

**EFFECTO DE LA IMPREGNACIÓN AL VACÍO DE UN RECUBRIMIENTO
BIOPOLIMÉRICO SOBRE FIBRAS VEGETALES Y LA INCIDENCIA EN SUS
PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS, COMO UNA ALTERNATIVA AL
TUTORADO DE ARVEJA (*Pisum sativum* L.)**

LEANDRO GEOVANNY BRAVO ASMAZA

UNIVERSIDAD DE NARIÑO

FACULTAD DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

SAN JUAN DE PASTO

2019

**EFFECTO DE LA IMPREGNACIÓN AL VACÍO DE UN RECUBRIMIENTO
BIOPOLIMÉRICO SOBRE FIBRAS VEGETALES Y LA INCIDENCIA EN SUS
PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS, COMO UNA ALTERNATIVA AL
TUTORADO DE ARVEJA (*Pisum sativum* L.)**

LEANDRO GEOVANNY BRAVO ASMAZA

**Trabajo de grado en la modalidad de investigación presentado como requisito para optar
al título de ingeniero agroindustrial**

Asesor:

ING. DAVID FERNANDO LÓPEZ ENRÍQUEZ

UNIVERSIDAD DE NARIÑO

FACULTAD DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

SAN JUAN DE PASTO

2019

NOTA DE RESPONSABILIDAD

Las ideas y conclusiones aportadas en el presente trabajo de grado son responsabilidad del autor.

Artículo 1 del acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966, emanado del honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Ph.D. OSWALDO OSORIO MORA
Jurado

M.Sc. YAMID ALEXIS PINCHAO
Jurado

ING. DAVID FERNANDO LÓPEZ ENRÍQUEZ
Asesor

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme culminar esta meta. Agradezco a mis padres por su esfuerzo al educarme, por transmitirme sus consejos y valores para alcanzar los logros en mi vida. Por estar día a día a mi lado incondicionalmente.

A mi asesor David Fernando López Enríquez, gracias por su amistad, gracias por su apoyo constante, por el conocimiento y experiencia transmitida en este proyecto, que contribuyeron a la culminación de mi formación académica.

Al profesor Oswaldo Osorio Mora, gracias por apoyo constante e interés en este proyecto que contribuyeron a la culminación de mi formación académica.

A mi alma mater que me abrió las puertas y me acogió durante todo este proceso, gracias por la formación académica e integral, siempre la llevaré en mi corazón.

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a Dios, por brindarme el regalo de la vida para poder cumplir esta etapa. A mis padres Jesús y Fannery gracias por el cariño, comprensión y confianza. A mi hermano Anderson por su apoyo y amistad incondicional, consejos y cariño. A mi hermana Daniela por su apoyo. A la alegría del hogar “Matías”, por su cariño. ¡Los quiero demasiado y son mi vida!

A María José, gracias por su comprensión, apoyo y cariño ¡La quiero mucho!

A mis familiares, que con sus consejos y cariño me permiten alcanzar esta meta.

A mi asesor David Fernando López Enríquez, gracias por su apoyo, conocimiento y amistad.

Al Profesor Oswaldo Osorio Mora, su apoyo y conocimiento hizo posible el desarrollo de este trabajo.

A mis profesores por sus incontables enseñanzas.

A mis compañeros y amigos, por acompañarme a lo largo de esta etapa.

LEANDRO GEOVANNY BRAVO ASMAZA.

RESUMEN

La fibra de polipropileno utilizada en sistemas de tutorado del cultivo de arveja (*Pisum sativum* L.) causa contaminación debido a que es difícilmente biodegradable, entonces, como alternativa de sustitución se propuso fibras de fique y algodón, no obstante, estas fibras necesitan mejorar falencias relacionadas con sus propiedades mecánicas.

Por lo tanto, se realizó la impregnación a vacío con inclusión de un recubrimiento biopolimérico sobre fibras de fique y algodón con el propósito de mejorar falencias relacionadas con sus propiedades mecánicas. Se realizó un diseño factorial 2^3 , siendo los factores: tiempo (2 y 10 minutos), temperatura (15 y 60°C) y presión (0,2 y 0,7 bar), evaluando su efecto sobre resistencia a la tracción, porcentaje de elongación total a fuerza máxima y módulo de Young.

Posteriormente, se evaluó la cinética de pérdida de propiedades mecánicas en fibras de fique y algodón impregnadas a vacío. Los resultados fueron comparados con fibras de fique sin impregnar, algodón sin impregnar y polipropileno. La impregnación sobre fibras vegetales se realizó a 0.2 bar a 15 °C por 2 minutos a vacío, condiciones óptimas resultantes del estudio de impregnación. Estas fibras evaluadas fueron implementadas en cultivo, evaluando semanalmente sus propiedades mecánicas durante 13 semanas. El fique impregnado presentó menor velocidad de pérdida mecánica en comparación al fique sin impregnar en resistencia a la tracción, elongación total a fuerza máxima y módulo de Young. El algodón impregnado presentó menor velocidad de pérdida mecánica en comparación al algodón sin impregnar en módulo de Young. Las velocidades de pérdida mecánica en las tres propiedades evaluadas en polipropileno son comparables con fique y algodón impregnados.

Palabras clave: Fibras vegetales, fibra de fique, fibra de algodón, propiedades mecánicas, impregnación a vacío, modelo de Page.

ABSTRACT

The polypropylene fiber used in tutored systems of pea cultivation (*Pisum sativum* L.) causes contamination because it is difficult to biodegrade, so, as substitution alternative, fique and cotton fibers were proposed, however, these fibers need to improve flaws related to its mechanical properties.

Therefore, vacuum impregnation was carried out with the inclusion of a biopolymer coating on scrim and cotton fibers in order to improve deficiencies related to their mechanical properties. A factorial design 2³ was carried out, the factors being: time (2 and 10 minutes), temperature (15 and 60 ° C) and pressure (0.2 and 0.7 bar), evaluating its effect on tensile strength, percentage of total elongation at maximum force and Young's modulus.

Subsequently, the kinetics of loss of mechanical properties in fique and cotton fibers impregnated in vacuum was evaluated. The results were compared with non-impregnated fique fibers, non-impregnated cotton and polypropylene. The impregnation on vegetable fibers was carried out at 0.2 bar at 15 ° C for 2 minutes under vacuum, optimal conditions resulting from the impregnation study. These evaluated fibers were implemented in culture, evaluating their mechanical properties weekly for 13 weeks. The impregnated slab presented a lower mechanical loss rate compared to the slab without impregnation in tensile strength, total elongation at maximum force and Young's modulus. The impregnated cotton had a lower mechanical loss rate compared to the non-impregnated cotton in Young's modulus. The speeds of mechanical loss in the three properties evaluated in polypropylene are comparable with fique and impregnated cotton.

Key words: Vegetable fibers, fique fiber, cotton fiber, mechanical properties, vacuum impregnation, Page model.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	23
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN Y JUSTIFICACIÓN EN TÉRMINOS DE NECESIDAD Y PERTINENCIA	24
2. MARCO TEÓRICO.....	27
2.1 Generalidades.....	27
2.1.1 Fibras Naturales.	27
2.1.2 Fibras vegetales.....	27
2.1.2.1. Composición y estructura de fibras vegetales.....	28
2.1.2.1.1 Celulosa.....	29
2.1.2.1.2 Lignina.	29
2.1.2.1.3 Hemicelulosa.....	30
2.1.2.2 Fique (Furcraea spp).	30
2.1.2.2.1 Uña de águila (Furcraea macrophylla).....	30
2.1.2.2.2 El fique en Colombia.	31
2.1.2.2.3 El fique en Nariño.....	32
2.1.2.3 Algodón (Gossypium hirsutum).	33
2.1.2.3.1 El algodón en Colombia.....	33
3.1.2.3.2 Fibra de algodón.	34
2.1.3 Tutorado de arveja.	35
2.1.4 Propiedades mecánicas y espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR)	36
2.1.4.1 Pruebas de tensión y Propiedades mecánicas.	36
2.1.4.1.1 Resistencia a la tracción.	36

2.1.4.1.2 Elongación.	37
2.1.4.1.3 Módulo de Young.	37
2.1.4.2 Espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR).	37
2.1.5 Impregnación a vacío.....	39
2.1.5.1 Mecanismo hidrodinámico (MHD) y fenómeno deformación – relajación (FDR).	40
2.1.6 Modelo matemático.	44
2.2 Antecedentes.	45
2.2.1 Fibras vegetales.....	45
2.2.2 Impregnación a vacío.....	45
2.2.3 Modelamiento matemático en pérdida de propiedades mecánicas en fibras vegetales en el tutorado de arveja.....	46
3. OBJETIVOS	47
3.1 Objetivo general.....	47
3.2 Objetivos específicos.	47
4. METODOLOGÍA	48
4.1 Evaluación de las condiciones de impregnación a vacío sobre propiedades fisicoquímicas y mecánicas de fibras vegetales.	48
4.1.1 Localización de la investigación.....	48
4.1.2 Material experimental.	49
4.1.2.1 Emulsión de impregnación.	49
4.1.2.2 Equipo de impregnación a vacío.....	50
4.1.2.3 Fibras vegetales.....	51
4.1.3 Caracterización fisicoquímica, mecánica y análisis por espectroscopia infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) de fibras vegetales.....	52
4.1.3.1 Caracterización fisicoquímica de fibras vegetales.....	52

4.1.3.1.1	Peso.....	52
4.1.3.1.2	Diámetro.....	53
4.1.3.1.3	Volumen.....	53
4.1.3.1.4	Densidad, Densidad real (ρ_r) y densidad aparente (ρ_{apm}).....	53
4.1.3.1.5	Humedad.....	54
4.1.3.1.6	Viscosidad.....	54
4.1.3.2	Caracterización mecánica y composicional de fibras vegetales.....	55
4.1.4	Impregnación a vacío de fibras vegetales.....	56
4.1.4.1	Descripción del proceso de impregnación a vacío.....	56
4.1.4.2	Descripción de los factores tiempo, temperatura y presión para el proceso de impregnación a vacío.....	57
4.1.4.2.1	Tiempo de inmersión.....	57
4.1.4.2.2	Temperatura de inmersión.....	57
4.1.4.2.3	Presión de vacío.....	57
4.1.4.3	Evaluación y optimización de las condiciones de impregnación a vacío sobre fibras vegetales.....	57
4.1.4.3.1	Diseño experimental.....	57
4.1.4.3.2	Determinación de los parámetros de impregnación a vacío característicos en fibras vegetales.....	59
4.2	Modelamiento de la cinética de pérdida de propiedades mecánicas de fibras vegetales en el tutorado de arveja (<i>Pisum sativum L.</i>).....	60
4.2.1	Material experimental y montaje de fibras en el tutorado agrícola.....	60
4.2.2	Modelado matemático de la cinética de pérdida de propiedades mecánicas.....	61
4.2.2.1	Calidad de ajuste del modelo de Page.....	62
4.2.3	Cambios superficiales de la estructura de fibras vegetales.....	62
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	63

5.1 Evaluación de las condiciones de impregnación a vacío sobre propiedades fisicoquímicas y mecánicas de fibras vegetales	63
5.1.1 Caracterización fisicoquímica, mecánica y análisis por espectroscopia infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) de fibras vegetales.....	63
5.1.1.1 Caracterización fisicoquímica de la emulsión de impregnación.....	63
5.1.1.1.1 Análisis por espectroscopia infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) de la emulsión de impregnación.	63
5.1.1.2 Caracterización fisicoquímica de fibras vegetales.....	64
5.1.1.3 Caracterización mecánica y composicional de fibras vegetales.	66
5.1.1.4 Análisis por espectroscopia infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) de fibras vegetales.....	68
5.1.1.4.1 Análisis por espectrofotometría infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) para fibra de fique.	68
5.1.1.4.2 Análisis por espectrofotometría infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) para fibra de algodón.	69
5.1.2. Impregnación a vacío: evaluación de las condiciones de impregnación a vacío sobre fibras vegetales.....	70
5.1.2.1. Análisis del diseño experimental de impregnación a vacío sobre fibras de fique.	73
5.1.2.1.1 Análisis del efecto de impregnación a vacío sobre resistencia a la tracción en fibra de fique.	74
5.1.2.1.2 Análisis del efecto de impregnación a vacío sobre elongación total a fuerza máxima en fibra de fique.	79
5.1.2.1.3 Análisis del efecto de impregnación a vacío sobre módulo de Young en fibra de fique.....	83
5.1.2.2 Análisis diseño experimental de impregnación a vacío sobre fibras de algodón. 87	
5.1.2.2.1 Análisis del efecto de impregnación a vacío sobre resistencia a la tracción en fibra de algodón.	87

5.1.2.2.2 Análisis del efecto de impregnación a vacío sobre elongación total a fuerza máxima en fibra de algodón.....	91
5.1.2.2.3 Análisis del efecto de impregnación a vacío sobre módulo de Young en fibra de algodón.....	95
5.1.3 Optimización del tratamiento óptimo de impregnación a vacío sobre fibras vegetales.....	98
5.1.3.1 Optimización del tratamiento óptimo de impregnación a vacío sobre fibra de fique.....	98
5.1.3.1.1 Análisis por espectroscopia infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) para fibra de fique impregnada a vacío.....	103
5.1.3.2 Optimización del tratamiento óptimo de impregnación a vacío sobre fibra de algodón.....	104
5.1.3.2.1 Análisis por espectroscopia infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) para fibra de algodón impregnada a vacío.....	109
5.1.4 Parámetros característicos de impregnación a vacío en fibras vegetales.....	110
5.1.4.1 parámetros característicos de fibras de fique impregnadas a vacío.....	110
5.1.4.2 parámetros característicos de fibras de algodón impregnación a vacío.....	113
5.2 Modelamiento de las cinéticas de pérdida de propiedades mecánicas de fibras vegetales en el tutorado de arveja (<i>Pisum sativum</i> L.)	115
5.2.1 Parámetros cinéticos del modelo de Page para resistencia a la tracción para cada fibra evaluada.....	115
5.2.1.1 Calidad de ajuste del modelo de Page ajustado a la cinética de pérdida de resistencia a la tracción para cada fibra evaluada.....	119
5.2.2 Parámetros cinéticos del modelo de Page para elongación total a fuerza máxima para cada fibra evaluada.....	120
5.2.2.1 Calidad de ajuste del modelo de Page ajustado a la cinética de pérdida de elongación total a fuerza máxima para cada fibra evaluada.....	123

5.2.3 Parámetros cinéticos del modelo de Page para módulo de Young para cada fibra evaluada.	124
5.2.3.1 Calidad de ajuste del modelo de Page ajustado a la cinética de pérdida de módulo de Young para cada fibra evaluada.	127
5.2.2 Cambios superficiales de la estructura de fibras vegetales.	128
5.2.2.1 Estudio superficial de pérdida de propiedades mecánicas de fibra de fique sin impregnar.	129
5.2.2.2 Estudio superficial de pérdida de propiedades mecánicas de fibra de algodón sin impregnar.	131
5.2.2.3 Estudio superficial de pérdida de propiedades mecánicas de fibra de polipropileno.	132
5.2.2.4 Estudio superficial de pérdida de propiedades mecánicas de fibra de fique impregnada a vacío.	133
5.2.2.5 Estudio superficial de pérdida de propiedades mecánicas de fibra de algodón impregnada a vacío.	135
6. CONCLUSIONES	137
7. RECOMENDACIONES.....	138
8. REFERENCIAS.....	139
9. ANEXOS	151

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Clasificación taxonómica del fique.....	30
Tabla 2.2. Clasificación taxonómica del algodón.....	33
Tabla 2.3. Picos característicos de espectroscopia infrarroja para materiales lignocelulósicos. 38	38
Tabla 4.1. Matriz experimental diseño factorial 2 ³ para fibras de fique y algodón.....	58
Tabla 5.1. Caracterización fisicoquímica de la emulsión de impregnación.	63
Tabla 5.2. Caracterización fisicoquímica de fibras de fique y algodón.....	64
Tabla 5.3. Caracterización composicional de fibras vegetales.	67
Tabla 5.4. Caracterización mecánica de fibras vegetales.	67
Tabla 5.5. Resumen de propiedades mecánicas en función de los tratamientos de impregnación a vacío para fibra de fique.....	73
Tabla 5.6. Análisis de varianza para resistencia a la tracción.....	74
Tabla 5.7. Análisis de varianza para elongación total a fuerza máxima.....	79
Tabla 5.8. Análisis de varianza para módulo de Young.	83
Tabla 5.9. Resumen de propiedades mecánicas en función de los tratamientos de impregnación a vacío para fibra de algodón.....	87
Tabla 5.10. Análisis de varianza para resistencia a la tracción.....	87
Tabla 5.11. Análisis de varianza para elongación total a fuerza máxima.....	91
Tabla 5.12. Análisis de varianza para módulo de Young.	95
Tabla 5.13. Valores óptimos de los factores tiempo, temperatura y presión.	99

Tabla 5.14. Comparación de propiedades mecánicas de fibras de fique, fique recubierto y polipropileno.....	100
Tabla 5.15. Valores óptimos de los factores tiempo, temperatura y presión.	104
Tabla 5.16. Comparación de propiedades mecánicas de fibras de: fique, fique recubierto y polipropileno.	106
Tabla 5.17. Parámetros característicos de impregnación a vacío de fibra de fique.	111
Tabla 5.18. Parámetros característicos de impregnación a vacío de fibra de algodón.	113
Tabla 5.19. Parámetros cinéticos del modelo de Page para resistencia a la tracción para cada fibra evaluada.	116
Tabla 5.20. Parámetros estadísticos de ajuste del modelo de Page de la cinética de pérdida de resistencia a la tracción para cada fibra evaluada.	119
Tabla 5.21. Parámetros cinéticos del modelo de Page para elongación total a fuerza máxima para cada fibra evaluada.	122
Tabla 5.22. Parámetros estadísticos de ajuste del modelo de Page de la cinética de pérdida de elongación total a fuerza máxima para cada fibra evaluada.	123
Tabla 5.23. Parámetros cinéticos del modelo de Page para módulo de Young para cada fibra evaluada.	126
Tabla 5.24. Parámetros estadísticos de ajuste del modelo de Page de la cinética de pérdida de módulo de Young para cada fibra evaluada.	127

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Clasificación de las fibras naturales de acuerdo a su origen.....	27
Figura 2.2. Representación esquemática de los componentes químicos de las fibras naturales.	28
Figura 2.3. Participación departamental de fique.	32
Figura 2.4. Producción nacional de fique.	33
Figura 2.5. Estructura de la fibra de algodón.....	34
Figura 2.6. Representación esquemática de la fibra de algodón.....	35
Figura 2.7. Diagrama de un sistema sólido-líquido, sufriendo los fenómenos relajación-deformación seguido por el mecanismo hidrodinámico.....	43
Figura 4.1. Esquema de equipo de impregnación a vacío.....	51
Figura 5.1. Espectro FTIR de la emulsión de impregnación.	64
Figura 5.2. Diagrama de tensión contra porcentaje de deformación para fibras vegetales comparadas con fibra de polipropileno.	66
Figura 5.3. Espectro FTIR de fibra de fique.	69
Figura 5.4. Espectro FTIR de fibra de algodón.	70
Figura 5.5. Diagrama de Pareto estandarizada para resistencia a la tracción.	75
Figura 5.6. Gráfica de efectos principales para resistencia a la tracción.	76
Figura 5.7. Gráfica de interacciones AB: Tiempo-Temperatura, AC: Tempo-Presión, BC: Temperatura-Presión para resistencia a la tracción.	76
Figura 5.8. Gráfico de medias para tratamientos para resistencia a la tracción por método de LSD Fisher a un 95% de confianza.....	78
Figura 5.9. Diagrama de Pareto estandarizada elongación total a fuerza máxima.	80
Figura 5.10. Gráfica de efectos principales para elongación total a fuerza máxima.	81
Figura 5.11. Gráfica de interacciones AB: Tiempo-Temperatura, AC: Tempo-Presión, BC: Temperatura-Presión para elongación total a fuerza máxima.....	81
Figura 5.12. Gráfico de medias para tratamientos para elongación total a fuerza máxima por método de LSD Fisher a un 95% de confianza.	82
Figura 5.13. Diagrama de Pareto estandarizado para módulo de Young.....	84
Figura 5.14. Gráfica de efectos principales para módulo de Young.....	85

Figura 5.15. Gráfica de interacciones AB: Tiempo-Temperatura, AC: Tempo-Presión, BC: Temperatura-Presión para módulo de Young.....	85
Figura 5.16. Gráfico de medias para tratamientos para módulo de Young por método de LSD Fisher a un 95% de confianza.....	86
Figura 5.17. Diagrama de Pareto estandarizado para resistencia a la tracción.....	88
Figura 5.18. Gráfica de efectos principales para resistencia a la tracción.....	89
Figura 5.19. Gráfica de interacciones AB: Tiempo-Temperatura, AC: Tempo-Presión, BC: Temperatura-Presión para resistencia a la tracción.....	89
Figura 5.20. Gráfico de medias para tratamientos para resistencia a la tracción en fibra de algodón por método de LSD Fisher a un 95% de confianza.....	90
Figura 5.21. Diagrama de Pareto estandarizado para elongación a fuerza máxima.....	92
Figura 5.22. Gráfica de efectos principales para elongación total a fuerza máxima.....	93
Figura 5.23. Gráfica de interacciones AB: Tiempo-Temperatura, AC: Tempo-Presión, BC: Temperatura-Presión para elongación total a fuerza máxima.....	93
Figura 5.24. Gráfico de medias para tratamientos para elongación total a fuerza máxima en fibra de algodón por método de LSD Fisher a un 95% de confianza.....	95
Figura 5.25. Diagrama de Pareto estandarizado para módulo de Young.....	96
Figura 5.26. Gráfica de efectos principales para módulo de Young.....	97
Figura 5.27. Gráfica de interacciones AB: Tiempo-Temperatura, AC: Tempo-Presión, BC: Temperatura-Presión para módulo de Young.....	97
Figura 5.28. Gráfico de medias para tratamientos para módulo de Young en fibra de algodón por método de LSD Fisher a un 95% de confianza.....	98
Figura 5.29. Diagrama de tensión contra porcentaje de deformación para fibra de fique y fibra de fique recubierta, comparadas con fibra de polipropileno.....	99
Figura 5.30. Gráfico de medias para resistencia a la tracción de fibras de fique y fique recubierto comparadas con fibra de polipropileno por método de LSD Fisher a un 95% de confianza.....	101
Figura 5.31. Gráfico de medias para elongación total a fuerza máxima de fibras de fique y fique recubierto comparadas con fibra de polipropileno por método de LSD Fisher a un 95% de confianza.....	102

Figura 5.32. Gráfico de medias para Módulo de Young de fibras de fique y fique recubierto comparadas con fibra de polipropileno por método de LSD Fisher a un 95% de confianza.....	103
Figura 5.33. Espectro FTIR de fibras de fique y fique impregnado.	104
Figura 5.34. Diagrama de tensión contra porcentaje de deformación para fibra de algodón y fibra de algodón recubierta, comparadas con fibra de polipropileno.	105
Figura 5.35. Gráfico de medias para resistencia a la tracción de fibras de algodón y algodón recubierto comparadas con fibra de polipropileno por método de LSD Fisher a un 95% de confianza.....	107
Figura 5.36. Gráfico de medias para elongación total a fuerza máxima de fibras de algodón y algodón recubierto comparadas con fibra de polipropileno por método de LSD Fisher a un 95% de confianza.	108
Figura 5.37. Gráfico de medias para módulo de Young de fibras de algodón y algodón recubierto comparadas con fibra de polipropileno por método de LSD Fisher a un 95% de confianza.....	109
Figura 5.38. Espectro FTIR de fibras de algodón y algodón impregnado.	110
Figura 5.39. Cinética de pérdida de resistencia a la tracción de las diferentes fibras evaluadas.	115
Figura 5.40. Modelo de Page ajustado a la cinética de pérdida de resistencia a la tracción para cada fibra evaluada.	119
Figura 5.41. Modelado de la cinética de pérdida de elongación total a fuerza máxima de las diferentes fibras evaluadas.....	120
Figura 5.42. Modelo de Page ajustado a la cinética de pérdida de elongación total a fuerza máxima para cada fibra evaluada.	123
Figura 5.43. Modelado de la cinética de pérdida de módulo de Young para las diferentes fibras evaluadas.	124
Figura 5.44. Modelo de Page ajustado a la cinética de pérdida de módulo de Young para cada fibra evaluada.	127
Figura 5.45. Estudio de superficie de los diferentes tratamientos a la semana cero; T1: fique sin impregnar, T2: algodón sin impregnar, T3: polipropileno, T4: fique impregnado T5: algodón impregnado.	128

Figura 5.46. Estudio superficial de fibra de fique sin impregnar desde la semana cero (S0) hasta la semana doce (S12) en condiciones de cultivo.	130
Figura 5.47. Estudio superficial de fibra de algodón sin impregnar desde la semana cero (S0) hasta la semana doce (S12) en condiciones de cultivo.	131
Figura 5.48. Estudio superficial de fibra de polipropileno delgado desde la semana cero (S0) hasta la semana doce (S12) en condiciones de cultivo.	132
Figura 5.49. Estudio superficial de fibra de fique impregnada a vacío desde la semana cero (S0) hasta la semana doce (S12) en condiciones de cultivo.	134
Figura 5.50. Estudio superficial de fibra de algodón impregnada a vacío desde la semana cero (S0) hasta la semana doce (S12) en condiciones de cultivo.	136

LISTA DE IMÁGENES

	Pág.
Imagen 4.1. Laboratorio de investigación en conservación y calidad de los alimentos.	48
Imagen 4.2. Centro internacional de producción Limpia Lope – SENA.....	49
Imagen 4.3. Procedimiento de elaboración de la emulsión de impregnación.....	50
Imagen 4.4. Equipo de impregnación a vacío.....	51
Imagen 4.5. Fibras vegetales; fibra de fique (<i>Furcraea spp</i>) y fibra de algodón (<i>Gossypium hirsutum</i>).....	52
Imagen 4.6. Determinación de pesos de fibras vegetales.	52
Imagen 4.7. Determinación de diámetro de fibras vegetales.....	53
Imagen 4.8. Determinación densidad, densidad real (ρ_r) y densidad aparente (ρ_{apm}) de fibras vegetales.	54
Imagen 4.9. Determinación de humedad.	54
Imagen 4.10. Determinación de viscosidad.	55
Imagen 4.11. Determinación de propiedades mecánicas de fibras vegetales.	55
Imagen 4.12. Procedimiento de impregnación a vacío de fibras vegetales.	57
Imagen 4.13. Material experimental para proceso de tutorado.....	60
Imagen 4.14. Montaje de fibras en sistema de tutorado vertical con encanastillado.....	61
Imagen 5.1. Tratamientos de impregnación a vacío sobre fibras de fique.	71
Imagen 5.2. Tratamientos de impregnación a vacío sobre fibras de algodón.....	72

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Datos experimentales de la caracterización fisicoquímica de fibras vegetales.	151
Anexo 2. Datos experimentales de la caracterización composicional y mecánica de fibras vegetales.....	165
Anexo 3. Datos estadísticos del diseño experimental para fibras vegetales.	169
Anexo 4. Datos experimentales de los parámetros característicos de impregnación a vacío de fibras vegetales.....	186
Anexo 5. Datos experimentales de propiedades mecánicas obtenidos en campo para el modelado matemático de la cinética de pérdida de propiedades mecánicas.	196
Anexo 6. Calidad de ajuste del modelo de Page ajustado a la cinética de pérdida de propiedades mecánicas para cada tratamiento en campo.	201
Anexo 7. Datos estadísticos del modelo de Page a la cinética de pérdida de propiedades mecánicas de fibras vegetales.	204

INTRODUCCIÓN

Durante el año 2013 se cultivaron en Colombia 34.441 hectáreas de arveja (*P. sativum* L.), de las cuales se cosecharon 22.896 hectáreas, arrojando una producción de 100.451 toneladas, siendo el departamento de Nariño el mayor productor con 57.116 toneladas. Por otro lado, para el establecimiento del cultivo se cuenta con tres sistemas de siembra: al voleo, en surco y tutorado, siendo el tutorado el más recomendado (DANE, 2015).

