vol. 40, pp. 31–40, 2018, [En línea]. Disponible en: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=688773638004

[30] F. Oliveros *et al.*, "La termografía infrarroja como método para la estimación de la acumulación de daño en materiales compuestos laminados", oct. 2019.

[31] B. Huzum *et al.*, "Biocompatibility assessment of biomaterials used in orthopedic devices: An overview (Review)", *Exp Ther Med*, vol. 22, núm. 5, p. 1315, sep. 2021, doi: 10.3892/etm.2021.10750.

[32] A. Cieślik y J. Raczkowska, "Biocompatibility of Biomedical Materials: Reliability of Cell Viability Tests in the Context of Retinal Prostheses", *Applied Sciences*, vol. 15, núm. 19, p. 10684, oct. 2025, doi: 10.3390/app151910684.

[33] X. Gai *et al.*, "A novel method for evaluating the dynamic biocompatibility of degradable biomaterials based on real-time cell analysis", *Regen Biomater*, vol. 7, núm. 3, pp. 321–329, jun. 2020, doi: 10.1093/rb/rbaa017.

[34] "Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials", el 15 de septiembre de 2008, *ASTM International, West Conshohocken, PA*. doi: 10.1520/D3039_D3039M-08.

[35] Asociación española de Normalización, *Determinación de la biodegradabilidad aeróbica final de materiales plásticos en condiciones de compostaje controladas Método según el análisis de dióxido de carbono generado Parte 2: Medición gravimétrica del dióxido de carbono liberado en un ensayo de laboratorio*. España, 2018.

ANEXOS

Anexo 1: Informes de los ensayos de tracción

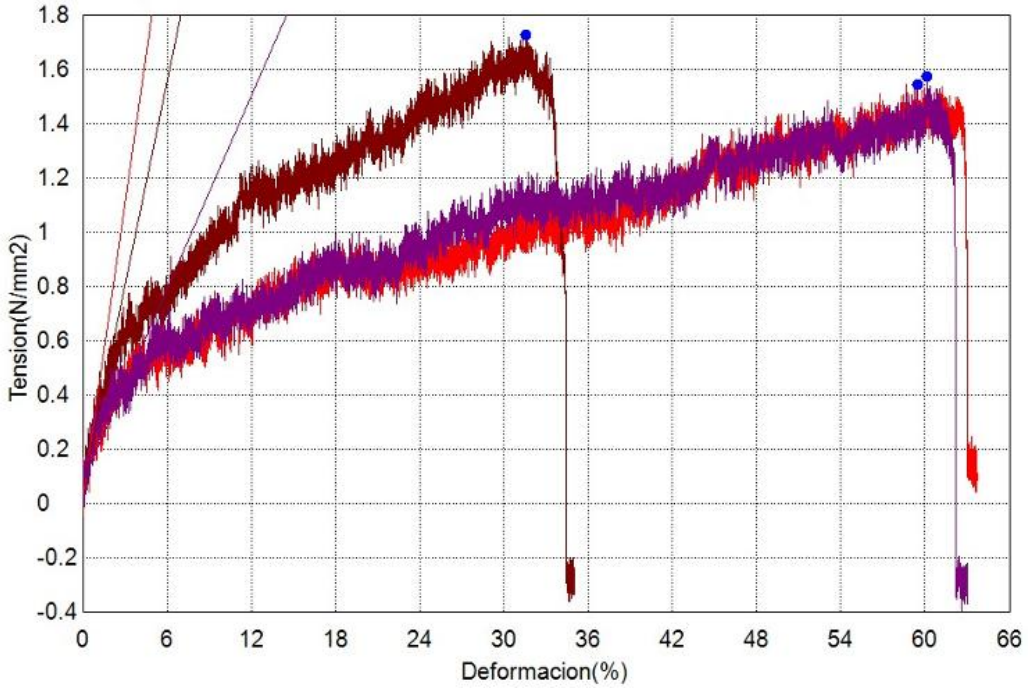
Palabra llave		Nombre de producto	
Nombre de archivo de ensayo	Combinación 4.xtas	Nombre de metodo de ensayo	Combinación 4.xmas
Fecha de informe	12/22/2025	Fecha de ensayo	11/18/2025
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Traccion
Velocidad	5mm/min	Forma	Plana
N°de partidas:	1	N°de muestras:	3