Ahora bien, las variedades mejoradas de arveja (*P. sativum* L.) de mayor uso en el departamento de Nariño son de porte alto con follaje normal, que requieren la implementación de tutorado para evitar el volcamiento (Pantoja *et al.*, 2014). No obstante, la implementación del tutorado requiere básicamente de un excesivo gasto de fibra de polipropileno, la cual es un contaminante ambiental por no ser biodegradable y durar mucho tiempo en el campo después de su utilización (Castro, 2011; Checa, 2014).

Una alternativa para mitigar la problemática ambiental descrita es la implementación de fibras vegetales, puesto que presentan propiedades aprovechables para la labor agrícola del tutorado como renovabilidad, alta disponibilidad y biodegradabilidad (Rodríguez, 2013); entre estas fibras vegetales se encuentra la fibra de fique (*Furcraea spp.*) cuya cadena es de gran importancia en el departamento de Nariño y la fibra de algodón (*Gossypium hirsutum*) que es la fibra textil más importante del país (Linares *et al.*, 2008; MADR y Cadefique, 2014). Sin embargo, es conveniente que las fibras vegetales sean modificadas y/o tratadas con el fin de suministrar propiedades a las mismas que por naturaleza carecen (Muñoz-Velez *et al.*, 2014), en el caso de fibra de fique y algodón, estas presentan menor resistencia mecánica en comparación a la fibra de polipropileno.

Por lo tanto, en la presente investigación se evaluó las condiciones de impregnación a vacío (tiempo de inmersión, temperatura de inmersión y presión de vacío) de un recubrimiento biopolimérico sobre fibras de fique y algodón, para evaluar el efecto sobre sus propiedades fisicoquímicas y mecánicas. Posteriormente, las fibras vegetales impregnadas a vacío se implementaron en condiciones de cultivo durante 13 semanas para determinar la pérdida de calidad de sus propiedades mecánicas, la cual fue comparada con las fibras vegetales sin impregnar y fibra de polipropileno.

1. Planteamiento del problema, pregunta de investigación y justificación en términos de necesidad y pertinencia

Nariño es el principal productor de arveja (*P. sativum* L.) del país, con un promedio de 48.264 toneladas anuales que representan el 55,2 % de la producción nacional (Pantoja *et al.*, 2014). Se estima que de este cultivo dependen más de 26.000 productores y generan alrededor de 2,3 millones de jornales en el país (FENALCE, 2010). De igual manera, el cultivo de arveja es uno de los renglones agrícolas de mayor importancia económica en la zona andina del departamento de Nariño, con un área de siembra de 16.000 hectáreas por año, que generan más de 960.000 empleos directos, cuyo valor de la producción sobrepasa los 150.000 millones de pesos al año (Checa, 2014).

Por otra parte, las variedades de mayor uso en Nariño (Andina, San Isidro, Sureña y Sindamanoy) son de hábito de crecimiento voluble y requieren sistemas de tutorado que representan cerca del 52% de los costos de producción (Díaz *et al.*, 2014; Pantoja *et al.*, 2014). A su vez, el tutorado es uno de los aspectos externos más importantes que se tiene en cuenta al adoptar un sistema de siembra, ya que está relacionado con el rendimiento, calidad del producto final, manejo de enfermedades y no tiene limitaciones con los periodos de lluvia (Zamorano *et al.*, 2008).

El tutorado implica un excesivo gasto de fibra de polipropileno, utilizándose aproximadamente 146 conos de fibra de polipropileno (aproximadamente 681.000 metros) por ciclo de tutorado (Checa, 2014), siendo el polipropileno un material sintético popular en esta actividad por ser resistente mecánicamente, resistente a la oxidación e inalterable a los agentes atmosféricos (Muñoz-Velez *et al.*, 2014).

Sin embargo, estas mismas ventajas pueden representar inconvenientes, debido a que, la resistencia a la corrosión al agua y a la descomposición bacteriana los convierte en residuos difíciles de eliminar y, consecuentemente, en un grave problema ambiental (Tapia *et al.*, 2006), permaneciendo largos periodos en el suelo luego de su utilización por ser difícilmente biodegradable, en consecuencia, se genera aglomeración que causan dificultades durante la mecanización agrícola o alimentación de animales que pastan en los terrenos en época de descanso del suelo, de hecho, se ha determinado que el polipropileno en un periodo de 2 años bajo biodegradación controlada alcanza el 1% de biodegradación (Gómez y Michel, 2013).

Ahora bien, una alternativa para mitigar la problemática ambiental descrita, es la implementación y el desarrollo de materiales elaborados con recursos de origen vegetal, para así poder mitigar el daño ecológico dado al medio ambiente por la producción de productos sintéticos desde el siglo pasado (Mishra *et al.*, 2004; Tapia *et al.*, 2006). En este sentido, la producción de fibras vegetales es una actividad que ejemplifica el enfoque de economía verde, económicamente su producción, procesamiento y comercialización benefician a millones de agricultores y procesadores, principalmente en países en vía de desarrollo (Flieger *et al.*, 2003; Johansson *et al.*, 2012; Mohanty *et al.*, 2005; Rodriguez y Suarez, 2010).

De igual manera, las fibras vegetales son ampliamente utilizadas con diversos usos mecánicos, investigaciones han demostrado que los materiales son renovables, se encuentran disponibles en abundancia y son biodegradables (Wambua *et al.*, 2003), convirtiéndolas en una alternativa amigable con el ambiente para la sustitución de fibras derivadas del petróleo en el tutorado (Kicińska-Jakubowska *et al.*, 2012; Milošević *et al.*, 2017).

Por otro lado, Revelo *et al.* (2019) identificó fibras de fique y algodón como alternativa de sustitución parcial de fibras de polipropileno en el tutorado de arveja, sin embargo, reporta que estas fibras presentan algunos inconvenientes como menor resistencia mecánica que las fibras sintéticas, por lo cual, recomienda proteger a las fibras de las afectaciones ambientales para conseguir una menor pérdida de calidad mecánica.

Por lo tanto, se planteó la impregnación a vacío como tratamiento para mejorar falencias de fibras de fique y algodón como sus propiedades mecánicas, ya que, esta técnica aprovecha la microestructura porosa de las fibras, para reemplazar el gas ocluido en su estructura celular por solutos contenidos en un líquido de impregnación mediante acción capilar y gradientes de presión impuestas en un sistema, permitiendo incluir componentes de interés que mejoren sus propiedades mecánicas, por consiguiente, su durabilidad en la labor del tutorado agrícola (Fito *et al.*, 1996).

De acuerdo con lo anterior, es claro que las tendencias mundiales giran en torno a la responsabilidad de generar un desarrollo sostenible. Por lo tanto, dada la necesidad de utilizar materiales alternativos de origen vegetal en el amarre del tutorado de arveja que permitan reducir el uso de material sintético, mitigar parcialmente el impacto ambiental producido por materiales no biodegradables y ser mecánicamente comparable con fibra de polipropileno, surgió la necesidad de investigar sobre fibras vegetales como alternativa al tutorado de arveja aplicando un

recubrimiento biopolimérico mediante impregnación a vacío que permitan mejorar sus propiedades mecánicas.

Por lo anterior, en el presente trabajo se planteó la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es el efecto de la impregnación a vacío sobre las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de fibras de fique y algodón como alternativa en el tutorado de arveja (*Pisum sativum* L.)?

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades

2.1.1 Fibras Naturales.

Las fibras naturales son aquellas suministradas por la naturaleza, pueden clasificarse de acuerdo a su origen en fibras animales, fibras minerales y fibras de origen vegetal (Kicińska-Jakubowska *et al.*, 2012). Las fibras naturales son biopolímeros, por su composición y por su estructura considerados como materiales compuestos biodegradables, pues pueden sufrir fácil descomposición o degradación (Rodríguez, 2013).

2.1.2 Fibras vegetales.

Las fibras de origen vegetal se pueden subdividir en: fibras de semilla, fibra de hoja, fibra de fruta, fibra del tallo y fibras maderables (Bongarde y Shinde, 2014). En la figura 2.1 se muestran algunas fibras vegetales de acuerdo con su origen.

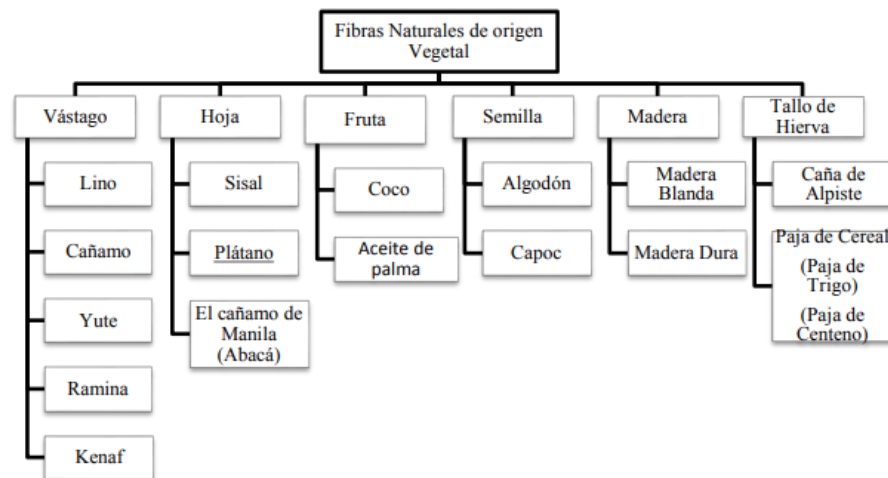


Figura 2.1. Clasificación de las fibras naturales de acuerdo a su origen.

Fuente: Mohanty *et al.* (2005).

De acuerdo a la clasificación de las fibras vegetales, las extraídas de hojas las cuales se encuentran a lo largo de hojas de plantas monocotiledóneas como fique, abacá, sisal, henequén, entre otras; son fibras gruesas y fuertes, utilizadas en la producción de cuerdas (Corrales, 2002). Dentro de las que provienen de semillas e hiladuras de frutos se encuentra la fibra de algodón que es la fibra textil más importante del mundo (Páez, 2007; Young, 1997).

2.1.2.1. Composición y estructura de fibras vegetales.

Las fibras vegetales están constituidas por una compleja asociación de sustancias poliméricas a saber: celulosa, lignina y hemicelulosa. Las proporciones de estos compuestos varían de una planta a otra, en respuesta a las condiciones del entorno. Como consecuencia de esta variabilidad las propiedades y características físicas de las fibras no son homogéneas (Mohan *et al.*, 2006).

Usualmente, la composición está dada por un 60–80% de celulosa y hemicelulosa, un 5–20% de lignina, hasta un 5% de pectina y agua. Además, las fibras contienen bajos porcentajes de cera (Bledzki y Gassan, 1999). La figura 2.2 muestra una representación esquemática de la composición de fibras naturales.

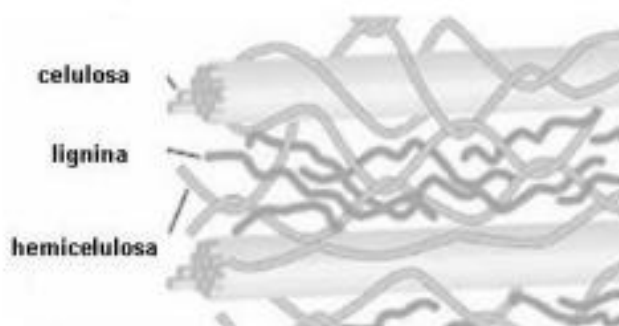


Figura 2.2. Representación esquemática de los componentes químicos de las fibras naturales.

Fuente: Stevens, (2010).

La estructura química es compleja, en general son lignocelulósicas, constan de microfibrillas de celulosa enrolladas helicoidalmente en una matriz amorfa de lignina y hemicelulosa. La celulosa es un polisacárido semicristalino y es la razón del comportamiento hidrofílico, esta proporciona resistencia y rigidez a las fibras. La hemicelulosa es un polisacárido amorfo y su peso molecular es menor al de la celulosa, y es la responsable de la biodegradación, absorción de humedad y degradación térmica de la fibra. Las fibras permanecen unidas gracias a la pectina, esta es un polisacárido de la pared celular. La lignina actúa como un aglutinante, proporciona resistencia y rigidez a las paredes celulares, la lignina las hace térmicamente inestable y es la responsable de la degradación por rayos UV. (Córdoba *et al.*, 2010; Kalia *et al.*, 2011; Rong *et al.*, 2001; Vignon *et al.*, 2004).

2.1.2.1.1 Celulosa.

La celulosa es el principal componente de la mayoría de las fibras vegetales, tales como algodón, lino, cáñamo, yute, sisal. Este polímero natural representa cerca de un tercio de los tejidos vegetales y puede regenerarse mediante fotosíntesis. Anualmente, se producen en todo el mundo aproximadamente 1.000 toneladas de celulosa por medios naturales (Goodger, 1975).

La estructura de la celulosa se forma por la unión de moléculas de β -glucosa a través de enlaces β -1,4-glucosídico, lo que hace que sea insoluble en agua, altamente cristalina y de alto peso molecular (Rhim y Perry, 2007). Contiene una media de 5.000 unidades de glucosa, de forma que los hidroxilos de cadenas adyacentes se enlazan a través de puentes de hidrógeno, haciéndolas impenetrables al agua y originando fibras compactas que constituyen la pared celular de las células vegetales. La disposición en el espacio de estas unidades y la gran cantidad de puentes de hidrógeno que se dan, le confieren unas propiedades que la hacen muy resistente cuando se somete a algún tipo de tensión (Páez, 2007).

Las moléculas de celulosa se ordenan en filas paralelas denominadas microfibrillas, el ángulo que forman las microfibrillas y el contenido de celulosa de la fibra determinan generalmente las propiedades mecánicas de las fibras celulósicas (Corrales, 2002).

2.1.2.1.2 Lignina.

La lignina es un polímero fenilpropanoide de estructura compleja que está asociado con la hemicelulosa y celulosa dentro de las paredes celulares de las plantas, especialmente en el xilema (Cadefique, 2006; Kalia et al., 2011). La lignina es totalmente amorfa e hidrofóbica (Stevens, 2010).

Constituye el segundo material más abundante en las plantas, la lignina realiza múltiples funciones como el transporte interno de agua, nutrientes y metabolitos. Proporciona rigidez a la pared celular y actúa como puente de unión entre las células vegetales, aumentando la resistencia mecánica de la planta. Los tejidos lignificados resisten el ataque de los microorganismos, impidiendo la penetración de las enzimas destructivas en la pared celular. El contenido de lignina en las fibras influencia su estructura como las propiedades y la morfología (Corrales, 2002; Mohanty *et al.* 2005).

2.1.2.1.3 Hemicelulosa.

La hemicelulosa la conforman heteropolisacáridos como glucosa, galactosa o fructosa que forman una cadena lineal ramificada que forma parte de las paredes de las diferentes células de los tejidos vegetales. Este compuesto varía dependiendo de la edad y variabilidad de las especies cultivadas y mejoradas (Mohanty *et al.*, 2005). Se caracteriza por la alta absorción de agua (Stevens, 2010).

2.1.2.2 Fique (*Furcraea spp*).

El fique es una planta originaria de América tropical, su cultivo se da de manera particular en las zonas andinas de Colombia, Venezuela y Ecuador (Mojica y Paredes, 2004). El fique, que tiene por nombre botánico *Furcraea spp*, son plantas grandes de tallo erguido, cuyas hojas son de color verde, con una estructura larga y angosta, su forma es radial (Bejarano, 2014). En Colombia se registran 20 biotipos de fique, dentro de los cuales se destacan uña de águila (*Furcraea macrophylla*), tunosa o negra común, (*Furcraea gigantea*), ceniza (*Furcraea cabuya*), bordo de oro (*Furcraea castilla*), rabo de chucha (*Furcraea andina*) (Echeverri *et al.*, 2015). En la tabla 2.1, se observa la clasificación taxonómica del fique.

Tabla 2.1

Clasificación taxonómica del fique.

Reino	Vegetal
Subclase	Monocotiledónea
Phylum	Tracheophyta
Orden	Liliflorae
División	Spermatophyta
Familia	Agavaceae
Clase	Angiospermae
Genero	Furcraea
Nombre común	Fique, cabuya, maguey

Fuente: Muñoz y Cifuentes, (2007).

2.1.2.2.1 Uña de águila (*Furcraea macrophylla*).

Tiene su origen en Colombia, en donde crece espontáneamente en los departamentos de Cundinamarca, Antioquia, Santander, Cauca, Nariño, Boyacá y Chocó (MAVDR, 2006). Produce

muy buena calidad y cantidad de fibra, en todas las condiciones, tanto en el número de fibras por hoja, como en la cantidad de fibra y resistencia (Echeverri *et al.*, 2015).

2.1.2.2.2 *El fique en Colombia.*

Colombia es el primer productor de fique a nivel mundial, posee cerca de 24.711 hectáreas de área sembrada, que son destinadas al fique, de las cuales representan 20.000 hectáreas de producción, con un rendimiento promedio nacional de 1,5 ton/ha, con 17.950 empleos directos, especialmente provenientes del grupo familiar y 10.550 empleos indirectos. El aprovechamiento del fique se ha identificado en un entorno rural de bajos ingresos, donde económicamente existen en el país, más de 70.000 familias fiqueras con pequeños productores correspondientes a 0,5–5 hectáreas de siembra y medianos productores con 5-10 hectáreas de siembra, además de comunidades campesinas, indígenas y afrocolombianas que dependen de esta labor, ubicadas en zonas marginales que conforman el grupo social más depreciado de Colombia (MADR y Cadefique, 2014).

El fique es la fibra dura natural más usada y reconocida en Colombia, esta normalmente se explota para extraer la “cabuya”, por esta razón, el fique anteriormente potencializó la industria de empaque en el país, los principales departamentos productores de fique se ubican en la región andina del país (García, 2015); actualmente en Colombia, el fique es considerado la segunda fibra en importancia después del algodón (Linares *et al.*, 2008).

En estudios realizados por Peinado *et al.* (2006), se menciona que son 13 departamentos y se calcula en 72 los municipios productores de fique. Sin embargo, los cinco principales departamentos productores Cauca, Nariño, Antioquia, Santander y Boyacá, representan el 99% de la superficie cosechada, estimada en más de 23.000 hectáreas. Dónde Cauca aparece como el mayor productor con más de 7.000 toneladas al año, siendo la producción promedio anual para Colombia durante la última década, superior a las 20.000 toneladas, así la misma haya venido descendiendo en los últimos años.

De esta producción, la mayor cantidad se destina a actividades de tipo industrial y el resto a la manufactura artesanal, siendo un cultivo de economía campesina. Actualmente existen cuatro industrias dedicadas a la producción de sacos, cordeles y lazos: la industria de Coohilados en Santander, compañía de empaques de Medellín, empresa de empaques del Cauca e hilanderías de Nariño (Delgado, 2018).

2.1.2.2.3 El fique en Nariño.

El área sembrada fue de 4.690 hectáreas, para una producción en fibra de 5.490 toneladas obteniendo un rendimiento de 1.171 ton/ha para el año 2002. En los últimos años su cultivo ha aumentado ante la utilización de subproductos como la fibra, el jugo y el bagazo (Cruz y Terán, 2008). Quince municipios de Nariño son productores de fique, entre los cuales el municipio del Tambo es el principal, aportando 14,4 % de la producción departamental con 1.071 hectáreas sembradas y distribuidas en 29 veredas (MADR, 2006).

La producción nacional ubica a Nariño con una participación en crecimiento en los últimos años hasta llegar a ser el mayor productor para el 2016, lo cual explica el interés de este cultivo en la región (Figura 2.3). A partir del posicionamiento de la participación productiva en el departamento, se evidencia a Nariño como un proveedor considerable de fibra de fique (Figura 2.4).

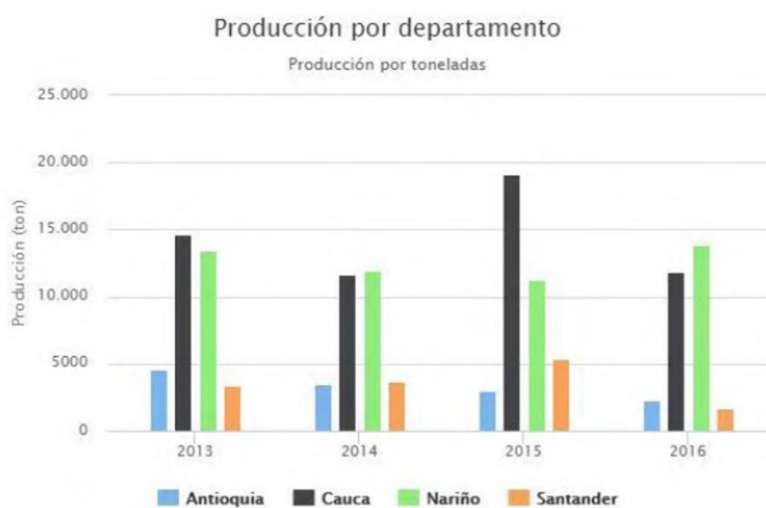


Figura 2.3. Participación departamental de fique.

Fuente: Delgado, (2018).

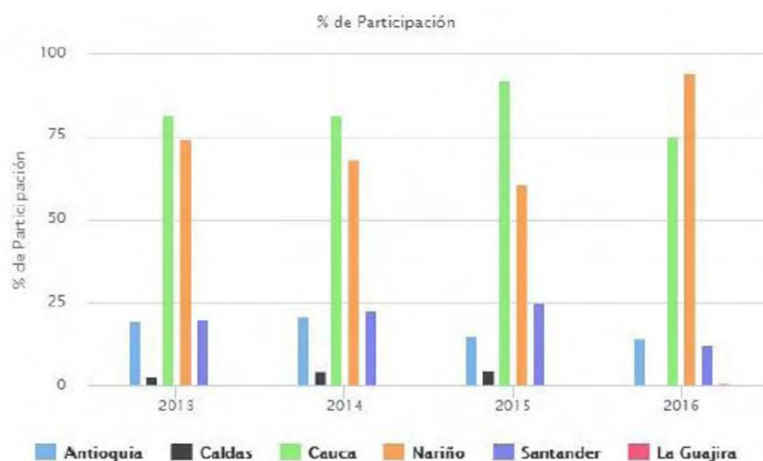


Figura 2.4. Producción nacional de fique.

Fuente: Delgado, (2018).

2.1.2.3 Algodón (*Gossypium hirsutum*).

Existen más de veinte especies salvajes consideradas parientes próximas al algodón, los verdaderos algodones se distinguen de las demás especies por la producción de fibra de algodón (Alvarez *et al.*, 2004). La tabla 2.3 muestra la clasificación taxonómica de la fibra de algodón.

Tabla 2.2

Clasificación taxonómica del algodón.

Reino	Vegetal
Subclase	Malvidae
Orden	Malvales
División	Magnoliophyta
Familia	Malvaceae
Clase	Magnoliopsida
Genero	Gossypium
Nombre común	Algodón

Fuente: Alvarez *et al.* (2004).

2.1.2.3.1 El algodón en Colombia.

El cultivo del algodón es la principal actividad agrícola en la economía del Caribe colombiano en el segundo semestre del año y el principal abastecedor de fibra a la industria nacional desde hace aproximadamente 60 años. El algodón es una especie importante en la economía colombiana,

siendo cultivada en las regiones de los valles interandinos, llanos orientales y costa caribe, con un aporte de esta última, de un 60% en la producción nacional (Espitia *et al.*, 2008).

Según Conalgodón (2007), el algodón se produce en dos grandes regiones de Colombia, costa e interior, destacándose en esta última el Valle Cálido del Alto Magdalena con los departamentos del Tolima y Huila cuyo rendimiento de fibra durante los años 2004- 2006 fue de 960 kg/ha comparado con 710 kg/ha de la costa. Este cultivo genera 13.300 empleos directos a la economía campesina, y sustenta unas 26.000 familias.

3.1.2.3.2 Fibra de algodón.

La fibra de algodón combina resistencia con una buena capacidad de absorción de humedad. La fibra de algodón está compuesta por múltiples capas, la estructura de la primera pared de la fibra de algodón (la capa superficial) llamada cutícula, tiene una mayor influencia sobre las propiedades, procesado y uso de la fibra. La fibra de algodón tiene una estructura fibrilar que consiste en una pared primaria, una pared secundaria y un lumen como lo muestra la figura 2.5 (Dochia *et al.*, 2012; Lozano, 2016).

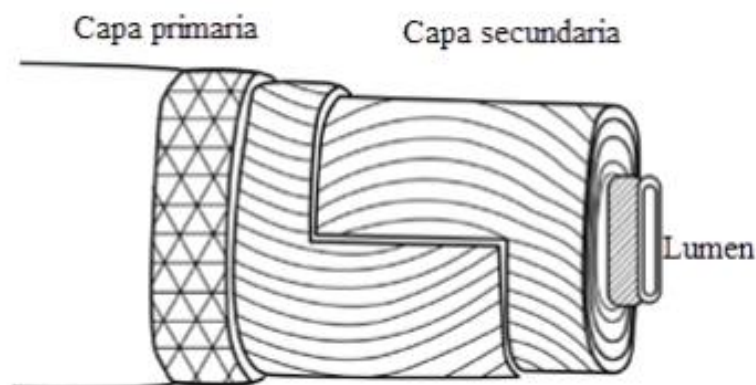


Figura 2.5. Estructura de la fibra de algodón.

Fuente: Dochia *et al.* (2012).

En la cutícula se encuentran ceras, en la pared primaria se encuentra celulosa amorfa, pectina esterificada, no esterificada y, hemicelulosa, en la pared secundaria se encuentra celulosa cristalina en diferentes capas y finalmente se encuentra el lumen, esto se puede evidenciar en la Figura 2.6 (Dochia *et al.*, 2012).

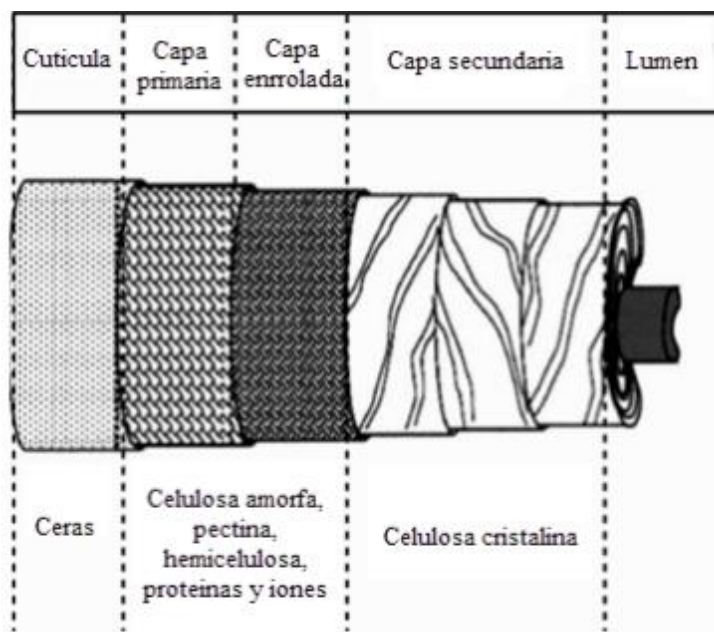


Figura 2.6. Representación esquemática de la fibra de algodón.

Fuente: Dochia *et al.* (2012).

2.1.3 Tutorado de arveja.

El tutorado agrícola es un sistema de conducción, utilizado en los diferentes tipos de cultivos que tienen crecimiento indeterminado, es decir, que crecen sobre la cama del surco como la arveja. El tutorado es uno de los aspectos externos más importantes que se tiene en cuenta al adoptar un sistema de siembra, ya que facilita las labores como aspersiones, control de arvenses, fertilización, cosecha, aireación de las plantas y su apropiado manejo (Forero y Ligarreto, 2009).

Según Fischer y Almanza (1993), el tutorado tiene como finalidad cambiar el hábito de crecimiento de la planta, optimizar la distribución de la luz para aumentar la tasa fotosintética y mejorar la calidad de los frutos. Arévalo y Ortega (1995), reportan que con la utilización de tutores en el cultivo de arveja se tiene un mayor rendimiento por hectárea y una mejor calidad de frutos. El mayor rendimiento se debe a que los tutores permiten aprovechar mejor el espacio aéreo, disponiendo de mayor área de terreno para sembrar más plantas. La mejor calidad de los frutos se debe a la mayor iluminación que recibe el cultivo, favoreciendo un mejor llenado de las vainas; además, la posición vertical de las plantas contribuye a un control más eficiente de plagas, enfermedades y daños por pájaros.

Se requieren de 30 a 35 kg de semilla por hectárea cultivada. Con tutor vertical se siembra a distancias entre surcos de 1 y 1,2 m, 10 cm entre sitios, una semilla por sitio o cada 20 cm dos

semillas por sitios, o cada 30 cm tres semillas por sitio. Para tutorar se usan varas de madera de 2,0 a 2,5 m cada 4 a 5 m, fibra de polipropileno gruesa (templete) para colgar allí las plantas en amarre individual con fibra de polipropileno (delgada) cuando la planta tiene de 10 a 20 cm de altura.

Con tutor horizontal se siembra a distancias entre surcos de 1 y 1,2 m, 10 cm entre sitios, una semilla por sitio o cada 20 cm dos semillas por sitio, o cada 30 cm tres semillas por sitio; se utilizan varas de 2,5 m colocadas a una distancia de 4 m. A medida que va creciendo la planta se van pasando hiladas horizontales cada 15 a 20 cm durante la etapa de crecimiento (siete a diez hiladas) con fibra de polipropileno gruesa (menos gruesa que el templete) encanastándola, alternando una por cada lado (Castro, 1995).

Según Forero y Ligarreto (2009), Entre los dos sistemas de tutorado mencionados, el vertical se utiliza en más del 90% de los cultivos por su facilidad en realizar la labor, por la estabilidad y resistencia del tutor, ya que, en el encanaste con frecuencia hay volcamiento de plantas causado por el peso del follaje del cultivo.

2.1.4 Propiedades mecánicas y espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR)

2.1.4.1 Pruebas de tensión y Propiedades mecánicas.

Rodríguez, (2013) describe las pruebas de tensión como una herramienta que se utiliza para evaluar propiedades mecánicas, principalmente la resistencia a la tracción, la elongación y módulo de Young de un material. En esta prueba, una muestra del material se estira a velocidad constante hasta la fractura, que se produce en un tiempo relativamente corto. La fuerza que actúa sobre la muestra sometida a ensayo se dibuja en un registrador, mientras que la deformación correspondiente se obtiene de la señal generada por un texturómetro, sujeto a la muestra. Ochoa, (2005) describe que los ensayos esfuerzo-deformación aportan información sobre las propiedades mecánicas más importantes, rigidez y resistencia a la tracción.

2.1.4.1.1 Resistencia a la tracción.

La resistencia a la tracción es el esfuerzo máximo que un material puede resistir antes de romper, bien por fractura o por excesiva deformación. La resistencia a la tracción es la resistencia que ofrece un material al ser extendido (Mora *et al.*, 2009)

2.1.4.1.2 Elongación.

Es el valor de la deformación medido en el punto de carga máxima, se expresa como un porcentaje de la longitud inicial de la zona de sección uniforme (Romero, 2010; Rodríguez, 2013).

2.1.4.1.3 Módulo de Young.

La rigidez representa la resistencia a la deformación y se mide mediante el módulo elástico o módulo de Young, que da idea de la resistencia de los materiales a la deformación cuando se aplican fuerzas externas. Explícitamente, el módulo de Young es la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en la zona elástica, zona recta de dicha curva, es decir, es la relación del esfuerzo aplicado con la deformación resultante (Ochoa, 2005; Rodríguez, 2013).

2.1.4.2 Espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR).

Las moléculas tienen un conjunto de vibraciones de resonancia producidas por energía térmica. Cuando una molécula es expuesta a radiación desde una fuente de energía térmica, absorbe esta radiación solo a las frecuencias que correspondan a su modo de vibración molecular, en la región del infrarrojo del espectro electromagnético, siendo localizada ésta entre las regiones visibles y la de microondas (Garside y Wyeth, 2003). De esta forma, una sustancia puede ser caracterizada midiendo la absorción de energía infrarroja de las moléculas que la componen (Hollas, 2004; Lozano, 2016).

La espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier (FTIR) es una técnica que permite analizar todas las longitudes de onda del espectro infrarrojo simultáneamente, ofreciendo un método rápido y confiable para el análisis de muestras conteniendo una o más sustancias químicas (Garside y Wyeth, 2003; Hollas, 2004). Cuando se realiza FTIR en fibras naturales se buscan unas bandas características de celulosa, lignina, hemicelulosa y pectina, la Tabla 2.4 muestra las bandas características de materiales lignocelulósicos (Garside y Wyeth, 2003; Valadez *et al.*, 1999).

Tabla 2.3*Picos característicos de espectroscopia infrarroja para materiales lignocelulósicos.*

Posición de la banda (cm ⁻¹)	Asignación
3550 – 3650	Estiramiento libre de O-H o debilitamiento del enlace H hidroxilo
3200 – 3400	Estiramiento de O-H en el enlace H hidroxilo
2840 – 2940	Estiramiento de la región C-H 2725 Armónico de interacción de C-O y deformación de O-H
2725 – 2568	Armónico de interacción de C-O y deformación de O-H
1720 – 1740	Estiramiento de C=O en carbonilo
1625 – 1660	Absorción de moléculas de agua en celulosa nanocristalina
~ 1600	Vibración del anillo esqueleto aromático y vibraciones debido al agua absorbida
~ 1505	Vibración del anillo esqueleto aromático
1450 – 1475	Deformación de C-H y CH ₂ (simétrico) + deformación de OH
1400 – 1430	Deformación de C-H (grupo metoxil en lignina)
~ 1370	Deformación de C-H (simétrica)
~ 1327	Estiramiento de C-O (lignina) y movimiento de CH ₂ en celulosa
1250 – 1260	Estiramiento de C-O (lignina)
1240 – 1245	Enlace C-O del grupo acetyl en hemicelulosa
~ 1230	Deformación del fenol O-H (lignina)
1160 – 1230	Estiramiento de C-O de grupos éster
1150 – 1160	Estiramiento de C-O-C (anti simétrico) en celulosa y movimiento del aromático C-H-CH ₂ en celulosa
1098 – 1120	Estiramiento de C-O del enlace glicosida β
~ 1060	Vibración del estiramiento de C-OH
1036	Deformación de C-O en lignina y estiramiento de C-O en celulosa

Posición de la banda (cm^{-1})	Asignación
1003	Estiramiento de C-O en celulosa
890 – 900	Anti simétrico estiramiento propio del enlace β en celulosa
830	Vibración del aromático C-H de lignina

Fuente: Mosiewicki *et al.* (2011).

Estos métodos son diversamente empleados para el estudio de fibras, no solo para identificar las mismas y su estado de deterioro, sino también para confirmar cambios después de un tratamiento. Estas técnicas han sido usadas para distinguir categorías de celulosa, fibras naturales regeneradas y sintéticas (Garside y Wyeth, 2003). Muñoz - Velez *et al.* (2014) utilizó esta técnica en la región de absorción comprendida entre $650 - 4000 \text{ cm}^{-1}$.

2.1.5 Impregnación a vacío

Fito *et al.* (2001) mencionan las tecnologías basadas en la ingeniería de matrices (IM) donde se aplica el conocimiento de la matriz (muchas veces alimentaria) para promover y controlar los cambios adecuados para mejorar algunas propiedades en los productos alimenticios. La IM es una herramienta de la ingeniería de alimentos que utiliza los conocimientos sobre composición, estructura y propiedades de la matriz estructural de un alimento para producir y controlar cambios que mejoren sus propiedades funcionales y/o sensoriales (Chiralt *et al.*, 1999; Peña *et al.*, 2015).

La IM utiliza la impregnación a vacío (IV) como mecanismo de incorporación de disoluciones, suspensiones o emulsiones que contienen compuestos fisiológicamente activos, permitiendo introducir de manera controlada una cantidad de solución en la estructura porosa de una matriz (Fito *et al.*, 2001; Fito, 1994; Fito y Pastor, 1994).

La IV aprovecha la microestructura porosa de las matrices (en su gran mayoría alimenticias), para reemplazar el gas ocluido en su estructura celular por solutos contenidos en un líquido de impregnación mediante acción capilar y gradientes de presión impuestas en el sistema (Fito, *et al.*, 1996; Laurindo *et al.*, 2007).

La IV también es una operación de transferencia de materia entre un medio líquido y un sustrato sólido con estructura porosa. La creación de gradientes de presión en el sistema constituido por el sólido sumergido en el seno del líquido provoca la salida de gas y una importante entrada de líquido en el interior de la estructura porosa (Fito, 1994). De esta forma es posible eliminar el aire ocluido en los poros e incorporar solutos de forma controlada en la estructura matricial del alimento poroso

modificando convenientemente su composición original sin prácticamente afectar su estructura (Betoret *et al.*, 2012).

La técnica de IV hace posible la incorporación de sustancias disueltas, emulsificadas o en suspensión directamente dentro de estructuras porosas, de una forma controlada, y no destruye la matriz inicial del producto, sino que únicamente ocupa una parte de su fracción porosa inicial permitiendo la obtención de rápidos cambios composicionales y estructurales en las matrices que así lo permiten, que promueve cambios composicionales en alimentos porosos y mejora propiedades físicas como el color y la textura como es el caso de frutas, hortalizas, tubérculos, entre otros, las cuales poseen características porosas en su estructura, permiten el proceso de incorporación de componentes mejoradores de textura, sabor, color o de componentes fisiológicamente activos (Fito *et al.*, 2001).

El proceso de IV es afectado por numerosos factores internos y externos. Los factores internos incluyen propiedades del tejido a impregnar tales como su estructura, porosidad, propiedades mecánicas, la forma y tamaño de los capilares, así como la forma y tamaño de la muestra, viscosidad de la solución de impregnación o solución externa, propiedades físicas y químicas de los compuestos fisiológicamente activos. Los factores externos más importantes que influyen en la velocidad de impregnación incluye el nivel de presión aplicado, la composición y concentración de la solución, temperatura, la relación solución/matriz, el tiempo requerido para alcanzar y permanecer en presión de vacío así como la exposición a la presión atmosférica (Fito *et al.*, 1996; Gras *et al.*, 2002; Laurindo *et al.*, 2007; Zhao y Xie, 2004).

Como no se requiere de la utilización de altas temperaturas se minimiza el daño a los tejidos y se preservan los componentes activos naturales (Betoret *et al.*, 2012). La posibilidad de incluir en la estructura matricial de un alimento poroso componentes de interés apunta a la impregnación a vacío como una técnica eficaz para el diseño de nuevos productos nutricionalmente equilibrados, saludables y/o funcionales (Fito *et al.*, 2001). El hecho de que los componentes incorporados se queden incluidos en la matriz estructural del alimento natural supone una importante protección de los mismos frente a las reacciones de deterioro (Betoret *et al.*, 2011).

2.1.5.1 Mecanismo hidrodinámico (MHD) y fenómeno deformación – relajación (FDR).

Fito y Pastor explicaron el principal mecanismo implicado en la IV denominado mecanismo hidrodinámico (MHD), el cual ha sido descrito y modelado (Fito, 1994; Fito y Pastor, 1994). Este mecanismo es responsable de los procesos de IV de matrices porosas cuando son impuestas

presiones reducidas en un sistema sólido-líquido seguidas por la restauración de la presión atmosférica. El MHD juega un importante papel en las operaciones de vacío-sólido-líquido, porque los cambios de la presión en el sistema producen fuerzas motrices responsables de la transferencia de masa (Fito y Pastor, 1994; Fito y Chiralt, 1995; Fito *et al.*, 1996) .

El análisis de algunos resultados obtenidos de la en operaciones VSL (Mata y Maupoey, 1992; Fito y Pastor, 1994) mostraron que el MHD puede ocurrir junto con los fenómenos de deformación-relajación (FDR) (Fito y Chiralt, 1995); Debido al carácter viscoelástico de los alimentos, se ha llegado a la conclusión de que el MHD puede tener lugar acoplado a FDR de la matriz sólida del alimento poroso.

En 1996, Fito y colaboradores propusieron el primer modelo matemático, en el cual se contempla tanto el MHD como el FDR; En este caso, debe suponerse que el acoplamiento de ambos, Los fenómenos, MHD y FDR, afectarán tanto su cinética como el equilibrio final del sistema. La acción del MHD y FDR se ve muy afectada por la microestructura de la matriz y sus propiedades mecánicas, pudiendo a su vez ambos fenómenos provocar importantes cambios en las propiedades físicas del producto (Barat *et al.*, 1994; Fito y Pastor, 1994).

Como ya se mencionó, la IV depende de la estructura del tejido (distribución y tamaño de los poros), tiempo de relajación de la matriz sólida, velocidad de transferencia del gas/líquido, tamaño y forma de la muestra, y las condiciones del proceso, tales como presión de vacío, temperatura, tiempo de pulso a vacío. Estos factores influyen en la cinética de los tres procesos que se producen de forma acoplada, en la impregnación a vacío: salida de gas, deformación- relajación de la matriz sólida y entrada de líquido (Fito *et al.*, 1996; Laurindo *et al.*, 2007).

El modelo matemático para el proceso IV ha sido desarrollado en términos de la respuesta del tejido de la matriz al proceso IV, el acoplamiento MHD-FDR en la matriz del producto ha sido modelado, reflejando cambios en el volumen del producto al final de las etapas a vacío y a presión atmosférica ;fracción y deformación volumétrica de impregnación, tanto en la etapa de vacío (X_1 :m³ de solución impregnada / m³ de muestra inicial y γ_1 m³ de deformación en la muestra / m³ de muestra inicial), así como en el proceso global con el restablecimiento de la presión atmosférica (X, γ) y la porosidad eficaz o disponible (ϵ_r : m³ de gas / m³ de muestra) (Fito *et al.*, 1996; Salvatori *et al.*, 1998; Schulze *et al.*, 2014).

El resultado final de la IV dependerá de cuál es el valor del factor limitante en cada período. El parámetro más relevante en los procesos de aplicación de vacío es la fracción volumétrica que

corresponde a la fracción de la estructura porosa ocupada por el líquido de solución de impregnación y la cual depende de las propiedades mecánicas y estructurales de los tejidos (Gras *et al.*, 2003; Salvatori *et al.*, 1998; Roa *et al.*, 2001).

En el primer paso del proceso, la matriz inmersa en la solución externa es expuesta a una presión negativa, aplicada por un tiempo suficiente hasta asegurar la remoción del aire atrapado en el espacio poroso del alimento y parte de la solución nativa (paso de vacío) (Fito *et al.*, 1996; Fito y Pastor, 1994). Posteriormente, cuando se restaura la presión atmosférica, se crea un nuevo gradiente de presiones que actúa como fuerza impulsora para el ingreso del líquido en los espacios intercelulares o poros del producto. Esto involucra la entrada del líquido externo por todos los poros capilares, controlada por la expansión/compresión del gas interno hasta alcanzar el equilibrio entre la presión interna y externa (Fito, 1994). La cantidad de líquido impregnado en la estructura, dependerá del nivel de desgasificación y, por lo tanto, de la presión de trabajo. La figura 2.7 muestra un diagrama de los fenómenos MHD y FDR (Barat *et al.*, 2001).

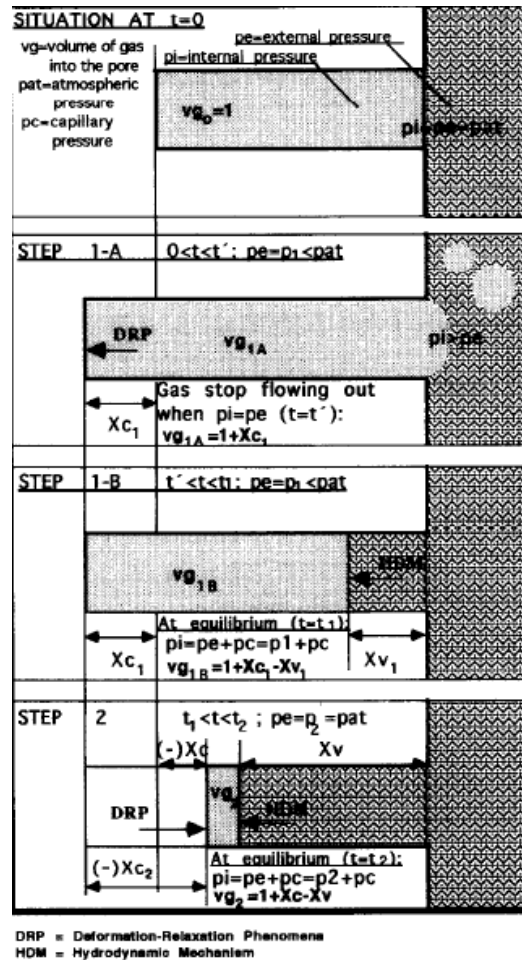


Figura 2.7. Diagrama de un sistema sólido-líquido, sufriendo los fenómenos relajación-deformación seguido por el mecanismo hidrodinámico.

Fuente: Gilibert, (2002).

t = tiempo, vg = volumen del gas dentro del poro, $Patm$ = presión atmosférica, Pi = presión interior, Pe = presión exterior, DRP =fenómeno relajación-deformación, MHD =mecanismo hidrodinámico, Xv =fracción volumétrica ocupada por el líquido, Xc = incremento de la fracción volumétrica en el poro.