Nombre	Max._Fuerza	Max._Tension	Max._Desplazamiento	Max._Deformacion
Parametros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	N	N/mm2	mm	%
N3	4.63327	1.54442	38.6424	59.4499
N3	5.17368	1.72456	20.4949	31.5306
N3	4.72069	1.57356	39.0966	60.1486
Media	4.84255	1.61418	32.7446	50.3764
Desviacion Estandar	0.29008	0.09670	10.6110	16.3247
Rango	0.54041	0.18014	18.6017	28.6180

Nombre	Max._Tiempo	M.Elastico	Pend._Standard	LE1_Fuerza
Parametros	Calc. at Entire Areas	Tiempo 1.019716 – 2.039433 seg	Tiempo 1.019716 – 2.039433 seg	0.2 %
Unidad	seg	MPa	N/mm	N
N3	463.710	36.1798	1.66984	0.23047
N3	245.940	25.0374	1.15557	0.26226
N3	469.160	11.8567	0.54723	0.26226
Media	392.937	24.3580	1.12421	0.25166
Desviacion Estandar	127.332	12.1758	0.56196	0.01835
Rango	223.220	24.3231	1.12261	0.03179

Nombre	LE1_Tension	LE1_Desplazamiento	LE1_Deformacion	LE1_Tiempo
Parametros	0.2 %	0.2 %	0.2 %	0.2 %
Unidad	N/mm2	mm	%	seg
N3	0.07682	0.21576	0.33193	2.59000
N3	0.08742	0.20243	0.31142	2.43000
N3	0.08742	0.17491	0.26910	2.10000
Media	0.08389	0.19770	0.30415	2.37333
Desviacion Estandar	0.00612	0.02083	0.03204	0.24987
Rango	0.01060	0.04085	0.06283	0.49000

Nombre	Elastico_Devided
Parametros	10 Intervalos:
Unidad	MPa
N3	13.4767
N3	61.0311
N3	41.2841
Media	38.5973
Desviacion Estandar	23.8908
Rango	47.5544



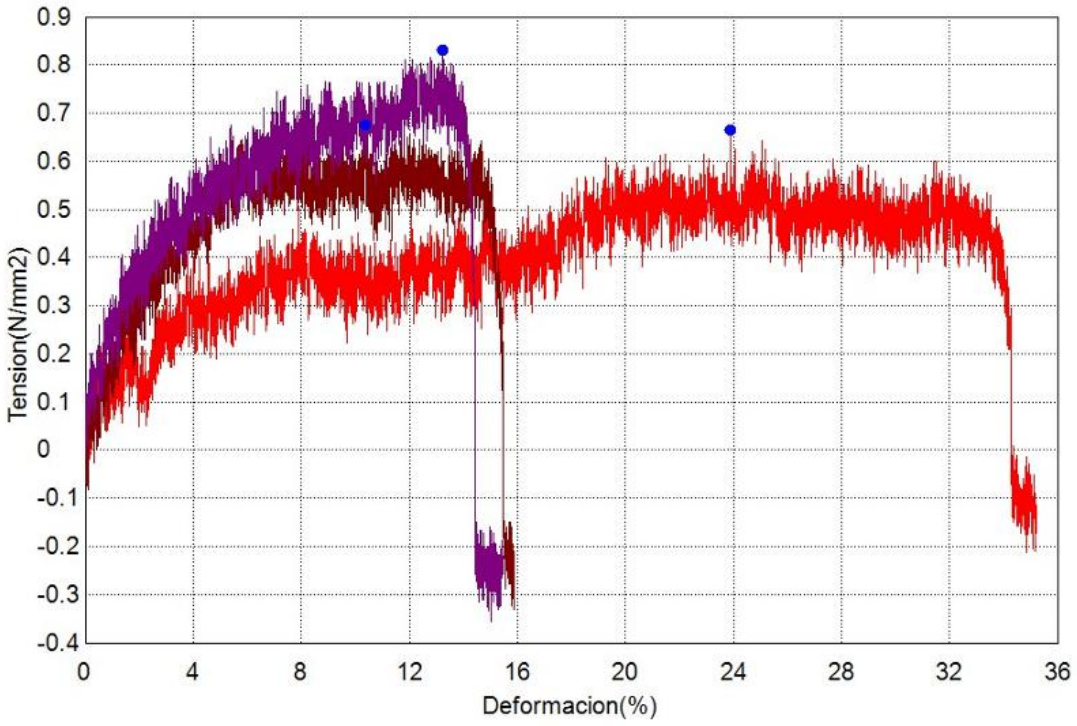
Palabra llave		Nombre de producto	
Nombre de archivo de ensayo	Combinación 5.xtas	Nombre de metodo de ensayo	Combinación 5.xmas
Fecha de informe	12/22/2025	Fecha de ensayo	11/18/2025
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Traccion
Velocidad	5mm/min	Forma	Plana
N°de partidas:	1	N°de muestras:	3