Gilibert, (2002) explica el proceso que se lleva a cabo en la IV:

- Al tiempo 0 ($t=0$) se tiene un volumen de gas atrapado en el poro antes de cualquier interacción sólido-líquido.
- En la etapa 1-A se aplica vacío para aumentar a presión interna (Pi) respecto a la presión externa (Pe) provocando que el gas atrapado en el poro se expande y fluya hacia el exterior teniéndose una reducción del volumen del gas que se encontraba dentro (vg), esto provoca que la matriz sólida se deforme.

- En la etapa 1-B la salida del gas del poro cesa cuando las presiones internas y externas se igualan ($P_i=P_e$), para esto, el tamaño del poro se ha incrementado respecto al tamaño inicial. El sistema se mantiene esta presión de equilibrio que es la presión de trabajo por un cierto tiempo (t_1), entonces ocurre el MHD como consecuencia del gradiente de presiones entre la presión interna del gas atrapado en los poros y la presión del sistema, provocando que los espacios intercelulares se llenen parcialmente de líquido.
- En la etapa 2 se restablece la presión atmosférica al sistema por un cierto tiempo (t_2) y nuevamente se presenta el MHD por diferencia entre las presiones interna y externa, durante este tiempo cierta cantidad de líquido es transportado al interior de la matriz en lugar del gas que inicialmente tenía, provocando así un cambio de volumen y peso que se determina analíticamente.

2.1.6 Modelo matemático.

Un modelo matemático es la representación de un sistema real, cuya descripción de sus propiedades y características se lleva a cabo en términos de variables matemáticas y operaciones. Un modelo permite disminuir la complejidad de parámetros de un proceso, reducir el número de experimentos, ayudando a ahorrar, en términos de energía, tiempo y costos de operación, así como también extrapolar los resultados (Banga *et al.*, 2003).

Actualmente, el modelado matemático es una herramienta básica para diseñar y optimizar los procesos industriales, puesto que permite predecir el desarrollo de un proceso y, en consecuencia, realizar la optimización. Es importante tener en cuenta factores al momento de seleccionar un modelo matemático que permita describir un proceso, tales como: la fidelidad, la exactitud, la reproductibilidad, el costo, el tiempo, la complejidad, la capacidad y la posibilidad de aplicación (Banga *et al.*, 2003; Costa y Oliveira, 1999).

Existen varios tipos de modelos que se pueden utilizar, entre ellos los modelos empíricos, los cuales son basados en la observación y no pretenden describir cómo tiene lugar el proceso y sólo interpretan de forma empírica los datos del proceso. Estos modelos son útiles con fines de diseño, especialmente cuando los problemas a resolver son excesivamente complicados (Banga y Singh, 1994; Costa y Oliveira, 1999).

2.2 Antecedentes.

2.2.1 Fibras vegetales

Las fibras naturales han recibido mucha atención en las últimas décadas debido a propiedades como su costo competitivo, buenas propiedades mecánicas específicas, a su capacidad de actuar como aislante térmico, biodegradabilidad y renovabilidad (Van de Weyenberg *et al.*, 2003).

Varios autores citados por Idicula *et al.* (2006); Joseph *et al.*, (1999); Rao y Rao, (2007) reportan que las propiedades mecánicas de las fibras resultan bastante diversas y dependen mucho de las condiciones en las que se encuentra la fibra.

Mediante procesos de diversificación del uso del fique, las fibras pueden ser utilizadas como aglomerados y material para fibroreforzados (Mojica y Paredes 2004).

Varios autores citados por Córdoba *et al.* 2010 y Tapia *et al.* 2006, utilizan fibras vegetales como refuerzos de materiales compuestos, mejorando sus propiedades mecánicas. No obstante, estos mismos autores sugieren tratamientos para modificar superficialmente las fibras vegetales y mejorar su acoplamiento en materiales compuestos.

Revelo *et al.* (2019), evaluó el comportamiento de propiedades mecánicas de 3 fibras vegetales: fique, algodón y plátano, como alternativa de tutorado de arveja (*P. Sativum* L.). Evaluando parámetros mecánicos como el módulo de Young, carga máxima y elongación, comparando los resultados con fibra de polipropileno. Descartando la fibra de plátano por su acelerada pérdida de calidad mecánica, mientras que, las fibras de fique y algodón presentan menor pérdida de calidad mecánica, siendo una opción para su implementación en el tutorado, además, de ser biodegradables. No obstante, recomienda elaborar un estudio para proteger a las fibras de las afectaciones ambientales para conseguir una menor pérdida de calidad mecánica de las mismas.

2.2.2 Impregnación a vacío.

Dentro de la numerosas aplicaciones que se han planteado se puede clasificar según el objetivo perseguido en dos grupos: a) modificación de las propiedades físico-químicas (reducción del pH, reducción de la actividad de agua, cambios en la propiedades térmicas, mejora en la estructura de frutas y vegetales, mejora en el color, sabor y aroma) y b) modificación de las propiedades funcionales del producto (Betalleluz, 2016).

Diferentes aplicaciones de la técnica IV han sido realizados en el campo de los alimentos (Alzamora *et al.*, 2005; Betoret *et al.*, 2003; Guillemín *et al.*, 2008; Phoon *et al.*, 2008), donde la mayoría de las publicaciones se relacionan principalmente con frutas y pocas en hortalizas (Anino

et al., 2006; Botero, 2008; Castelló *et al.*, 2006; Gómez y Artés, 2004; Gras *et al.*, 2003; Gras *et al.*, 2002; Karakacs y Yildiz, 2007; Zhao y Xie, 2004).

Además, la técnica ha sido aplicada con éxito en el salado de quesos, pescados y productos cárnicos (Barat *et al.*, 2001; Fito *et al.*, 2001), deshidratación osmótica de frutas, fortificación de frutas y vegetales con diferentes componentes fisiológicamente activos (vitaminas, minerales, antioxidantes, enzimas, depresores de aw, reguladores de pH, antimicrobianos, fibra dietaria, probióticos, prebióticos, simbióticos y compuestos fenólicos) (Betoret *et al.*, 2012).

Se reportan diversos estudios de impregnación relacionados con las propiedades mecánicas, firmeza y/o textura en matrices como durazno, fresa, manzana, zanahoria, calabacín, pera. De igual manera, entre los líquidos de impregnación utilizados en diferentes estudios relacionados con las propiedades mecánicas se reportan las siguientes: pectinmetil esterasa, Cl_2Ca , solución de Cl_2Ca y espermine, extracto de uva, sucrosa, jarabe de fructosa de maíz, pectina de alta metilación, calcio y zinc, solución acuosa de quitosan y ácido acético (film comestible), solución de maltodextrina, 4-hexylresorcinol, citrato, ascorbato y lactato de calcio (Barat *et al.*, 1994; Degraeve *et al.*, 2003; Del Valle *et al.*, 1998; Javeri *et al.*, 1991; Occhino *et al.*, 2011; Banjongsinisiri *et al.*, 2004; Perez *et al.*, 2011; Ponappa *et al.*, 1993; Vargas *et al.*, 2009; Zhao y Xie, 2004).

Autores reportados por Corzo y Barrios, (2012) modelaron la fracción volumétrica en matrices alimentarias, mediante el análisis de su comportamiento en función de la temperatura, presión de pulso de vacío, tiempo del pulso de vacío y tiempo de impregnación, y determinó que los mayores valores de fracción volumétrica se obtenían a la temperatura de 30 °C y que la temperatura, presión y tiempo de aplicación del pulso de vacío son los factores que más afectan su valor.

2.2.3 Modelamiento matemático en pérdida de propiedades mecánicas en fibras vegetales en el tutorado de arveja.

Revelo *et al.* (2019) modeló matemáticamente cinéticas de pérdida de calidad de las propiedades mecánicas de fibras vegetales en condiciones ambientales (cultivo) mediante el modelo empírico de Page, para la determinación de calidad de ajuste, utilizó los coeficientes estadísticos: coeficiente de determinación (R^2), error medio relativo y error porcentual promedio; en general el modelo presentó un buen ajuste a los datos experimentales con coeficientes de determinación entre 0,92 – 0,93.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general.

Evaluar el efecto de la impregnación a vacío de un recubrimiento biopolimérico sobre las propiedades físicas y mecánicas de fibras vegetales como alternativa al tutorado de arveja (*Pisum sativum* L.).

3.2 Objetivos específicos.

- Evaluar las condiciones de impregnación a vacío sobre propiedades fisicoquímicas y mecánicas de fibras vegetales.
- Modelar la cinética de pérdida de propiedades mecánicas de fibras vegetales en el tutorado de arveja (*Pisum sativum* L.).

4. METODOLOGÍA

4.1 Evaluación de las condiciones de impregnación a vacío sobre propiedades fisicoquímicas y mecánicas de fibras vegetales.

4.1.1 Localización de la investigación.

La investigación se llevó a cabo en el laboratorio de investigación en conservación y calidad de los alimentos (Imagen 4.1), perteneciente al grupo de apoyo a la investigación y desarrollo agroalimentario (GAIDA) de la Facultad de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad de Nariño – sede Torobajo. Las pruebas en campo se realizaron en el centro internacional de producción Limpia Lope del Sena (Imagen 4.2). Estas instituciones están localizadas en el municipio de San Juan de Pasto a 2.527 msnm, temperatura promedio de 14 °C y una humedad relativa entre 70% (Cerón *et al.*, 2015).



Imagen 4.1. Laboratorio de investigación en conservación y calidad de los alimentos.

Fuente: Ramos, (2018).



Imagen 4.2. Centro internacional de producción Limpia Lope – SENA.

Fuente: Este estudio.

4.1.2 Material experimental.

Para evaluar las condiciones de impregnación a vacío se utilizó: fibras vegetales (fibra de fique y algodón), emulsión de impregnación (recubrimiento biopolimérico) y equipo de impregnación a vacío. Material proporcionado por el proyecto “Investigación para el mejoramiento de la tecnología de producción de arveja (*P. sativum* L.) en el departamento de Nariño”

4.1.2.1 Emulsión de impregnación.

Se utilizó un recubrimiento biopolimérico tipo mezcla, para efectos del presente estudio se denominó emulsión de impregnación (EI). Se utilizó pectina de alto metoxilo (5,0%) como componente base, glicerol como agente plastificante (4,5%), tween 80 como emulsificante (2,0%) y parafina sólida como compuesto hidrofóbico (4,0%). Las anteriores concentraciones fueron en base acuosa.

Se preparó la dilución de pectina en agua destilada, a temperatura de $60 \pm 2^\circ\text{C}$ en una plancha de calentamiento y agitación digital IKA CMAG HS7 por 5 minutos, posteriormente, se adicionaron el plastificante y emulsificante. Luego, se homogenizaron mecánicamente a 1500 rpm con un homogenizador análogo D160. Por otra parte, el componente hidrofóbico se calentó a $60 \pm 2^\circ\text{C}$. Finalmente, la dilución de componente base, plastificante y emulsificante se trasvasó al recipiente con el componente hidrofóbico para homogenizar mecánicamente. Finalmente, se dejó reposar hasta temperatura ambiente (López *et al.*, 2019). Este procedimiento se muestra en la imagen 4.3. La emulsión de impregnación fue descartada y remplazada al finalizar cada corrida experimental de cada fibra vegetal del diseño experimental.



Imagen 4.3. Procedimiento de elaboración de la emulsión de impregnación.

Fuente: Este estudio.

4.1.2.2 Equipo de impregnación a vacío.

Se trabajó con un equipo marca TIBOX fabricado por la empresa CENTRICOL S.A.S. el cual consta de un tanque de inmersión en acero inoxidable (1) con capacidad máxima de 6 L con resistencia eléctrica (2) al fondo del mismo, canastilla en acero inoxidable desmontable para depositar muestras (3), termómetro de termocupla digital (4), válvula de vaciado para el equipo (5), tapa de cierre hermético en acero inoxidable (6). El equipo cuenta con tablero de control (7), compuesto por controlador y medidor digital de tiempo, temperatura y presión; interruptor análogo (8) de encendido y apagado para la resistencia eléctrica e interruptor general que controla el funcionamiento. Por otra parte, se encuentra la bomba de vacío (9), trampa de gases (10), vaso recolector de residuos (11), vacuómetro (12), válvula de salida de presión (13), sistema de poleas para levantar y cerrar la tapa de la cámara de vacío (14) y condensador (15) (Figura 4.1) (Ramos, 2018).

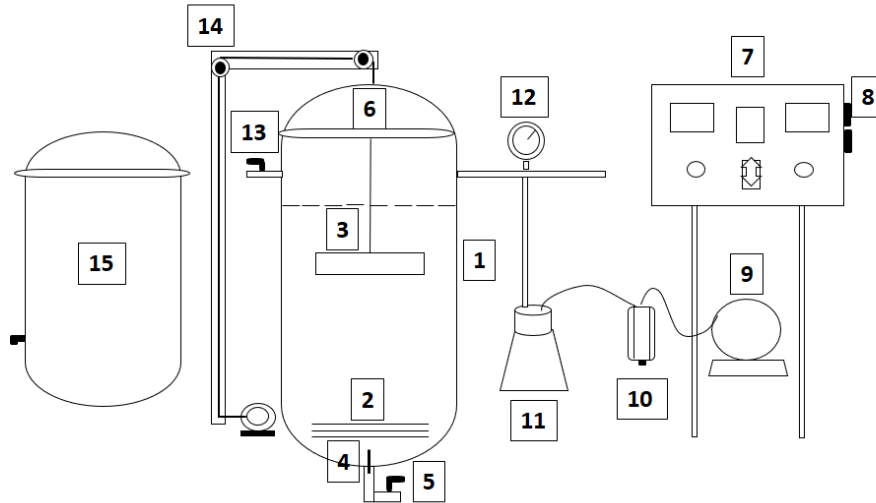


Figura 4.1. Esquema de equipo de impregnación a vacío.

Fuente: Ramos, (2018).



Imagen 4.4. Equipo de impregnación a vacío.

Fuente: Este estudio.

4.1.2.3 Fibras vegetales.

Se utilizaron fibras de fique (*Furcraea spp.*) y algodón (*Gossypium hirsutum*), estas materias primas fueron obtenidas del centro de acopio de la ciudad de San Juan de Pasto. En la imagen 4.5 se observan las fibras vegetales utilizadas.



Imagen 4.5. Fibras vegetales; fibra de fique (*Furcraea spp*) y fibra de algodón (*Gossypium hirsutum*).

Fuente: Este estudio.

4.1.3 Caracterización fisicoquímica, mecánica y análisis por espectroscopia infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) de fibras vegetales.

4.1.3.1 Caracterización fisicoquímica de fibras vegetales.

Las propiedades fisicoquímicas de fibras vegetales se realizaron para fibras vegetales sin impregnar e impregnadas a vacío. Se realizaron ensayos de peso (4.1.3.1.1), diámetro (4.1.3.1.2), volumen (4.1.3.1.3), densidad, densidad real (ρ_r) y densidad aparente (ρ_{apm}) (4.1.3.1.4), humedad (4.1.3.1.5) y viscosidad de la EI (4.1.3.1.6). Los ensayos fueron realizados por triplicado.

4.1.3.1.1 Peso.

Se utilizó una balanza analítica marca OHAUS modelo PA 214, las fibras evaluadas tuvieron un largo de $2 \text{ m} \pm 0,02$.



Imagen 4.6. Determinación de pesos de fibras vegetales.

Fuente: Este estudio.

4.1.3.1.2 *Diámetro.*

Se utilizó un equipo de estereomicroscopía óptica marca Zeiss modelo Discovery V8. El cual fue manejado por medio del software ZEN BLUE 2012.

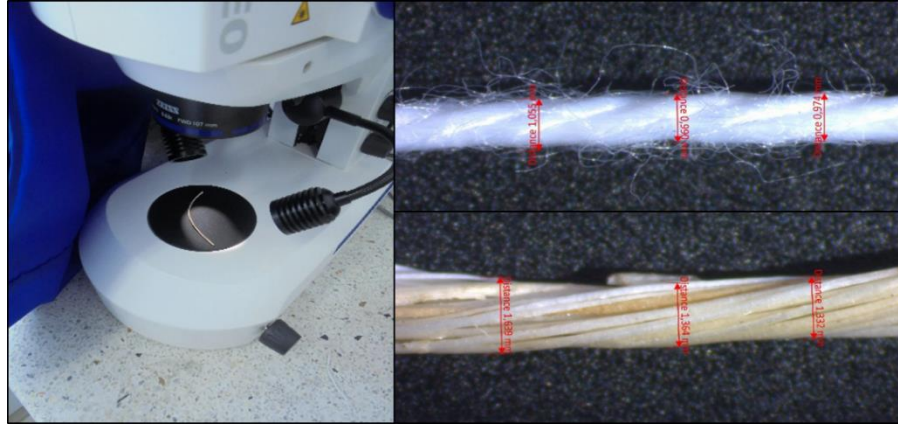


Imagen 4.7. Determinación de diámetro de fibras vegetales.

Fuente: Este estudio.

4.1.3.1.3 *Volumen.*

Se utilizó el método descrito por García, (2003) en estudios de impregnación a vacío, utilizando las dimensiones de las fibras vegetales (ecuación 1).

$$V = \pi * r^2 * l \text{ Ec. (1)}$$

Dónde: r = radio de la fibra vegetal; l = largo de la fibra vegetal; $\pi = \text{cte} = 3,1415$.

Posteriormente, con los valores medios se procede a resolver la respectiva ecuación.

4.1.3.1.4 *Densidad, Densidad real (ρ_r) y densidad aparente (ρ_{apm}).*

Fueron utilizados los métodos citados por Cerón *et al.*, (2015) y Betalleluz (2016). La determinación de la densidad de la emulsión de impregnación, se realizó por el método del picnómetro a 25°C (Imagen 4.8).

Las determinaciones de las densidades real y aparente en fibras vegetales se realizaron utilizando picnómetro, agua destilada como líquido de referencia a una temperatura de 25 °C. Para el cálculo de la densidad real se empleó la ecuación 2:

$$\rho_r = \frac{(wps - wp)}{(wpl - wp) - (wpls - wps)} \rho_l \text{ Ec. (2)}$$

Dónde: wps=Masa del picnómetro con la muestra; wp=Masa del picnómetro vacío; wpl=Masa del picnómetro con el líquido; wpls =Masa del picnómetro con la muestra y el líquido; ρ_l =Densidad del líquido.

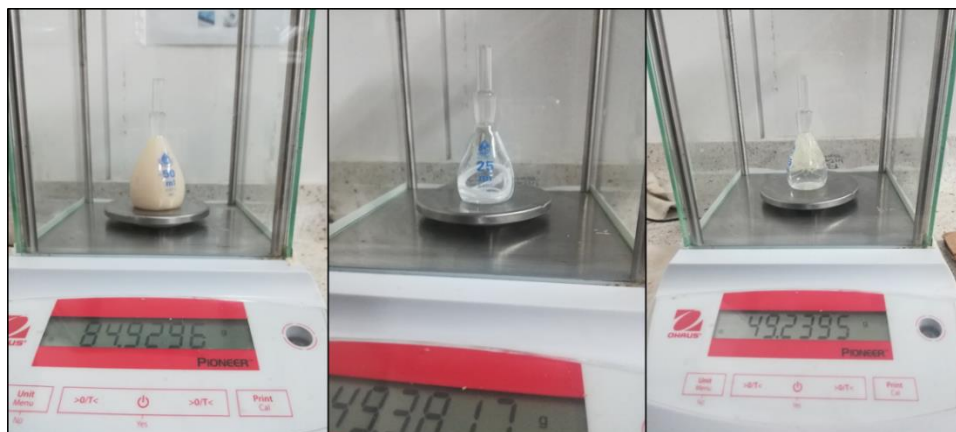


Imagen 4.8. Determinación densidad, densidad real (ρ_r) y densidad aparente (ρ_{apm}) de fibras vegetales.

Fuente: Este estudio.

4.1.3.1.5 Humedad.

El contenido de humedad fue determinando mediante balanza analítica de humedad (Versión 1.1, Kern DBS 60-3, KERN & Sohn GmbH, Alemania) (Imagen 4.9). Se tomaron muestras de $1.00 \text{ g} \pm 0.04 \text{ g}$ sometidas a una temperatura de $220 \text{ }^\circ\text{C}$.

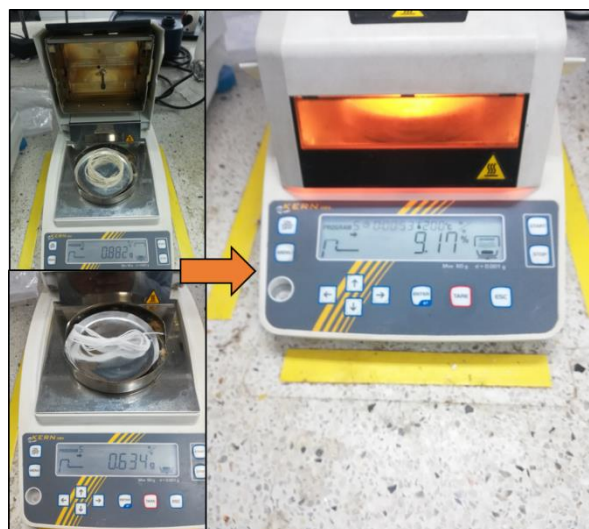


Imagen 4.9. Determinación de humedad.

Fuente: Este estudio.

4.1.3.1.6 Viscosidad.

La viscosidad se determinó utilizando viscosímetro reómetro (Ametek Brookfield, DV3T, Massachusetts, USA) (Imagen 4.10).



Imagen 4.10. Determinación de viscosidad.

Fuente: Este estudio.

4.1.3.2 Caracterización mecánica y composicional de fibras vegetales.

Las propiedades mecánicas se determinaron con un texturómetro LS1 (Test and Calibration Instruments Ametek, Lloyd Materials testing, USA) incorporando mordazas de agarre para fibras, se evaluó resistencia a la tracción (MPa), elongación total a fuerza máxima (%) y Módulo de Young (MPa). Los ensayos se realizaron según la norma ASTM D3822-07, para lo cual se sujetaron 100 mm de cada fibra a las mordazas del equipo, a una velocidad de 5 mm/min, rango de carga de 1000 N, pre-carga de 1 N y longitud entre mordazas de 100 mm. El equipo fue manejado por medio del software NEXYGEN *Plus*. Este análisis se llevó a cabo mínimo por quintuplicado, ya que, las fibras vegetales en específico la fibra de fique (*Furcraea spp*) presentó alta variabilidad.

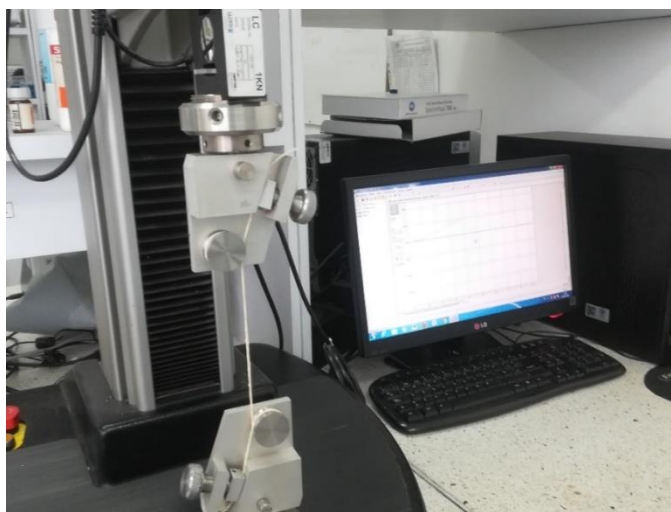


Imagen 4.11. Determinación de propiedades mecánicas de fibras vegetales.

Fuente: Este estudio.

La caracterización composicional se realizó mediante un análisis de bromatología en laboratorios especializados de la universidad de Nariño, por los métodos Van Soest Secuencial Oxidación KMnO₄ para el caso de lignina y, Van Soest Secuencial para el caso de celulosa y hemicelulosa y, en todos los casos por técnicas Gravimétricas

4.1.4 Impregnación a vacío de fibras vegetales.

Una vez determinadas las propiedades fisicoquímicas, mecánicas y, realizado un análisis FITR a las fibras vegetales, se procede a la impregnación a vacío.

4.1.4.1 Descripción del proceso de impregnación a vacío.

Se empleó los métodos descritos por Fito y Pastor, (1994); Fito y Chiralt, (1995); Fito *et al.*(1996); Barat *et al.* (2001). Cada tratamiento experimental se constituyó por fibras vegetales de $2\text{ m} \pm 0,02$ de largo, fueron puestas de manera envolvente en la canastilla (2) (fue necesario implementar una canastilla de dimensiones menores para optimizar espacio dentro del tanque), posteriormente, se depositaron en el porta muestras del tanque de inmersión (1) que previamente contenía la emulsión de impregnación adecuada a la temperatura del respectivo tratamiento con un nivel de llenado óptimo para una impregnación homogénea para luego cerrar el tanque con la tapa (6). Seguidamente, se enciende el equipo y se programó los parámetros de presión, temperatura y tiempo de acuerdo al ensayo a realizar, paralelamente, se baja la canastilla al fondo del tanque de inmersión por medio del sistema de poleas de la tapa. Al finalizar las respectivas condiciones de tratamiento, se retira la presión de vacío mediante la válvula de salida de vacío (13), restaurada la presión atmosférica se deja reposar por 3 minutos (tiempo de relajación) mientras las fibras permanecen inmersas. Finalmente, se escurre y se dejó secar al ambiente por 24 horas, seguidamente de 2 horas en incubadora de convección forzada digital marca GEMMY modelo IN 601. Este procedimiento se muestra en la imagen 4.12.

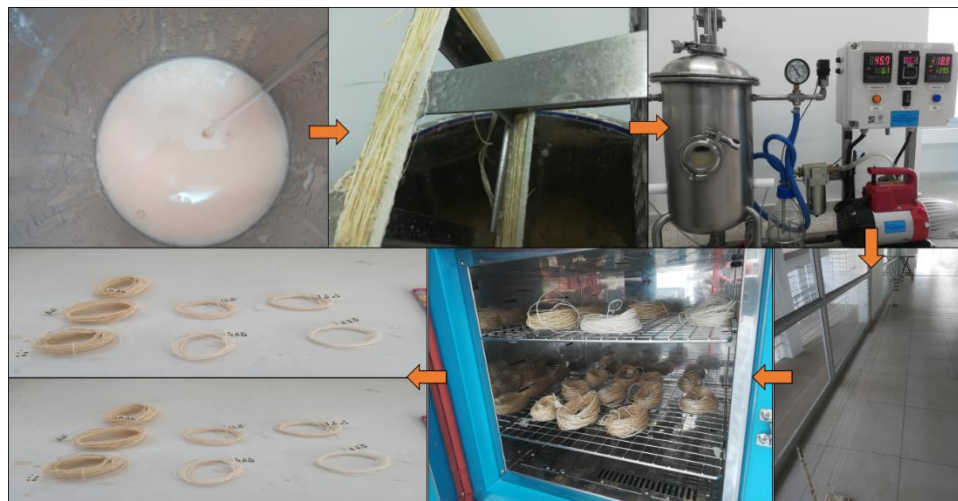


Imagen 4.12. Procedimiento de impregnación a vacío de fibras vegetales.

Fuente: Este estudio.

4.1.4.2 Descripción de los factores tiempo, temperatura y presión para el proceso de impregnación a vacío.

Se tuvieron en cuenta los siguientes factores: tiempo de inmersión, temperatura y presión.

4.1.4.2.1 Tiempo de inmersión.

Se evaluaron tiempos de inmersión adecuados para lograr una efectiva impregnación, hasta asegurar la remoción del aire atrapado en el espacio poroso de las fibras naturales y remplazar por parte de la solución externa (Fito y Pastor, 1994).

4.1.4.2.2 Temperatura de inmersión.

Si bien la impregnación no utiliza elevadas temperaturas, puede afectar las propiedades de la emulsión de impregnación y por consiguiente la muestra a impregnar (Chiralt *et al.*, 1999; Fito y Chiralt, 1995).

4.1.4.2.3 Presión de vacío.

Se asegura la remoción del aire atrapado en el espacio poroso para que luego el gradiente de presión impuestas en el sistema permita que se ocupen los espacios vacíos (Ostos *et al.*, 2012).

4.1.4.3 Evaluación y optimización de las condiciones de impregnación a vacío sobre fibras vegetales.

4.1.4.3.1 Diseño experimental.

Se utilizó un diseño multifactorial con 3 factores y dos niveles cada uno: tiempo de inmersión (2 min y 10 min), temperatura de inmersión (15°C y 60°C) y presión de vacío (0,2 bar y 0,7 bar;

medición del vacuómetro) ($P_{ABS} = P_{ATM} - P_{VACÍO}$ Ec. 3) presiones reales; $P_{ABS} = 0,54432823$ y $P_{ABS} = 0,14432823$). Como variables de respuesta: resistencia a la tracción (Mpa), elongación total a fuerza máxima (%) y módulo de Young (Mpa) las cuales fueron evaluadas por quintuplicado.

Tabla 4.1

Matriz experimental diseño factorial 2^3 para fibras de fique y algodón.

Tratamiento	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Presión (bar)
T1	2	15	0,2
T2	10	15	0,2
T3	2	60	0,2
T4	10	60	0,2
T5	2	15	0,7
T6	10	15	0,7
T7	2	60	0,7
T8	10	60	0,7

Fuente: Este estudio.

El análisis estadístico se llevó a cabo mediante el programa estadístico Statgraphics Centurión XVIII, como criterio de calidad de aceptación del modelo se tuvo en cuenta el coeficiente de determinación (R^2) y el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{aj}), los cuales comparan la variabilidad explicada por el modelo frente a la variación total. Para interpretar estos coeficientes se cumple que $0 \leq R^2_{aj} \leq R^2 \leq 100$, por ello, son deseables valores próximos a 100. Para fines de predicción se recomienda un coeficiente de determinación ajustado de al menos 70% (Gutiérrez *et al.*, 2004).

Se realizó un análisis de varianza ANOVA, en el cual se estableció la existencia o no de diferencias estadísticamente significativas de cada uno de los tratamientos analizados, de presentar significancia se realizó pruebas de rango múltiple, específicamente la Prueba de LSD de Fisher ($p < 0,05$) para determinar cuáles pares de medias presentan diferencias estadísticamente significativas.

4.1.4.3.2 *Determinación de los parámetros de impregnación a vacío característicos en fibras vegetales.*

Para determinar los parámetros que se describen en este numeral, se utilizaron las propiedades fisicoquímicas del numeral 4.1.3.1. Se utilizó el mecanismo hidrodinámico, método propuesto por Fito *et al.* (1996).

Se determinó porosidad real (ε_r ; ecuación 4), fracción volumétrica ($X = \text{cm}^3$ emulsión de impregnación/ cm^3 fibra; ecuación 5), fracción másica ($X_{HDM} = \text{g de emulsión de impregnación/ g de fibra}$; ecuación 6), deformación volumétrica ($\gamma = \text{cm}^3$ deformación/ cm^3 fibra; ecuación 7) y porosidad efectiva o disponible (ε_e ; ecuación 8).

$$\varepsilon_r = \frac{\rho_r - \rho_{apm}}{\rho_r} \text{ Ec. (4)}$$

$$X = \frac{M_f - M_i}{\rho_{dis} - \left(\frac{M_i}{\rho_{apm}}\right)} \text{ Ec. (5)}$$

$$X_{HDM} = \frac{M_f - M_i}{M_f} \text{ Ec. (6)}$$

$$\gamma = \frac{V_i - V_f}{V_i} \text{ Ec. (7)}$$

$$\varepsilon_e = \frac{X - \gamma}{\left(1 - \frac{1}{r}\right)} \text{ Ec. (8)}$$

Donde: M_i = masa inicial de la fibra vegetal (g), M_f = masa final de la fibra vegetal (g), ρ = densidad de la emulsión de impregnación (g/cm^3), ρ_r = densidad real fibra, ρ_{apm} = densidad aparente fibra, V_i = volumen inicial de la fibra vegetal (cm^3), V_f = volumen final de la fibra vegetal (cm^3), r = relación de compresión aparente ($r = P_{atm}/P_{trabajo}$), P_{atm} San Juan de Pasto = 0,74432823 bar.

4.2 Modelamiento de la cinética de pérdida de propiedades mecánicas de fibras vegetales en el tutorado de arveja (*Pisum sativum L.*)

4.2.1 Material experimental y montaje de fibras en el tutorado agrícola.

Una vez obtenido un tratamiento óptimo de impregnación a vacío para cada fibra vegetal, se procedió a realizar pruebas en cultivo, para esto se utilizó 700 m de cada fibra (Imagen 4.13). Se implementó un sistema de tutorado vertical y se evaluaron 15 surcos (3 surcos por fibra) ubicando estacas de 2.5 m de alto cada 5.0 m a distancias entre surcos de 1.0 m, se ubicó la denominada fibra “templete” entre estacas para colgar allí las plantas en amarre vertical individual con fibras de fique y algodón impregnadas a vacío (impregnadas con el tratamiento óptimo), fique y algodón sin impregnar y polipropileno de 2.0 m de largo cuando la planta alcanzó 10 a 20 cm de altura (Imagen 4.14). Posteriormente, se tomaron muestras semanalmente durante 13 semanas. Para efectos de este estudio: T1: fique sin impregnar, T2: algodón sin impregnar, T3: polipropileno (delgado), T4: fique impregnado o recubierto por el tratamiento óptimo, T5: algodón impregnado o recubierto por el tratamiento óptimo.



Imagen 4.13. Material experimental para proceso de tutorado.

Fuente: Este estudio.



Imagen 4.14. Montaje de fibras en sistema de tutorado vertical con encanastillado.

Fuente: Este estudio.

4.2.2 Modelado matemático de la cinética de pérdida de propiedades mecánicas.

Para el modelado matemático de la cinética de pérdida de calidad de propiedades mecánicas se utilizó el modelo de Page utilizado por Revelo *et al.* (2019) (ecuación 9).

$$MR = e^{(-k*t^n)} \quad \text{Ec. 9}$$

Dónde: MR: relación de pérdida de propiedad mecánica; k: constante de velocidad de pérdida de propiedad mecánica (semanas^{-1}); t: tiempo (semanas); n: constante del modelo.

Con los resultados experimentales obtenidos se representó los valores medidos de propiedades mecánicas de fibras vegetales como valores adimensionales, dividiendo la respectiva propiedad mecánica en un tiempo determinado (M_t) entre la propiedad mecánica inicial (M_0) de cada fibra, en función del tiempo para cada tratamiento (semanas).

$$MR = \frac{M_t}{M_i} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde, M_t es la propiedad mecánica en un tiempo determinado, M_i es la propiedad mecánica inicial. El análisis de los datos experimentales del modelo se realizó aplicando regresiones no lineales con 3 variables independientes: resistencia a la tracción (MPa), módulo de Young (MPa) y porcentaje de elongación total a Fuerza Máxima (%) mediante el software "Statgraphics Centurion XVIII".

4.2.2.1 Calidad de ajuste del modelo de Page.

Puente- Díaz *et al.* (2013) y Centeno - Mora, (2016) analizan la calidad del ajuste entre los datos experimentales y los valores predichos mediante los siguientes coeficientes estadísticos: coeficiente de correlación R^2 y coeficiente de correlación ajustado (R^2_{adj}) (>0.85); suma de errores cuadrados (SSE, por sus siglas en inglés Sum of Squared Error) y la raíz media de los errores cuadrados (RMSE, por sus siglas en inglés Root Mean Squared Error) (cerca de 0). Las ecuaciones 11–14, expresan como se calculan los valores estadísticos mencionados.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^N MR_{exp,i}^2 - MR_{pre,i}^2} \quad (Ec. 11)$$

$$R^2_{aj} = 1 - (1 - R^2) * \frac{N - 1}{N - m - 1} \quad (Ec. 12)$$

$$SEP = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \quad (Ec. 13)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2} \quad (Ec. 14)$$

Donde $MR_{exp,i}$ representa la relación de pérdida de propiedades mecánicas obtenidas experimentalmente, $MR_{pre,i}$ son las predicciones hechas por el modelo matemático, N es el número de datos y m el número de constantes del modelo.

4.2.3 Cambios superficiales de la estructura de fibras vegetales.

Se utilizó la estereomicroscopía óptica para observar los cambios superficiales de la estructura en las fibras evaluadas en el tiempo.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Evaluación de las condiciones de impregnación a vacío sobre propiedades fisicoquímicas y mecánicas de fibras vegetales

5.1.1 Caracterización fisicoquímica, mecánica y análisis por espectroscopia infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) de fibras vegetales.

5.1.1.1 Caracterización fisicoquímica de la emulsión de impregnación.

Tabla 5.1

Caracterización fisicoquímica de la emulsión de impregnación.

Propiedad fisicoquímica	Emulsión de impregnación
Densidad (g/cm ³)	1,042 ± 0,110
Viscosidad (cP)	1539,357 ± 174,215

*Valores promedio (n=3) ± desviación estándar.

Fuente: Este estudio.

En la tabla 5.1 se reporta la densidad y viscosidad de la emulsión de impregnación, que para efectos de la impregnación a vacío determinan los parámetros característicos de impregnación.

5.1.1.1.1 Análisis por espectroscopia infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) de la emulsión de impregnación.

En la figura 5.1 se observa que la banda ancha de absorción cercana a 3400 cm⁻¹ fue debido a las vibraciones de tensión del O-H; lo cual confirma que existen muchos grupos OH en la molécula (que pueden atribuirse al agua y a los grupos OH del glicerol), entre los 2370-3000cm⁻¹ el grupo CH. Las bandas de particular importancia son aquellas que presentan un par de bandas características de intensidad fuerte entre 1630 y 1745 cm⁻¹, las cuales indican la absorbanza fuerte de grupos carboxilos libres y esterificados. Los picos entre 1236 y 1238 cm⁻¹ corresponden a la banda de vibración de tensión del C—O—C, e indica la abundancia de los grupos metoxilos (—O—CH₃). El pico fuerte entre 1006 y 1155 cm⁻¹ indica la banda de vibración de tensión del grupo simétrico C—O—C y entre los 700 y 900cm⁻¹ los anillos benzoicos.

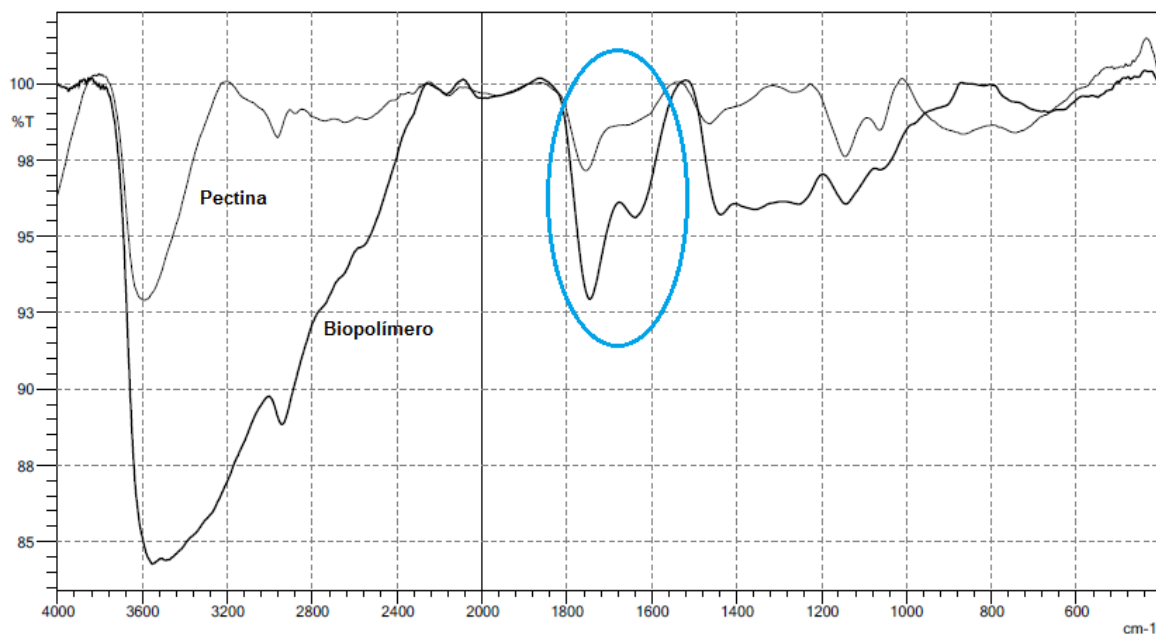


Figura 5.1. Espectro FTIR de la emulsión de impregnación.

Fuente: Este estudio.

5.1.1.2 Caracterización fisicoquímica de fibras vegetales.

Tabla 5.2

Caracterización fisicoquímica de fibras de fique y algodón.

Propiedad fisicoquímica	Fibra de fique	Fibra de algodón
Diámetro (mm)	0,987 ± 0,06	0,994 ± 0,007
Densidad real (ρ_r) (g/cm ³)	1,432 ± 0,112	1,032 ± 0,011
Densidad aparente (ρ_{apm}) (g/cm ³)	0,586 ± 0,119	0,382 ± 0,01
Humedad (%)	11,717 ± 0,707	5,11 ± 0,19

*Valores promedio (n=3) ± desviación estándar.

Fuente: Este estudio.

Los valores correspondientes al diámetro se aproximan a valores obtenidos por Muñoz - Velez *et al.* (2014) y Revelo *et al.* (2019), este último obtuvo un valor de diámetros de 1,078 mm y 0,984 mm para fibras de fique y algodón respectivamente, esta proximidad en los resultados se debe a que se utilizaron metodologías similares, es decir, la estereomicroscopía óptica es un método muy exacto utilizado en varios estudios de fibras vegetales (Baley, 2002; Bessadok *et al.*, 2008). De igual manera, el diámetro obtenido para fibra de fique se encuentra entre los límites permitidos para cabuya tipo cordel 1 donde se reportan valores entre 0,8 mm–1,2 mm (NTC, 3941).

Los valores reportados para densidad real en fibras de fique son aproximados a valores reportados por Muñoz-Velez *et al.* (2014); Moriana *et al.* (2014); Fiore *et al.* (2014) , de igual manera, resultados similares de densidad real en fibras de algodón fueron reportados por Moriana *et al.* (2014); Fiore *et al.* (2014); Revelo *et al.* (2019).

Los valores reportados de densidad aparente en fibra de fique son similares a los reportados por Muñoz-Velez *et al.* (2014); Gañán y Mondragon, (2002). Los resultados reportados de densidad aparente para fibra de algodón son aproximados a los reportados por Moriana *et al.* (2014); Romero, (2010).

Por otra parte, los valores de humedad representados en porcentajes, son aproximados a valores obtenidos por Revelo *et al.* (2019), el cual obtuvo valores de 12,26% y 4,79%. De igual manera, la NTC 992 reporta valores menores a 12% para que el fique pueda ser comercializado. El resultado reportado de humedad para fibra de algodón es menor al reportado por Conalgodón, (2009), el cual menciona que el valor de humedad para la fibra de algodón es del 8%, esta diferencia puede atribuirse a las metodologías utilizadas. Es importante tener en cuenta el contenido de agua en las fibras porque se ha visto que la humedad presente en las fibras afecta de manera negativa sus propiedades mecánicas (Symington *et al.*, 2009), por lo que se resalta que las fibras de fique y algodón están dentro de los rangos reportados. El mayor porcentaje de humedad de la fibra de fique en comparación a la fibra de algodón, puede ser atribuido a la porosidad de la fibra de fique así como a su estructura, además del mayor contenido de hemicelulosa (Yousif y El-Tayeb, 2009).

5.1.1.3 Caracterización mecánica y composicional de fibras vegetales.

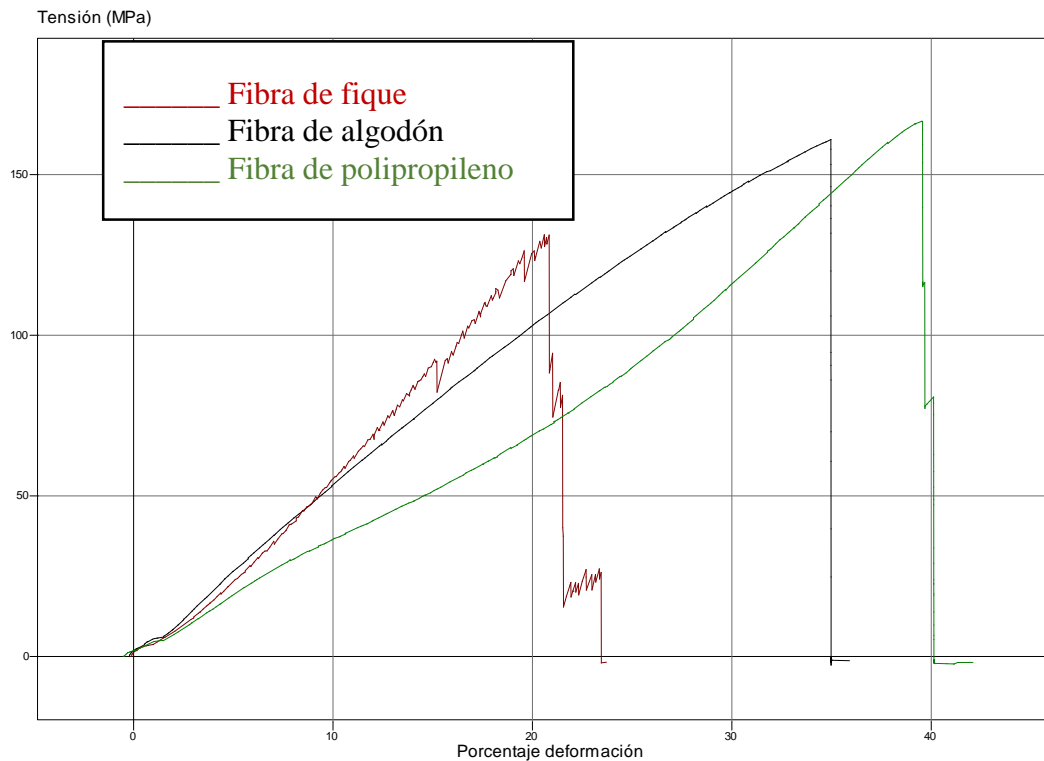


Figura 5.2. Diagrama de tensión contra porcentaje de deformación para fibras vegetales comparadas con fibra de polipropileno.

Fuente: Este estudio.

La fibra de fique al someterla a los ensayos de tensión produce que la fibra se abra, mostrando sus microfibrillas de menor diámetro, igualmente, se observan rupturas perpendiculares al eje axial a diferentes longitudes. El fique presenta impurezas y cambios de diámetro que pueden alterar sus propiedades mecánicas al actuar como concentradores de tensión. De igual manera se hacen evidentes desprendimientos longitudinales de agrupaciones de microfibrillas, sin llegar a la ruptura total debido a una conservación de un entrecruzamiento central de las microfibrillas (Bessadok *et al.*, 2008; Contreras *et al.*, 2009).

La fibra de algodón en general presenta una homogeneidad superficial además de su sistema de hilado, como reflejo su estiramiento y rompimiento de las fibras no deja fibras en la superficie, es decir, su ruptura se produce por rompimiento total de las microfibrillas (Garside y Wyeth, 2003).

La fibra de polipropileno presenta homogeneidad en la ruptura, su comportamiento es comparable al de la fibra de algodón, es decir, su ruptura se produce completamente en el punto

de porcentaje de deformación máximo, esto puede deberse a su cierto grado de cristalinidad que otorga resistencia (Jmal *et al.*, 2018).

Tabla 5.3

Caracterización composicional de fibras vegetales.

Compuesto	Contenido (%)	
	Fibra de fique	Fibra de algodón
Celulosa	44,00	95,86
Hemicelulosa	12,44	1,15
Lignina	11,85	0,44

Fuente: Laboratorios especializados universidad de Nariño, (2018).

En general las fibras lignocelulósicas constan de microfibrillas de celulosa enrolladas helicoidalmente en una matriz amorfa de lignina y hemicelulosa (Vignon *et al.*, 2004). En la tabla 5.3 se observa que casi en su totalidad el algodón es celulosa, que es un polisacárido semicristalino y es la razón del comportamiento hidrofílico, esta proporciona resistencia mecánica y cierta rigidez a las fibras. Mientras que, el fique contiene menos celulosa, pero, con contenidos considerables de hemicelulosa y lignina; la hemicelulosa es un polisacárido amorfo, responsable de la biodegradación y absorción de humedad de las fibras y, la lignina actúa como un aglutinante, proporciona resistencia, rigidez a las paredes celulares y es la responsable de la degradación por rayos UV (Córdoba *et al.*, 2010; Rong *et al.*, 2001).

Tabla 5.4

Caracterización mecánica de fibras vegetales.

Propiedades mecánicas	Valores obtenidos	
	Fibra de fique	Fibra de algodón
Resistencia a la tracción (MPa)	143,434±4,893	145,477±1,568
Elongación total a fuerza máxima (%)	20,105±0,111	40,881±0,710
Módulo de Young (MPa)	945,608±186,141	531,958±43,458

*Valores promedio (n=5) ± desviación estándar.