Nombre Parametros	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas	Max._Tension Calc. at Entire Areas	Max._Desplazamiento Calc. at Entire Areas	Max._Deformacion Calc. at Entire Areas
Unidad	N	N/mm2	mm	%
N5	1.99477	0.66492	15.5391	23.9063
N5	2.02656	0.67552	6.74574	10.3781
N5	2.49545	0.83182	8.61241	13.2499
Media	2.17226	0.72409	10.2991	15.8448
Desviacion Estandar	0.28034	0.09345	4.63297	7.12763
Rango	0.50068	0.16690	8.79336	13.5282

Nombre	Max._Despl.	Max._Tiempo	M.Elastico	Pend._Standard
Parametros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Tiempo 10 – 20 seg	Tiempo 10 – 20 seg
Unidad	mm	seg	N/mm2	N/mm
N5	15.5391	186.470	−2.54579	−0.11750
N5	6.74574	80.9500	9.56328	0.44138
N5	8.61241	103.350	7.37348	0.34031
Media	10.2991	123.590	4.79699	0.22140
Desviacion Estandar	4.63297	55.5955	6.45261	0.29781
Rango	8.79336	105.520	12.1091	0.55888

Nombre	LE1_Fuerza	LE1_Tension	LE1_Desplazamiento	LE1_Deformacion
Parametros	0.2 %	0.2 %	0.2 %	0.2 %
Unidad	N	N/mm2	mm	%
N5	0.42121	0.14040	1.68740	2.59600
N5	1.00931	0.33644	1.67325	2.57423
N5	1.19209	0.39736	1.68658	2.59474
Media	0.87420	0.29140	1.68241	2.58832
Desviacion Estandar	0.40281	0.13427	0.00794	0.01222
Rango	0.77088	0.25696	0.01415	0.02177

Nombre	LE1_Tiempo	Elastico_Devided
Parametros	0.2 %	10 Intervalos:
Unidad	seg	N/mm2
N5	20.2500	74.2644
N5	20.0800	2113.82
N5	20.2400	383.312
Media	20.1900	857.132
Desviacion Estandar	0.09539	1099.24
Rango	0.17000	2039.56