Fuente: Este estudio.

En la tabla 5.4 se observa que las fibras de fique y algodón presentaron alta resistencia a la tracción debido a sus altos contenidos de celulosa. Los bajos contenidos de lignina no le permiten a la fibra de algodón tener rigidez lo que representó bajo módulo de Young, en consecuencia,

presentó valores elevados de elongación total a fuerza máxima, mientras que, la fibra de fique presentó valores considerables de lignina que le permitieron proporcionar rigidez a la pared celular haciéndola resistente a la flexión (Corrales, 2002; Mohanty *et al.*, 2005; Stevens, 2010 Kalia *et al.*, 2011), en consecuencia, valores elevados de módulo de Young y bajos en elongación en comparación a la fibra de algodón.

5.1.1.4 Análisis por espectroscopia infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) de fibras vegetales.

5.1.1.4.1 Análisis por espectrofotometría infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) para fibra de fique.

En la figura 5.3 se observa algunas bandas características de los componentes de las fibras naturales, como lo son las bandas a 3535 cm^{-1} atribuida al grupo hidroxilo (-OH) que se asocia a la celulosa, la banda 2904 cm^{-1} atribuida al estiramiento C-H de la celulosa y hemicelulosa, la banda a 1747 cm^{-1} que se asocia al estiramiento del enlace carbonilo (-C=O), las señales características del esqueleto aromático de la lignina entre 1500 y 1800 cm^{-1} (Valadez *et al.*, 1999; Gañán y Mondragon, 2002; Liu *et al.*, 2004; Vallo *et al.*, 2004). Muñoz-Velez, (2014) reporta bandas en una región de absorción comprendida entre 650 - 4000 cm^{-1} en fibras de fique, reportando bandas características de los componentes de las fibras naturales, como lo son las bandas a 3335 y 2923 cm^{-1} ; atribuidas a los grupos OH, C-H y aromáticos respectivamente, que se encuentran asociados a la estructura de la celulosa, hemicelulosa y lignina. Bandas a 2865 y 1370 cm^{-1} atribuidas a los enlaces -CH₃, C-H y C-O presentes en la lignina y, banda a 1732 cm^{-1} que se asocia a la presencia de grupos carbonilo en la fibra, provenientes de la hemicelulosa y las pectinas. Castro, (2007) reporta la presencia de lignina reportan bandas en 1600 cm^{-1} correspondientes a los modos vibracionales de C=C de las estructuras de anillos de la lignina. Reddy y Yang, (2005) reporta picos característicos de lignina en el rango 1500 cm^{-1} - 1600 cm^{-1} correspondientes a la vibración de la estructura de anillos aromáticos.

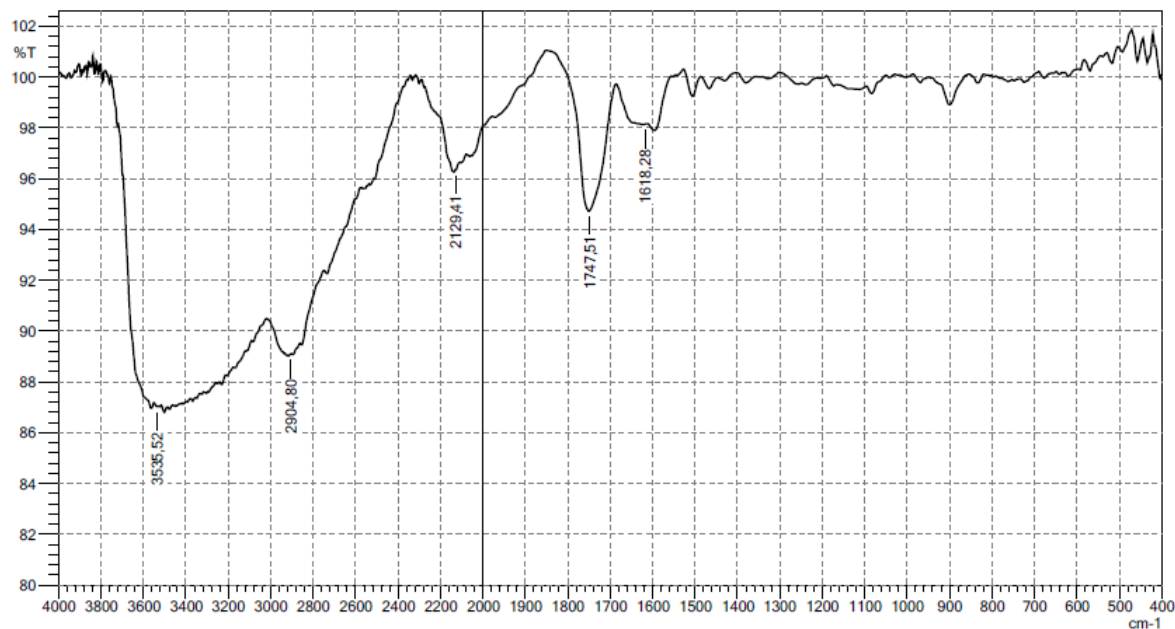


Figura 5.3. Espectro FTIR de fibra de fique.

Fuente: Este estudio.

5.1.1.4.2 Análisis por espectrofotometría infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) para fibra de algodón.

En la figura 5.4 se puede observar algunas bandas características de los componentes de las fibras naturales. El pico ancho de transmisión entre $3200\sim 3645\text{ cm}^{-1}$ es atribuido al estiramiento del enlace de hidrogeno de la red O-H de las moléculas de celulosa (Lima *et al.*, 2014; Romanzini *et al.*, 2012). La banda cercana a 2900 cm^{-1} corresponde a la vibración del estiramiento del enlace C-H de los grupos metil y metileno en celulosa y hemicelulosa y es característica en todas las fibras naturales celulósicas (Romanzini *et al.*, 2012). El pico agudo cercano a 1750 cm^{-1} corresponde al enlace C=O de los componentes no celulósicos (pectina, lignina) (Herrera y Valadez, 2005; Vallo *et al.*, 2004). El pico de 1408 cm^{-1} es atribuido a la deformación del enlace de C-H de lignina (Lima *et al.*, 2014; Mohan y Kanny, 2012; Romanzini *et al.*, 2012). El pico de 1243 cm^{-1} corresponde al enlace C-O de lignina y hemicelulosa (Cho *et al.*, 2014; Nam *et al.*, 2011; Razak *et al.*, 2014; Sgriccia *et al.*, 2008). banda 1294 cm^{-1} (CH) de pectinas y celulosa, $960\sim 1120\text{ cm}^{-1}$ vibraciones (C-O) de celulosa y pectinas, banda 862 cm^{-1} (CH) del anillo glicosídico de celulosa y pectinas, señales inferiores a 715 cm^{-1} señales de celulosa (I, II) (Garside y Wyeth, 2003; Reddy y Yang, 2005; Kalia *et al.*, 2011). Rodríguez, (2013) reporta presencia de celulosa en bandas $1085\sim 1120\text{ cm}^{-1}$ y entre $3000\sim 3300\text{ cm}^{-1}$, que está principalmente formada por enlaces de glicosídicos y grupos hidroxilo.

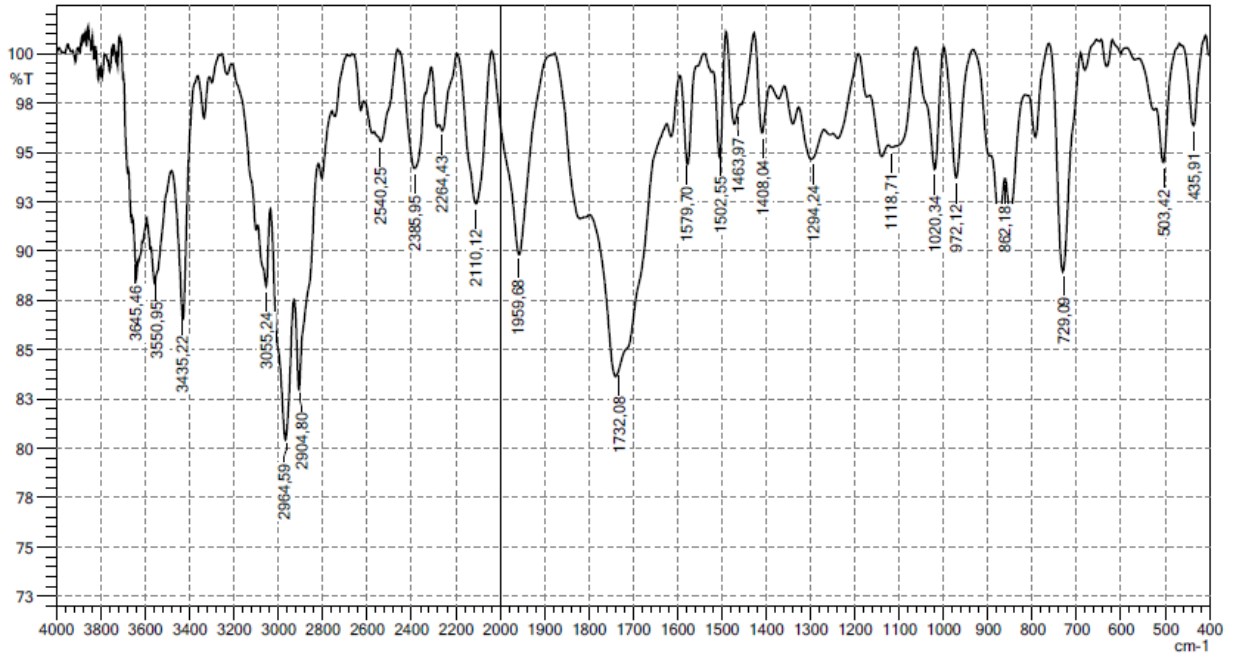


Figura 5.4. Espectro FTIR de fibra de algodón.

Fuente: Este estudio.

5.1.2. Impregnación a vacío: evaluación de las condiciones de impregnación a vacío sobre fibras vegetales.

Se realizó los respectivos tratamientos de impregnación a vacío sobre fibras vegetales (Imágenes 5.1 y 5.2).



Imagen 5.1. Tratamientos de impregnación a vacío sobre fibras de fique.

Fuente: Este estudio.



Imagen 5.2. Tratamientos de impregnación a vacío sobre fibras de algodón.

Fuente: Este estudio.

Se resalta que para efectos de este estudio, se pretendió mantener o mejorar las variables de respuesta, por ende, para la elongación total a fuerza máxima, se pretendió mantener su valor, debido a que, el valor medio de esta variable de respuesta al mantenerse contribuye a ser eficiente en el proceso del tutorado agrícola, ya que, en el proceso del tutorado la planta crece y aumenta su peso necesitando un soporte que la mantenga estable y si la fibra se estira demasiado la planta podría caer al suelo y afectar el cultivo (Revelo *et al.*, 2019), por el contrario, si la fibra no se estira lo suficiente se fracturaría. Por lo tanto, se acepta un rango de elongación total a fuerza máxima de 13-21% característicos de fibra de fique; para la fibra de algodón, se pretendió mantener el valor medio del porcentaje de elongación a fuerza máxima, ya que, según Revelo *et al.* (2019) esta fibra presenta valores de elongación altos que podría causar problemas en el cultivo. Además, se tiene en cuenta que la elongación es inversamente proporcional al Módulo de Young que podría afectar las fibras vegetales, por ende, el cultivo.

5.1.2.1. Análisis del diseño experimental de impregnación a vacío sobre fibras de fique.

Tabla 5.5

Resumen de propiedades mecánicas en función de los tratamientos de impregnación a vacío para fibra de fique.

Tratamiento	Resistencia a la tracción (MPa)	Elongación total a fuerza máxima (%)	Módulo de Young (MPa)
T1	151,164 ±5,303	21,191 ±3,383	1001,23 ±54,301
T2	114,587 ± 7,369	15,154 ±0,716	1071,87 ±51,366
T3	96,3628 ± 3,233	14,085 ±0,706	1192,67 ±75,209
T4	93,311 ±2,015	11,973 ±0,782	996,946 ±50,109
T5	122,638 ±3,584	16,305 ±0,407	1191,53 ±18,271
T6	126,013 ±6,839	16,094 ±0,831	1106,68 ±62,112
T7	107,931 ±9,389	13,744 ±0,531	1129,87 ±78,974
T8	103,174 ±11,133	15,803 ±1,383	827,104 ±20,068

*Valores promedio (n=5) ± desviación estándar.

Fuente: Este estudio.

En la tabla 5.5 se reporta las variables de respuesta para cada tratamiento de impregnación realizado en fibras de fique, se observa que la mayor resistencia a la tracción y elongación total a

fuerza máxima se obtiene con el tratamiento T1, mientras que, los tratamientos T3 y T5 presentan el mejor módulo de Young, de igual manera, el tratamiento T1 presentó un valor alto de módulo de Young.

5.1.2.1.1 Análisis del efecto de impregnación a vacío sobre resistencia a la tracción en fibra de fique.

Tabla 5.6

Análisis de varianza para resistencia a la tracción.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Tiempo	210,028	1	210,028	4,04	0,0543
B: Temperatura	6202,96	1	6202,96	119,22	0,0000
C: Presión	456,005	1	456,005	8,76	0,0062
AB	376,125	1	376,125	7,23	0,0119
AC	367,471	1	367,471	7,06	0,0129
BC	81,1164	1	81,1164	1,56	0,2222
ABC	478,104	1	478,104	9,19	0,0052
Error total	1456,87	28	52,031		
Total (corr.)	9646,33	39			

*Valores de $p < 0,05$ indican diferencias estadísticamente significativas. El modelo tiene un $R^2 = 84,9972\%$ y $R^2 (aj) = 78,9639\%$.

Fuente: Este estudio.

En la tabla 5.6 se reporta el análisis de varianza de efectos principales y sus interacciones para resistencia a la tracción, se puede observar que existen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en los factores temperatura y presión, además de las interacciones AB, AC y ABC. De igual manera, estos resultados para la variable de respuesta mencionada para fibra de fique se observan en la figura 5.5, donde el diagrama de Pareto muestra los valores absolutos de los efectos estandarizados desde el efecto más grande hasta el efecto más pequeño, se puede observar que el efecto de la temperatura y la presión son negativos, es decir, el aumento de temperatura y presión disminuyen el valor de la variable de respuesta. El efecto de las interacciones AB y BC es positivo para la variable de respuesta mencionada, mientras que el efecto de las interacciones ABC es negativo.

Diagrama de Pareto Estandarizada para Resistencia a la tracción

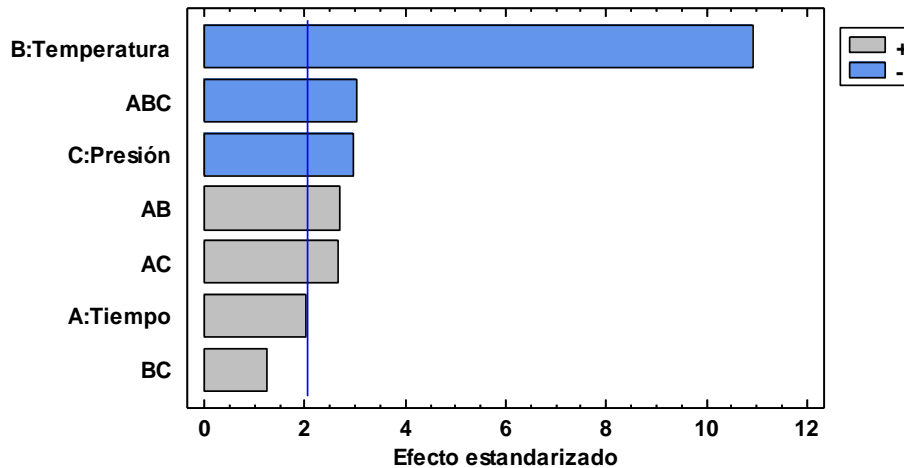


Figura 5.5. Diagrama de Pareto estandarizada para resistencia a la tracción.

Fuente: Este estudio.

El gráfico 5.6 sugiere que el aumento de temperatura o presión disminuyen la variable de respuesta. No obstante, el gráfico 5.7 permite dar un mejor análisis mediante la interacción de efectos, se puede observar la interacción AB, donde los niveles de tiempo (2 min y 10 min) y el nivel inferior de temperatura (15°C) permiten que la variable de respuesta no se vea afectada negativamente y mantenga valores medios altos. También se observa la interacción AC donde los niveles de tiempo (2 min y 10 min) y el nivel inferior de presión (0,2 bar) permiten que la variable de respuesta no se vea afectada negativamente y mantenga valores en medias altas, además, se observa de esta interacción que el nivel superior de presión (0,7 bar) y el nivel de tiempo superior (10 min) permiten que la variable de respuesta también mantenga valores en medias altas.

Gráfica de Efectos Principales para Resistencia a la tracción

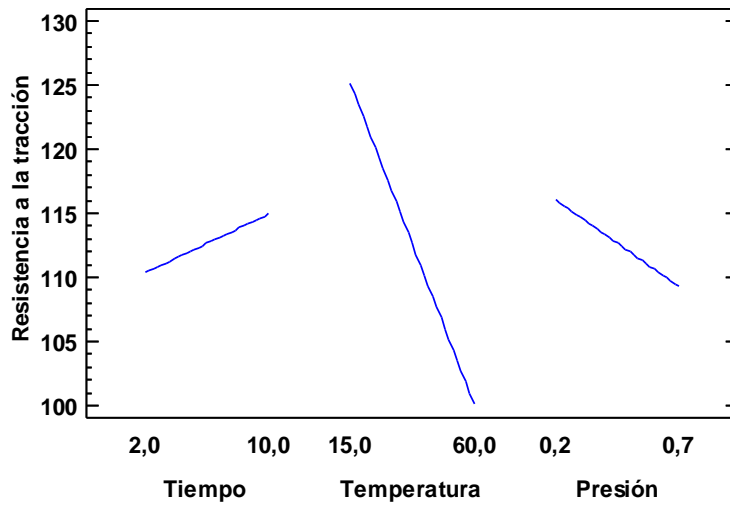


Figura 5.6. Gráfica de efectos principales para resistencia a la tracción.

Fuente: Este estudio.

Gráfica de Interacción para Resistencia a la tracción

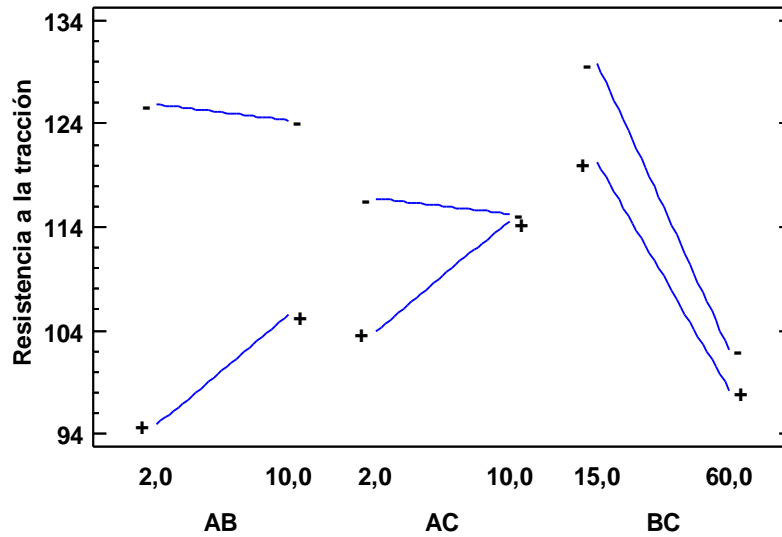


Figura 5.7. Gráfica de interacciones AB: Tiempo-Temperatura, AC: Tempo-Presión, BC: Temperatura-Presión para resistencia a la tracción.

Fuente: Este estudio.

La figura 5.8 muestra las respectivas medias de los tratamientos de impregnación a vacío estudiados para resistencia a la tracción. Se observa diferencias estadísticamente significativas entre los valores medios de los tratamientos impregnados a un nivel superior de temperatura (T3, T4, T7 y T8) con respecto a los valores medios de los tratamientos impregnados a un nivel inferior de temperatura (T1, T2, T5 y T6), los tratamientos T3, T4, T7 y T8 presentaron los valores medios más bajos, esto teniendo en cuenta que el diagrama de Pareto muestra que el efecto más significativo es la temperatura y su aumento produce disminución en la variable de respuesta, lo anterior puede atribuirse a que el efecto de la temperatura a nivel superficial de la fibra de fique genera la remoción de compuestos como la celulosa la cual hace parte de la pared primaria de fibras vegetales y confiere resistencia mecánica (Muñoz-Velez *et al.*, 2014).

Se observa diferencias estadísticamente significativas entre los valores medios de los tratamientos impregnados a un nivel superior de presión (T2, T4 y T8) con respecto a los valores medios de los tratamientos impregnados a un nivel inferior de presión (T1 y T5), los tratamientos T2, T4, y T8 presentan valores medios menores en comparación a los tratamientos T1 y T5; esto puede ser atribuido a una excesiva creación de gradiente de presión en el sistema sólido-líquido generando la salida de gas, pero, también una posible salida de líquidos nativos asociados a compuestos propios de la fibra en la etapa de vacío en el interior de la estructura porosa (Fito, 1994), lo cual afecta su estructura, por ende, su calidad mecánica. No obstante, el tratamiento T6 fue impregnado a un nivel superior de presión, sin embargo, este se realizó por un tiempo de impregnación de 10 minutos, esto teniendo en cuenta que la interacción tiempo-presión al ser positiva aumentan el valor medio de la variable de respuesta, lo cual puede atribuirse a que este tiempo podría ser eficiente para alcanzar y permanecer en presión de vacío así como la exposición a la presión atmosférica, permitiendo la remoción de aire ocluido en los poros y una efectiva impregnación de la emulsión de impregnación mediante acción capilar y gradientes de presión impuestas en el sistema, tal como lo reporta Betoret *et al.* (2011), además, éste tratamiento no se ve afectado por el nivel superior de temperatura. De igual manera, los tratamientos T3 y T7 fueron impregnados a un nivel inferior de presión, sin embargo, fueron impregnados a un nivel superior de temperatura, razón por la cual, presentan valores medios bajos.

El tratamiento T1 es estadísticamente diferente comparado con los demás tratamientos, presentando el mayor valor medio en resistencia a la tracción, debido a que fue impregnado con

niveles inferiores de temperatura–presión, esto puede atribuirse a que la baja temperatura minimiza posibles daños estructurales, preservando su resistencia mecánica.

Por otro lado, Veiga-Santos *et al.* (2005) y Enriquez *et al.* (2012) reportan que se ha notado un incremento en la resistencia a la tracción en las películas que incluyen materiales solubles en agua como la pectina, respecto a las que no, además mencionan que: la pectina de alto metoxilo forma excelentes películas, esto sumado a que al mezclarse con el plastificante produce una reducción de los puentes de hidrógeno reduciendo las fuerzas intermoleculares a lo largo de las cadenas del polímero, mejorando su resistencia a la tracción (este incremento sólo fue observado en el tratamiento T1 puesto que no involucra niveles superiores de temperatura o presión).

Medias y 95,0% de Fisher LSD

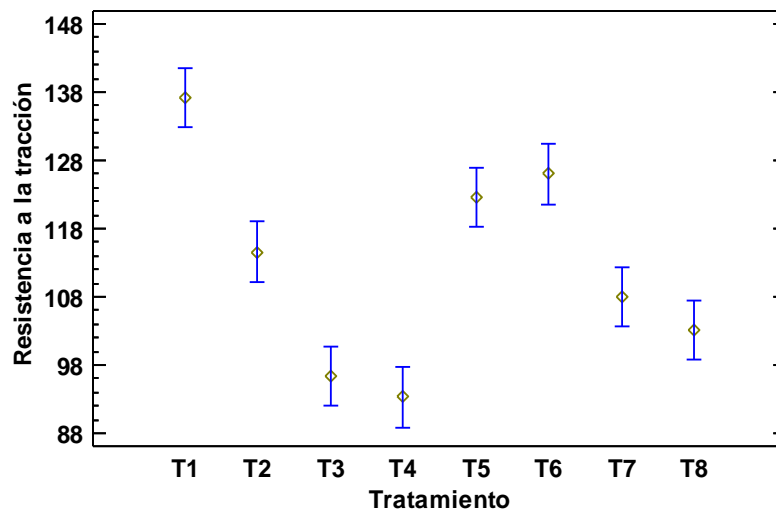


Figura 5.8. Gráfico de medias para tratamientos para resistencia a la tracción por método de LSD Fisher a un 95% de confianza.

Fuente: Este estudio.

5.1.2.1.2 *Análisis del efecto de impregnación a vacío sobre elongación total a fuerza máxima en fibra de fique.*

Tabla 5.7

Análisis de varianza para elongación total a fuerza máxima.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Tiempo	0,130224	1	0,130224	0,07	0,7957
B: Temperatura	107,886	1	107,886	56,59	0,0000
C: Presión	24,816	1	24,816	13,02	0,0012
AB	34,5527	1	34,5527	18,12	0,0002
AC	62,4563	1	62,4563	32,76	0,0000
BC	23,9858	1	23,9858	12,58	0,0014
ABC	1,70954	1	1,70954	0,90	0,3518
Error total	53,3788	28	1,90639		
Total (corr.)	320,048	39			

*Valores de $p < 0,05$ indican diferencias estadísticamente significativas. El modelo tiene un $R^2 = 83,3216\%$ y $R^2 (aj) = 76,9694\%$.

Fuente: Este estudio.

En la tabla 5.7 se reporta el análisis de varianza de efectos principales y sus interacciones para elongación total a fuerza máxima, se puede observar que existen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en los factores temperatura y presión; y las interacciones AB, AC y BC. De igual manera, estos resultados para la variable de respuesta mencionada para fibra de fique se observan en la figura 5.9, se puede observar que el efecto de la temperatura y la presión son negativos, es decir, el aumento de temperatura o presión disminuyen la variable de respuesta. El efecto de las interacciones AB, AC y BC es positivo para la variable de respuesta mencionada.

Diagrama de Pareto Estandarizada para Elongación total a fuerza máxima

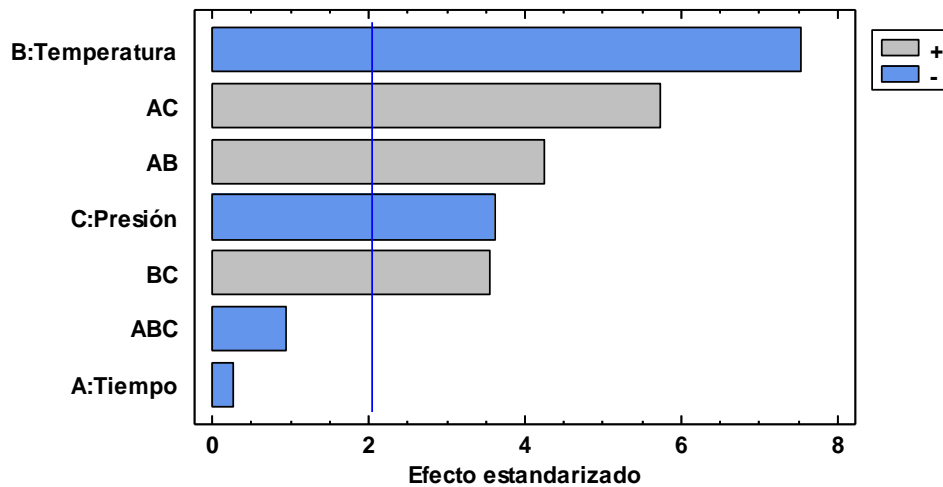


Figura 5.9. Diagrama de Pareto estandarizada elongación total a fuerza máxima.

Fuente: Este estudio.

El gráfico 5.10 sugiere que el aumento de temperatura o presión disminuyen la variable de respuesta. No obstante, el gráfico 5.11 permite dar un mejor análisis mediante la interacción de efectos. Se observó la interacción AB, donde el nivel de tiempo inferior (2 min) y el nivel inferior de temperatura (15°C) permiten que la variable de respuesta no se vea afectada negativamente y mantenga valores altos, además, se observa que a un nivel superior de temperatura (60°C) a un nivel inferior de tiempo (2 min) mantienen valores bajos en la variable de respuesta, de la misma manera, se encuentran valores intermedios a los niveles de temperatura (15°C y 60°C) y un nivel superior en tiempo (10 min). Por otro lado, se observa la interacción AC, donde un nivel inferior de tiempo (2 min) con un nivel superior de presión (0,7 bar) hace que la variable de respuesta se vea afectada negativamente y disminuya, no obstante, a niveles inferiores de tiempo (2 min) y presión (0,2 bar) permiten que la variable de respuesta no se vea afectada negativamente y, mantenga valores en medias altos, de igual manera, los niveles de presión (0,2 y 0,7 bar) con un nivel superior de tiempo (10 min) permiten valores medios intermedios en la variable de respuesta.

En la interacción BC, se puede observar que a un nivel superior de temperatura (60 °C) la variable de respuesta se ve afectada negativamente y disminuye en cualquier nivel de presión (0,2 y 0,7 bar), sin embargo, a niveles inferiores de temperatura (15°C) y presión (0,2 bar) la variable de respuesta mantiene valores altos, no obstante, un nivel inferior de temperatura (15°C) y un nivel superior de presión (0,7 bar) mantienen valores intermedios.

Gráfica de Efectos Principales para Elongación total a fuerza máxima

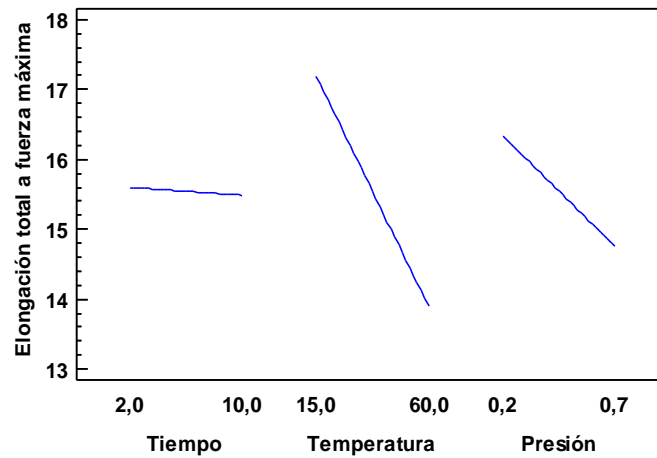


Figura 5.10. Gráfica de efectos principales para elongación total a fuerza máxima.

Fuente: Este estudio.

Gráfica de Interacción para Elongación total a fuerza máxima

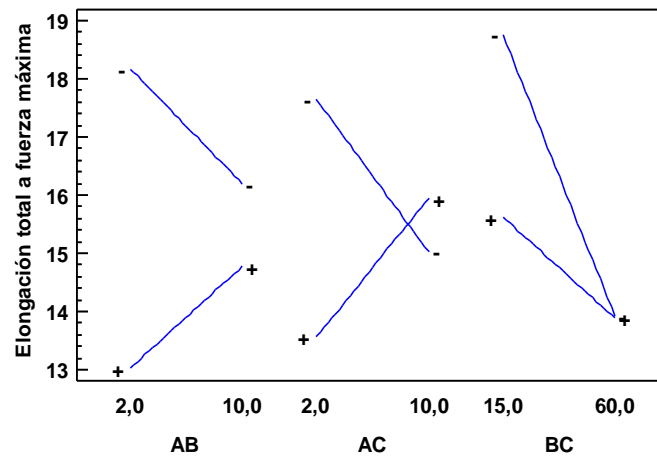


Figura 5.11. Gráfica de interacciones AB: Tiempo-Temperatura, AC: Tempo-Presión, BC: Temperatura-Presión para elongación total a fuerza máxima.

Fuente: Este estudio.

En la figura 5.12 se observa que los tratamientos T2, T3, T4, T6, T7 y T8 presentan valores bajos de elongación total a fuerza máxima, debido a que fueron impregnados con niveles superiores de temperatura o presión, el tratamiento T5 presentó un valor en un rango intermedio debido a que se realizó a niveles inferiores de temperatura y presión, no obstante, se impregnó a

un nivel superior de tiempo, el cual al aumentar disminuye la variable de respuesta, sin embargo, su efecto no es significativo. Se observa que el tratamiento T1 es estadísticamente diferente comparado con los demás tratamientos, presentando el mayor valor en elongación total a fuerza máxima, debido a que fue impregnado con niveles inferiores de temperatura–presión.

La baja elongación de la mayoría de los tratamientos puede atribuirse al efecto de compactación provocado por la impregnación a vacío, haciendo que los espacios porosos anteriormente vacíos de la fibra queden llenos del líquido de impregnación (Chiralt *et al.*, 2001).

Por otro lado, la inclusión de glicerol aumenta el porcentaje de elongación, cuanto más se incluye una sustancia plastificante en una matriz polimérica, la elongación aumenta (Alves *et al.*, 2007), no obstante, este fenómeno sólo es observado en el tratamiento T1 debido a las condiciones de impregnación de este tratamiento.

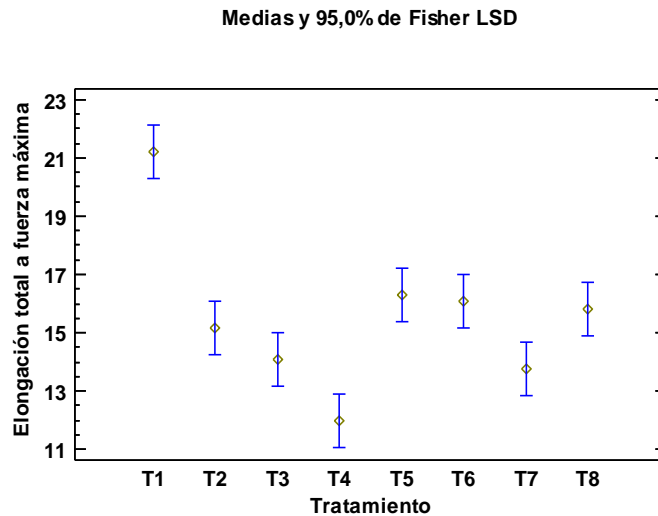


Figura 5.12. Gráfico de medias para tratamientos para elongación total a fuerza máxima por método de LSD Fisher a un 95% de confianza.

Fuente: Este estudio.

5.1.2.1.3 *Análisis del efecto de impregnación a vacío sobre módulo de Young en fibra de fique.*

Tabla 5.8

Análisis de varianza para módulo de Young.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Tiempo	35,4422	1	35,4422	0,01	0,9085
B: Temperatura	31565,8	1	31565,8	11,98	0,0017
C: Presión	164291,0	1	164291,	62,35	0,0000
AB	130958,	1	130958,	49,70	0,0000
AC	43079,5	1	43079,5	16,35	0,0004
BC	146577,	1	146577,	55,63	0,0000
ABC	1467,16	1	1467,16	0,56	0,4618
Bloques	24560,9	4	6140,21	2,33	0,0805
Error total	73782,2	28	2635,08		
Total (corr.)	616317,	39			

*Valores de $p < 0,05$ indican diferencias estadísticamente significativas. El modelo tiene un $R^2 = 88,0285\%$ y $R^2 (aj) = 83,3255\%$.

Fuente: Este estudio.

En la tabla 5.8, se reporta el análisis de varianza de efectos principales y sus interacciones para módulo de Young, se puede observar que existen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en los factores temperatura, presión y las interacciones AB, AC y BC. De igual manera, estos resultados para la variable de respuesta mencionada para fibra de fique se observan en la figura 5.13, se puede observar que el efecto de la temperatura y la presión son negativos, es decir, el aumento de temperatura o presión disminuyen el valor de la variable de respuesta. El efecto de las interacciones AB, AC y BC es negativo para la variable de respuesta mencionada.

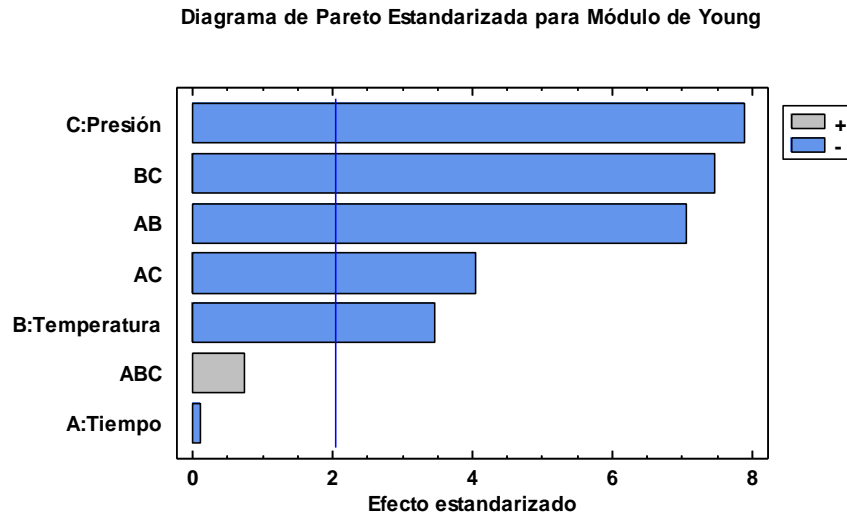


Figura 5.13. Diagrama de Pareto estandarizado para módulo de Young.

Fuente: Este estudio.

El gráfico 5.14 sugiere que el aumento de temperatura y presión disminuyen la variable de respuesta. No obstante, el gráfico 5.15 permite dar un mejor análisis mediante la interacción de efectos. Se puede observar la interacción AB, donde a un nivel superior de tiempo (10 min) y un nivel inferior de temperatura (15°C) permiten que la variable de respuesta no se vea afectada negativamente y mantenga valores altos, no obstante, niveles superiores de tiempo (10 min) y temperatura (60°C) disminuyen el valor de la variable de respuesta, de igual manera, los niveles de temperatura (15°C y 60°C) con un nivel inferior de tiempo (2 min) permiten valores intermedios en la variable de respuesta. También se observa la interacción AC donde los niveles de tiempo superior (10 min) y el nivel inferior de presión (0,2 bar) permiten que la variable de respuesta no se vea afectada negativamente y mantenga valores altos, de igual manera, niveles superiores de tiempo (10 min) y presión (0,7 bar) disminuyen la media de la variable de respuesta, no obstante, un nivel inferior de tiempo (2 min) con los niveles de presión (0,2 bar y 0,7 bar) permiten valores intermedios en la variable de respuesta. Por otro lado, se observa la interacción BC donde un nivel de temperatura superior (60 °C) y el nivel inferior de presión (0,2 bar) permiten que la variable de respuesta no se vea afectada negativamente y mantenga valores altos, no obstante, niveles superiores de temperatura (60°C) y presión (0,7 bar) disminuyen las medias de la variable de respuesta, además, un nivel inferior de temperatura (15°C) con los niveles de presión (0,2 y 0,7 bar) permiten valores intermedios en las medias para la variable de respuesta.

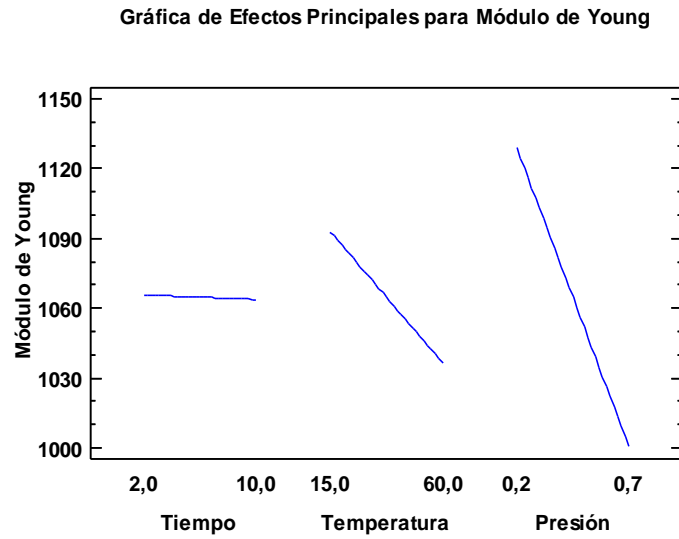


Figura 5.14. Gráfica de efectos principales para módulo de Young.

Fuente: Este estudio.

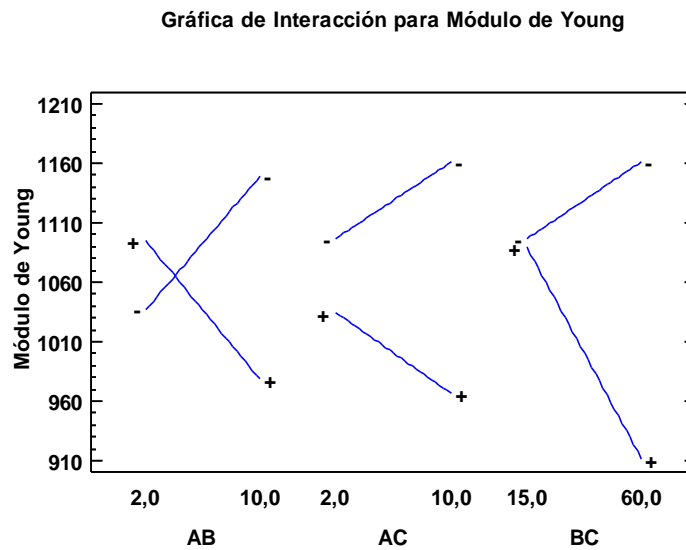


Figura 5.15. Gráfica de interacciones AB: Tiempo-Temperatura, AC: Tempo-Presión, BC: Temperatura-Presión para módulo de Young.

Fuente: Este estudio.

En la figura 5.16 se puede observar que la interacción BC afecta negativamente la variable de respuesta, siendo los tratamientos T4 y T8 los que presentan menor valor medio en comparación a los demás tratamientos impregnados al vacío, debido que niveles superiores de temperatura y presión, aumentan la temperatura del líquido de impregnación afectando a la matriz que se

encuentra inmersa, lo que posiblemente cause la remoción de compuestos como lignina de la fibra encargada de brindar rigidez (Chiralt *et al.*, 2001).

Por otro lado, Ochoa (2005) y Revelo *et al.* (2019), reportan que “existe una diferencia inversamente proporcional entre el módulo de Young y la elongación, por lo tanto, valores más bajos de módulo de Young implican valores más altos de elongación”, relación observada en la mayoría de los tratamientos. Además, autores reportados por Enriquez *et al.* (2012) reportan que los plastificantes solubles en agua como el glicerol son efectivos agentes suavizantes, mejorando la flexibilidad de las películas resultantes. Cuanto más se incluye una sustancia plastificante en una matriz polimérica, la elongación se incrementan mientras que el módulo de Young disminuye (Alves *et al.*, 2007).

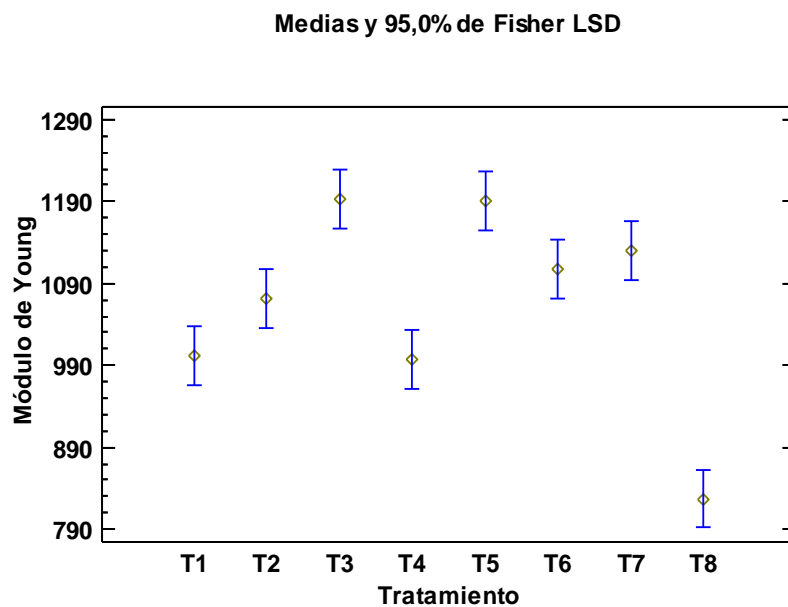


Figura 5.16. Gráfico de medias para tratamientos para módulo de Young por método de LSD Fisher a un 95% de confianza.

Fuente: Este estudio.

5.1.2.2 Análisis diseño experimental de impregnación a vacío sobre fibras de algodón.

Tabla 5.9

Resumen de propiedades mecánicas en función de los tratamientos de impregnación a vacío para fibra de algodón.

Tratamiento	Resistencia a la tracción (MPa)	Elongación total a fuerza máxima (%)	Módulo de Young (MPa)
T1	171,877 ± 17,611	43,502 ± 1,085	460,275 ± 37,658
T2	163,678 ± 12,859	46,724 ± 0,690	406,746 ± 33,047
T3	128,048 ± 3,305	43,356 ± 1,550	352,191 ± 5,868
T4	139,600 ± 1,859	47,571 ± 0,926	348,915 ± 10,366
T5	154,446 ± 4,002	47,404 ± 0,238	389,279 ± 15,116
T6	148,553 ± 4,132	48,400 ± 0,659	376,233 ± 12,226
T7	121,596 ± 3,375	42,917 ± 0,949	362,634 ± 20,978
T8	126,855 ± 2,289	44,868 ± 0,658	352,007 ± 9,246

*Valores promedio (n=5) ± desviación estándar.

Fuente: Este estudio.

En la tabla 5.9 se reporta las variables de respuesta para cada tratamiento de impregnación a vacío realizado en fibras de algodón, se observa que la mayor resistencia se obtiene con el tratamiento T1, la menor elongación total a fuerza máxima se obtiene con los tratamientos T1, T3 y T7, mientras que, el tratamiento T1 presenta el mayor módulo de Young.

5.1.2.2.1 Análisis del efecto de impregnación a vacío sobre resistencia a la tracción en fibra de algodón.

Tabla 5.10

Análisis de varianza para resistencia a la tracción.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Tiempo	2008,79	1	2008,79	33,17	0,0000
B: Temperatura	11246,4	1	11246,4	185,71	0,0000
C: Presión	5,54471	1	5,54471	0,09	0,7640
AB	133,86	1	133,86	2,21	0,1460
AC	11,9185	1	11,9185	0,20	0,6600

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
BC	716,32	1	716,32	11,83	0,0015
ABC	55,467	1	55,467	0,92	0,3451
Error total	2119,6	35	60,5599		
Total (corr.)	16876,2	47			

*Valores de $p < 0,05$ indican diferencias estadísticamente significativas. El modelo tiene un $R^2 = 87,4403\%$ y $R^2 (aj) = 83,1341\%$.

Fuente: Este estudio.

En la tabla 5.10 se reporta el análisis de varianza de efectos principales y sus interacciones para resistencia a la tracción, se puede observar que existen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en los factores tiempo, temperatura y la interacción BC. De igual manera, estos resultados para la variable de respuesta mencionada para fibra de algodón se observan en la figura 5.17, se puede observar que el efecto del tiempo y la temperatura es negativo, es decir, el aumento de tiempo o temperatura disminuyen el valor de la variable de respuesta. El efecto de la interacción BC es positivo para la variable de respuesta mencionada.

Diagrama de Pareto Estandarizada para Resistencia a la tracción

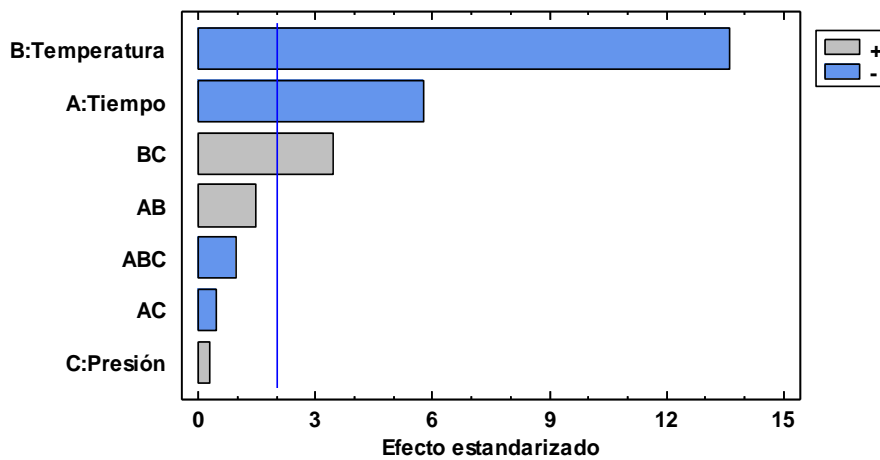


Figura 5.17. Diagrama de Pareto estandarizado para resistencia a la tracción.

Fuente: Este estudio.

El gráfico 5.18 sugiere que el aumento de tiempo y temperatura disminuyen la variable de respuesta. No obstante, el gráfico 5.19 permite dar un mejor análisis mediante la interacción de efectos. Se puede observar la interacción BC, donde a un nivel de temperatura inferior (15 °C) y

los niveles de presión (0,2 bar y 0,7 bar) permiten que la variable de respuesta no se vea afectada negativamente y mantenga valores altos.