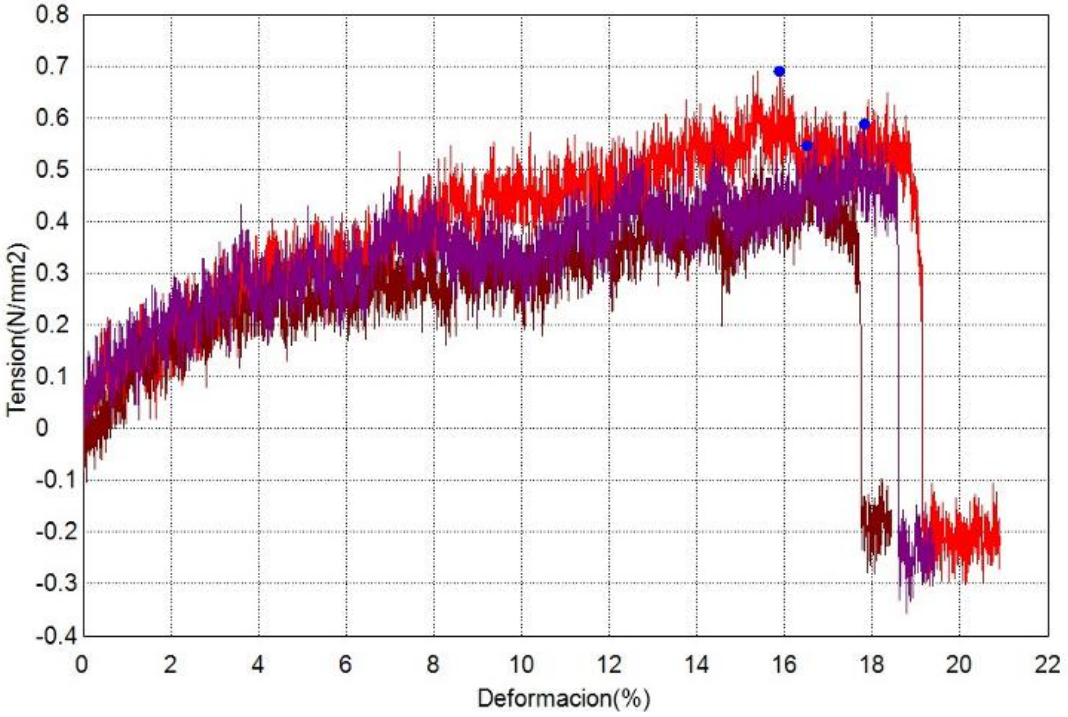
Palabra llave		Nombre de producto	
Nombre de archivo de ensayo	Combinación 6.xtas	Nombre de metodo de ensayo	Combinación 6.xmas
Fecha de informe	12/22/2025	Fecha de ensayo	11/18/2025
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Traccion
Velocidad	5mm/min	Forma	Plana
N°de partidas:	1	N°de muestras:	3

Nombre	Max._Fuerza	Max._Tension	Max._Desplazamiento	Max._Deformacion
Parametros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	N	N/mm2	mm	%
N6	2.06629	0.68876	10.3332	15.8973
N6	1.63714	0.54571	10.7383	16.5204
N6	1.76430	0.58810	11.5791	17.8140
Media	1.82258	0.60752	10.8835	16.7439
Desviacion Estandar	0.22043	0.07348	0.63552	0.97770
Rango	0.42915	0.14305	1.24590	1.91670

Nombre	Max._Despl.	Max._Tiempo	M.Elastico	Pend._Standard
Parametros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Tiempo 10 - 20 seg	Tiempo 10 - 20 seg
Unidad	mm	seg	N/mm2	N/mm
N6	10.3332	124.000	7.27098	0.33558
N6	10.7383	128.860	5.07168	0.23408
N6	11.5791	138.950	3.34224	0.15426
Media	10.8835	130.603	5.22830	0.24131
Desviacion Estandar	0.63552	7.62594	1.96905	0.09088
Rango	1.24590	14.9500	3.92874	0.18132

Nombre	LE1_Fuerza	LE1_Tension	LE1_Desplazamiento	LE1_Deformacion
Parametros	0.2 %	0.2 %	0.2 %	0.2 %
Unidad	N	N/mm2	mm	%
N6	0.51657	0.17219	1.68239	2.58830
N6	0.50863	0.16954	1.71160	2.63323
N6	0.62784	0.20928	1.68492	2.59218
Media	0.55101	0.18367	1.69297	2.60457
Desviacion Estandar	0.06665	0.02222	0.01618	0.02490
Rango	0.11921	0.03974	0.02921	0.04493

Nombre	LE1_Tiempo	Elastico_Devided
Parametros	0.2 %	10 Intervalos:
Unidad	seg	N/mm2
N6	20.1900	6.85475
N6	20.5400	10.3485
N6	20.2200	1145.92
Media	20.3167	387.708
Desviacion Estandar	0.19399	656.633
Rango	0.35000	1139.07



Nombre de muestra	Espesor	Anchura	Longitud calibrada
Unidad	mm	mm	mm
P1	0.5000	6.0000	65.0000
P1	0.5000	6.0000	65.0000
P1	0.5000	6.0000	65.0000

Anexo 2: Norma ASTM D638-14

Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics[1]

This standard is issued under the fixed designation D638; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

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

1. Scope*

1.1 This test method covers the determination of the tensile properties of unreinforced and reinforced plastics in the form of standard dumbbell-shaped test specimens when tested under defined conditions of pretreatment, temperature, humidity, and testing machine speed.

1.2 This test method is applicable for testing materials of any thickness up to 14 mm (0.55 in.). However, for testing specimens in the form of thin sheeting, including film less than 1.0 mm (0.04 in.) in thickness, ASTM standard D882 is the preferred test method. Materials with a thickness greater than 14 mm (0.55 in.) shall be reduced by machining.

1.3 This test method includes the option of determining Poisson's ratio at room temperature.

NOTE 1—This standard and ISO 527-1 address the same subject matter, but differ in technical content.

NOTE 2—This test method is not intended to cover precise physical procedures. It is recognized that the constant rate of crosshead movement type of test leaves much to be desired from a theoretical standpoint, that wide differences may exist between rate of crosshead movement and rate of strain between gage marks on the specimen, and that the testing speeds specified disguise important effects characteristic of materials in the plastic state. Further, it is realized that variations in the thicknesses of test specimens, which are permitted by these procedures, produce variations in the surface-volume ratios of such specimens, and that these variations may influence the test results. Hence, where directly comparable results are desired, all samples should be of equal thickness. Special additional tests should be used where more precise physical data are needed.

NOTE 3—This test method may be used for testing phenolic molded resin or laminated materials. However, where these materials are used as electrical insulation, such materials should be tested in accordance with Test Methods D229 and Test Method D651.

NOTE 4—For tensile properties of resin-matrix composites reinforced with oriented continuous or discontinuous high modulus >20-GPa (>3.0 × 10^6-psi) fibers, tests shall be made in accordance with Test Method D3039/D3039M.

1.4 Test data obtained by this test method have been found to be useful in engineering design. However, it is important to consider the precautions and limitations of this method found in Note 2 and Section 4 before considering these data for engineering design.

1.5 The values stated in SI units are to be regarded as standard. The values given in parentheses are for information only.

1.6 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appro- priate safety and health practices and determine the applica- bility of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*[2]

D229 Test Methods for Rigid Sheet and Plate Materials Used for Electrical Insulation

D412 Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension

D618 Practice for Conditioning Plastics for Testing

D651 Test Method for Test for Tensile Strength of Molded Electrical Insulating Materials (Withdrawn 1989)[3]

D882 Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting

D883 Terminology Relating to Plastics

D1822 Test Method for Tensile-Impact Energy to Break Plastics and Electrical Insulating Materials

D3039/D3039M Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials

D4000 Classification System for Specifying Plastic Materials

D4066 Classification System for Nylon Injection and Extrusion Materials (PA)

D5947 Test Methods for Physical Dimensions of Solid Plastics Specimens

E4 Practices for Force Verification of Testing Machines

---

[1] This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D20 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee D20.10 on Mechanical Properties.

Current edition approved Dec. 15, 2014. Published March 2015. Originally approved in 1941. Last previous edition approved in 2010 as D638 - 10. DOI: 10.1520/D0638-14.

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

[3] The last approved version of this historical standard is referenced on www.astm.org.

***A Summary of Changes section appears at the end of this standard**

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

Anexo 3: Norma ISO 14855-1:2019

INTECO

B

Ambiente

INTE/ISO 14855-1:2019

Determinación de la biodegradabilidad aeróbica final de materiales plásticos en condiciones de compostaje controladas. Método según el análisis de dióxido de carbono generado.

Parte 1: Método general.

Correspondencia: Esta norma nacional es idéntica (IDT) a la norma internacional ISO 14855-1:2012, "Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials under controlled composting conditions. Method by analysis of evolved carbon dioxide. Part 1: General method"

Miembros de

ISO

Fecha: 2019-08-06
Primera Edición
Secretaría: INTECO
Editada e impresa por ©INTECO
Derechos reservados
ICS 83.080.01

La presente norma técnica pertenece a INTECO en virtud de los instrumentos nacionales e internacionales, y por criterios de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI). Salvo por autorización expresa y escrita por parte de INTECO, no podrá reproducirse ni utilizarse ninguna parte de esta publicación bajo ninguna forma y por ningún procedimiento, electrónico o mecánico, fotocopias y microfilms inclusive, o cualquier sistema futuro para reproducir documentos. Todo irrespeto a los derechos de autor será denunciado ante las autoridades respectivas. Las solicitudes deben ser enviadas a la Dirección de Normalización de INTECO. Las observaciones a este documento dirigirlas a: (506) 2283 4522 / info@inteco.org