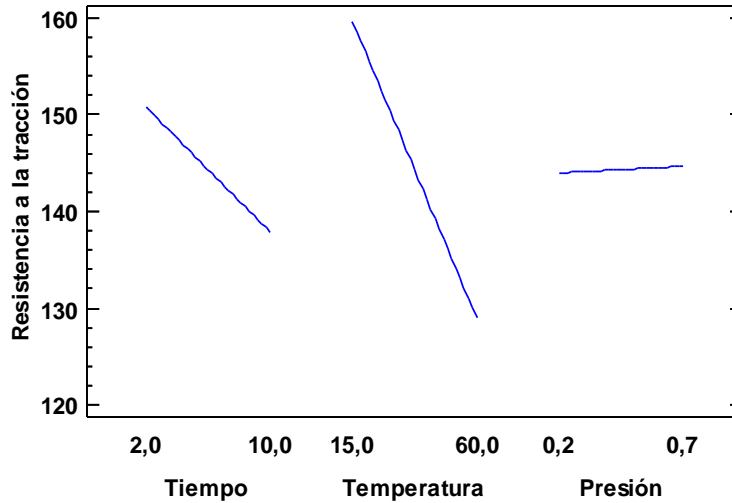


Figura 5.18. Gráfica de efectos principales para resistencia a la tracción.

Fuente: Este estudio.

Gráfica de Interacción para Resistencia a la tracción

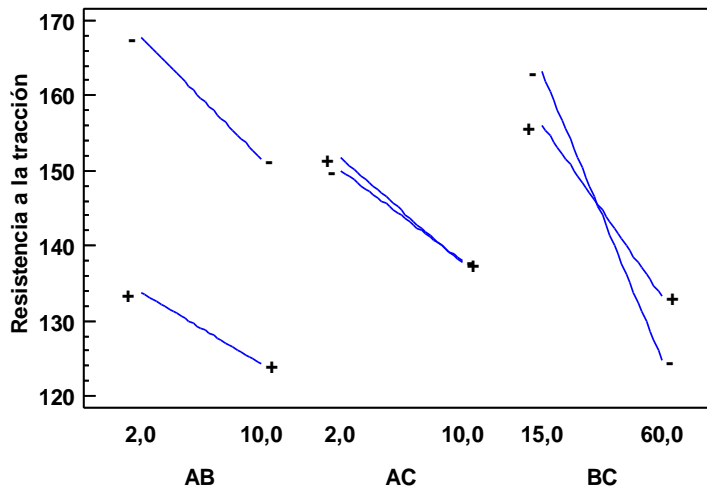


Figura 5.19. Gráfica de interacciones AB: Tiempo-Temperatura, AC: Tempo-Presión, BC: Temperatura-Presión para resistencia a la tracción.

Fuente: Este estudio.

La figura 5.20 muestra las respectivas medias de los tratamientos de impregnación a vacío estudiados para resistencia a la tracción. Se observa diferencias estadísticamente significativas entre los valores medios de los tratamientos impregnados a un nivel superior de temperatura (T3,

T4, T7 y T8) con respecto a los valores medios de los tratamientos impregnados a un nivel inferior de temperatura (T1, T2, T5 y T6), los tratamientos T3, T4, T7 y T8 presentan los valores medios más bajos, teniendo en cuenta que el diagrama de Pareto muestra que el efecto más significativo es la temperatura y su aumento produce disminución en el valor de la variable de respuesta, lo anterior puede atribuirse a que el efecto de la temperatura a nivel superficial al igual que en fibra de fique genera la remoción de compuestos en las fibras de algodón como la celulosa la cual confiere resistencia mecánica y hace parte de la pared primaria de esta fibra vegetal (Muñoz-Velez *et al.*, 2014). Ahora bien, el tratamiento T1 presentó la mayor resistencia a la tracción debido a las condiciones de impregnación, además de la inclusión de pectina sobre la emulsión de impregnación que forma una película de buena calidad sumado al efecto de reducción de fuerzas intermoleculares del plastificante (Enríquez *et al.*, 2012; Veiga-Santos *et al.*, 2005).

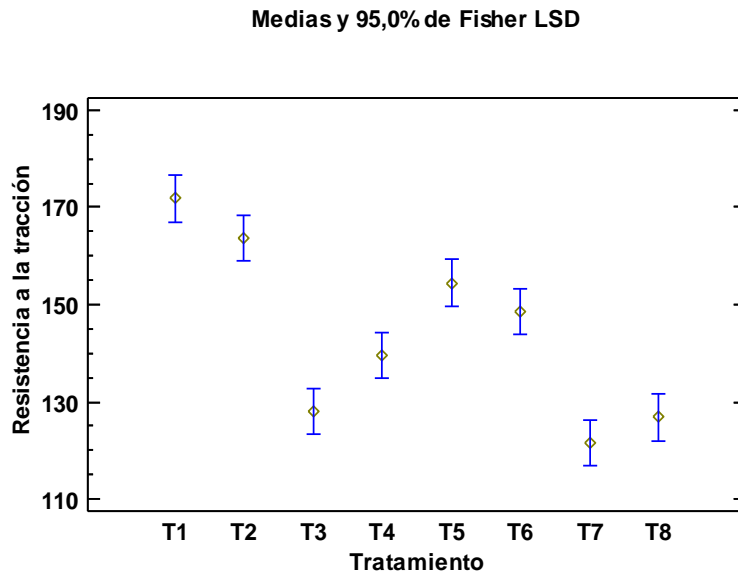


Figura 5.20. Gráfico de medias para tratamientos para resistencia a la tracción en fibra de algodón por método de LSD Fisher a un 95% de confianza.

Fuente: Este estudio.

5.1.2.2.2 *Análisis del efecto de impregnación a vacío sobre elongación total a fuerza máxima en fibra de algodón.*

Tabla 5.11

Análisis de varianza para elongación total a fuerza máxima.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Tiempo	4,45232	1	4,45232	5,29	0,0268
B: Temperatura	40,1666	1	40,1666	47,70	0,0000
C: Presión	80,845	1	80,845	96,00	0,0000
AB	57,0407	1	57,0407	67,74	0,0000
AC	15,114	1	15,114	17,95	0,0001
BC	2,84759	1	2,84759	3,38	0,0734
ABC	0,00109254	1	0,00109254	0,00	0,9714
Error total	33,6844	40	0,84211		
Total (corr.)	234,152	47			

*Valores de $p < 0,05$ indican diferencias estadísticamente significativas. El modelo tiene un $R^2 = 85,6143\%$ y $R^2 (aj) = 83,0968\%$.

Fuente: Este estudio.

En la tabla 5.11 se reporta el análisis de varianza de efectos principales y sus interacciones para elongación total a fuerza máxima, se puede observar que existen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en los factores tiempo, temperatura, presión y las interacciones AB y AC. De igual manera, estos resultados para la variable de respuesta mencionada para fibra de algodón se observan en la figura 5.21, se puede observar que el efecto la presión y el tiempo es positivo, es decir, el aumento de presión o tiempo aumentan el valor de la variable de respuesta, mientras que el efecto de la temperatura es negativo, es decir, el aumento de temperatura disminuye el valor de la variable de respuesta. El efecto de las interacciones AB y AC es negativo para la variable de respuesta mencionada.

Diagrama de Pareto Estandarizada para Elongación total a fuerza máxima

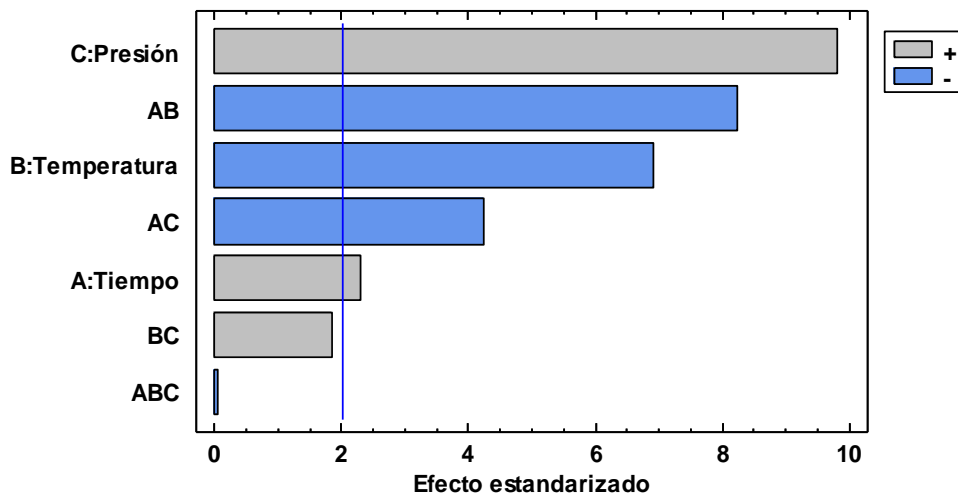


Figura 5.21. Diagrama de Pareto estandarizado para elongación a fuerza máxima.

Fuente: Este estudio.

El gráfico 5.22 sugiere que al disminuir el tiempo o presión disminuyen la variable de respuesta, de igual manera el aumento de temperatura disminuye la misma. No obstante, el gráfico 5.23 permite dar un mejor análisis mediante la interacción de efectos. Se puede observar la interacción AB, donde a un nivel de tiempo superior (10 min) y el nivel de temperatura inferior (15°C) permiten que la variable de respuesta no se vea afectada negativamente y mantenga valores altos, no obstante, los niveles superiores de tiempo y temperatura reducen la media de la misma, además, el nivel inferior de tiempo (2 min) y los niveles de temperatura (15°C y 60°C) mantienen valores intermedios de la misma. Por otra parte, se puede observar la interacción AC, donde a un nivel de tiempo inferior (2 min) y un nivel superior de presión (0,7 bar) hacen que la variable de respuesta mantenga valores altos, no obstante, niveles inferiores de tiempo (2 min) y presión (0,7 bar) disminuyen el valor medio de la misma, mientras que, un nivel superior de tiempo (10 min) con los niveles de presión (0,2 bar y 0,7 bar) mantienen valores intermedios.

Gráfica de Efectos Principales para Elongación total a fuerza máxima

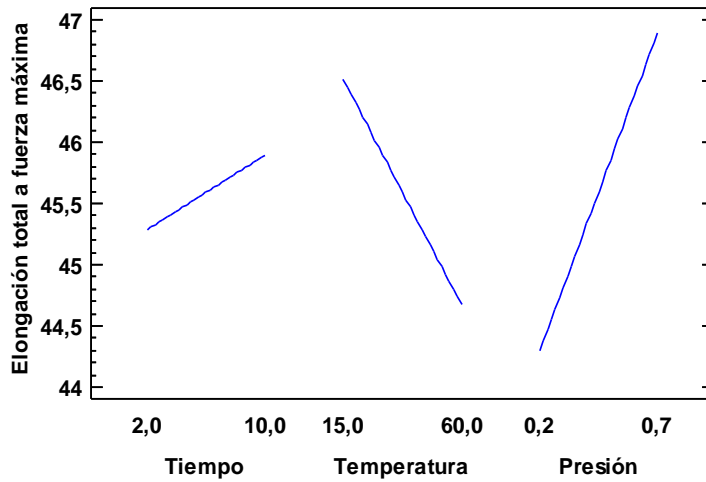


Figura 5.22. Gráfica de efectos principales para elongación total a fuerza máxima.

Fuente: Este estudio.

Gráfica de Interacción para Elongación total a fuerza máxima

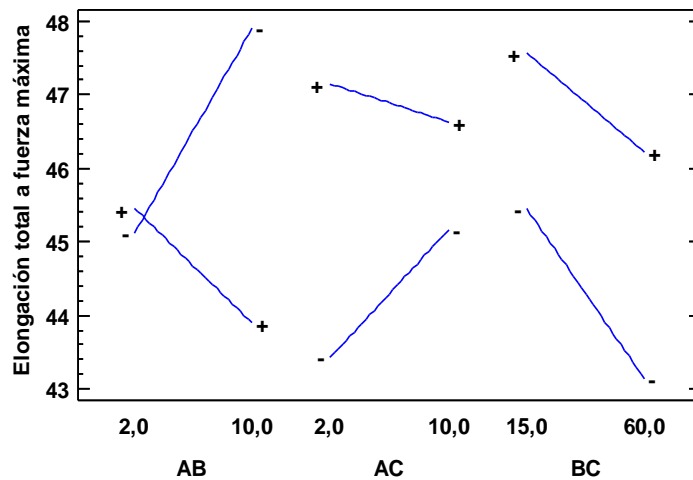


Figura 5.23. Gráfica de interacciones AB: Tiempo-Temperatura, AC: Tempo-Presión, BC: Temperatura-Presión para elongación total a fuerza máxima.

Fuente: Este estudio.

En la figura 5.24 se observa diferencias estadísticamente significativas entre los valores medios de los tratamientos impregnados a un nivel superior de presión (T2, T4, T6 y T8) con respecto a los valores medios de los tratamientos impregnados a un nivel inferior de presión (T1, T3, y T7), los tratamientos T2, T4, T6 y T8 en general presentan los valores medios más altos, teniendo en

cuenta que el diagrama de Pareto muestra que el efecto más significativo es la presión y su aumento produce aumento en el valor de la variable de respuesta, esto puede ser atribuido a una excesiva creación de gradientes de presión en el sistema sólido-líquido generando la salida de gas pero también una posible salida de líquidos nativos en la etapa de vacío en el interior de la estructura porosa (Fito, 1994) lo cual afecta su estructura, a esto se suma en los tratamientos T4 y T8 la interacción temperatura-presión que al ser positiva podría causar ablandamientos de los tejidos. Se observa diferencias estadísticamente significativas entre los valores medios de los tratamientos impregnados a un nivel superior de temperatura (T3, T4, T7 y T8) con respecto a los valores medios de los tratamientos impregnados a un nivel inferior de temperatura (T1, T2, T5 y T6), los tratamientos T3, T4, T7 y T8 en general presentan los valores medios más bajos, esto teniendo en cuenta que el efecto de la temperatura es negativo y su aumento produce disminución en el valor de la variable de respuesta, esto puede ser debido a que el aumento de temperatura produce un cierto ablandamiento, a esto se suma que esta fibra no contiene cantidades considerables de lignina, Schulze *et al.* (2014) reporta que matrices flexibles presentan mayor concentración del líquido de impregnación, por lo que el aumento de la elongación en estos tratamientos podría atribuirse a una efectiva inclusión de la emulsión de impregnación.

Al igual que en el fique, la inclusión de glicerol aumentó el porcentaje de elongación, cuanto más se incluye una sustancia plastificante en una matriz polimérica, la elongación aumenta (Alves *et al.*, 2007), no obstante, este fenómeno sólo es observado en los tratamientos T2, T4, T5 y T6 debido a las condiciones de impregnación.

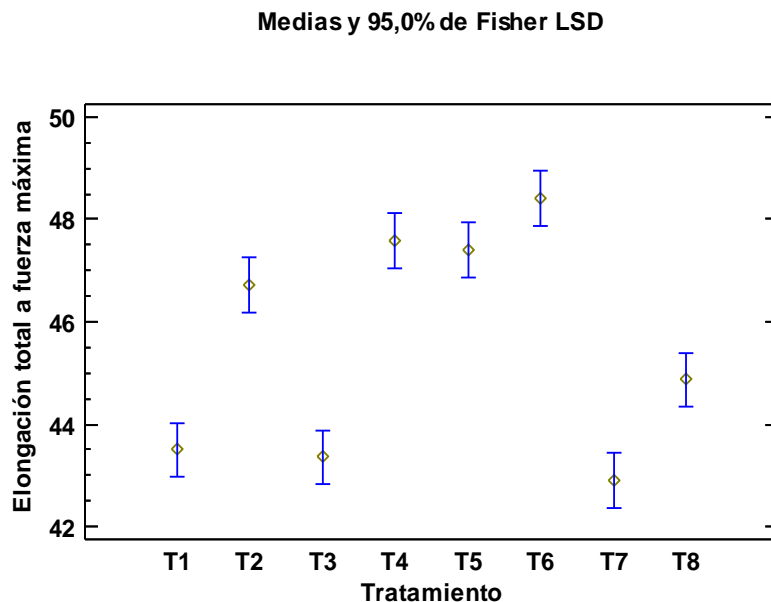


Figura 5.24. Gráfico de medias para tratamientos para elongación total a fuerza máxima en fibra de algodón por método de LSD Fisher a un 95% de confianza.

Fuente: Este estudio.

5.1.2.2.3 *Análisis del efecto de impregnación a vacío sobre módulo de Young en fibra de algodón.*

Tabla 5.12

Análisis de varianza para módulo de Young.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Tiempo	5804,5	1	5804,5	13,06	0,0008
B: Temperatura	35247,6	1	35247,6	79,31	0,0000
C: Presión	4857,36	1	4857,36	10,93	0,0020
AB	9926,35	1	9926,35	22,33	0,0000
AC	823,304	1	823,304	1,85	0,1811
BC	2080,68	1	2080,68	4,68	0,0365
ABC	1716,0	1	1716,0	3,86	0,0564
Error total	17777,9	40	444,447		
Total (corr.)	78233,6	47			

*Valores de $p < 0,05$ indican diferencias estadísticamente significativas. El modelo tiene un $R^2 = 77,2759\%$ y $R^2 (aj) = 73,2992\%$.

Fuente: Este estudio.

En la tabla 5.12, se reporta el análisis de varianza de efectos principales y sus interacciones para módulo de Young, se puede observar que existen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en los factores tiempo, temperatura, presión, las interacciones AB y BC. De igual manera, estos resultados para la variable de respuesta mencionada para fibra de algodón se observan en la figura 5.25, se puede observar que el efecto del tiempo, temperatura y presión es negativo, es decir, el aumento de tiempo, temperatura o presión disminuye el valor de la variable de respuesta. El efecto de las interacciones AB y BC es positivo para la variable de respuesta mencionada.

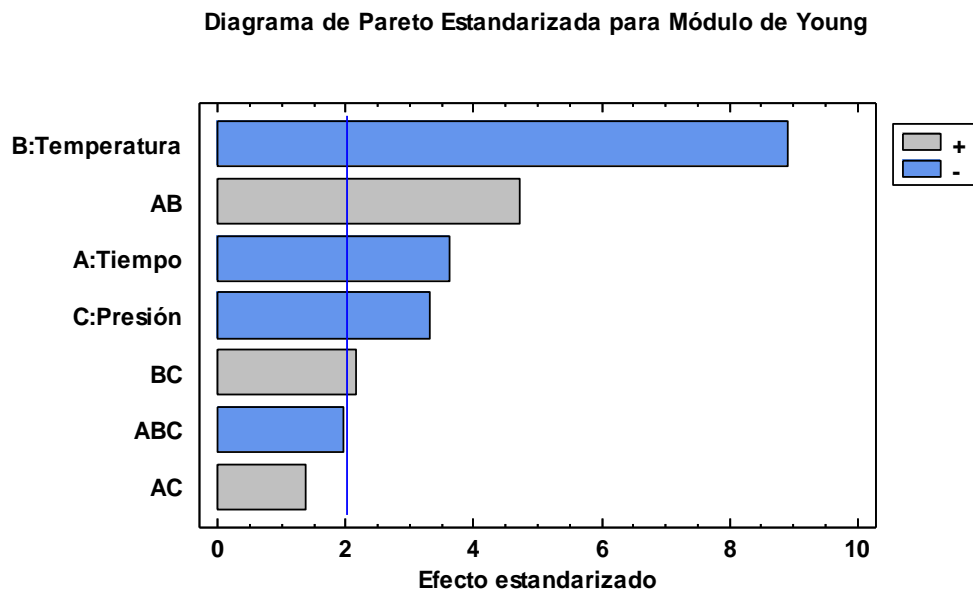


Figura 5.25. Diagrama de Pareto estandarizado para módulo de Young.

Fuente: Este estudio.

El gráfico 5.26 sugiere que, al aumentar tiempo, temperatura, presión se disminuye la variable de respuesta. No obstante, el gráfico 5.27 permite dar un mejor análisis mediante la interacción de efectos. Se puede observar la interacción AB, donde a un nivel de tiempo inferior (2 min) y un nivel inferior de temperatura (15°C) permite que la variable de respuesta no se vea afectada negativamente y mantenga valores altos de la misma, mientras que, los niveles de tiempo y el nivel superior de temperatura (60°C) disminuyen la misma, mientras que, un nivel superior de tiempo (10 min) con un nivel inferior de temperatura (15°C) permite un valor intermedio de la misma. Por otra parte, se puede observar la interacción BC, donde a un nivel inferior de temperatura (15 °C) y el nivel inferior de presión (0,2 bar) permiten que la variable de respuesta se vea afectada positivamente y mantenga valores altos, no obstante, un nivel superior de temperatura (60°C) con

los niveles de presión (0,2 bar y 0,7 bar) disminuyen la media de la misma, mientras que un nivel inferior de temperatura (15°C) con un nivel superior de presión (0,7 bar), permite que la variable de respuesta mantenga valores intermedios.

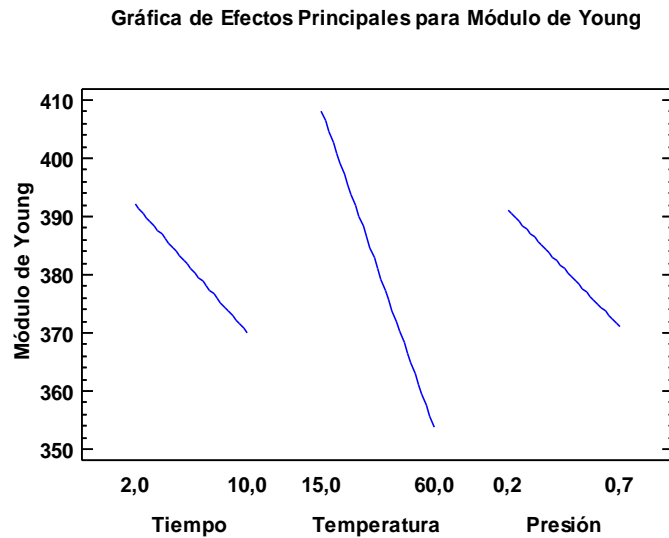


Figura 5.26. Gráfica de efectos principales para módulo de Young.

Fuente: Este estudio.

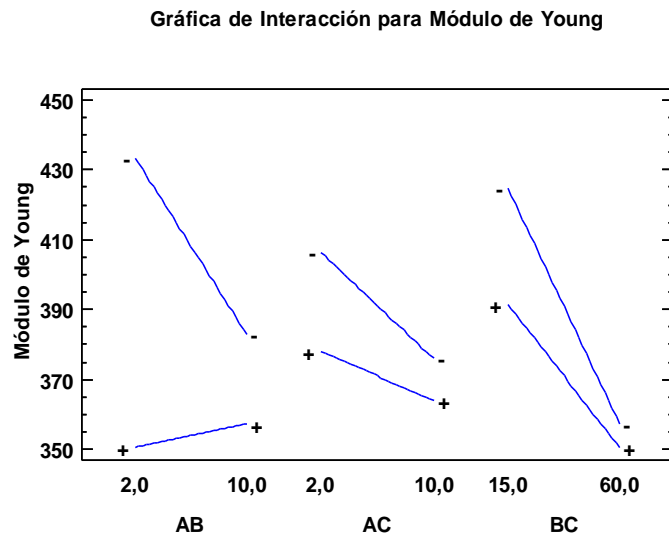


Figura 5.27. Gráfica de interacciones AB: Tiempo-Temperatura, AC: Tempo-Presión, BC: Temperatura-Presión para módulo de Young.

Fuente: Este estudio.

En la figura 5.28 se observan diferencias estadísticamente significativas entre los valores medios de los tratamientos impregnados a un nivel superior de temperatura (T3 y T4) con respecto

a los valores medios de los tratamientos impregnados a un nivel inferior de temperatura (T1 y T2), los tratamientos T3 y T4 presentan los valores medios más bajos, lo anterior puede atribuirse a que el efecto de la temperatura a nivel superficial de la fibra de algodón genera la remoción de compuestos presentes en la cutícula como ceras y en la pared primaria como hemicelulosa y pectina, que si bien están en bajos contenidos pueden aportar rigidez mediante la función de aglutinamiento de la celulosa (Dochia *et al.*, 2012).

Al igual que en fibra de fique, se resalta la relación inversamente proporcional entre el módulo de Young y la elongación, de igual manera, el uso de plastificante en la formulación produce flexibilidad sobre la película resultante, por ende, en la fibra de algodón (Alves *et al.*, 2007).

Medias y 95,0% de Fisher LSD

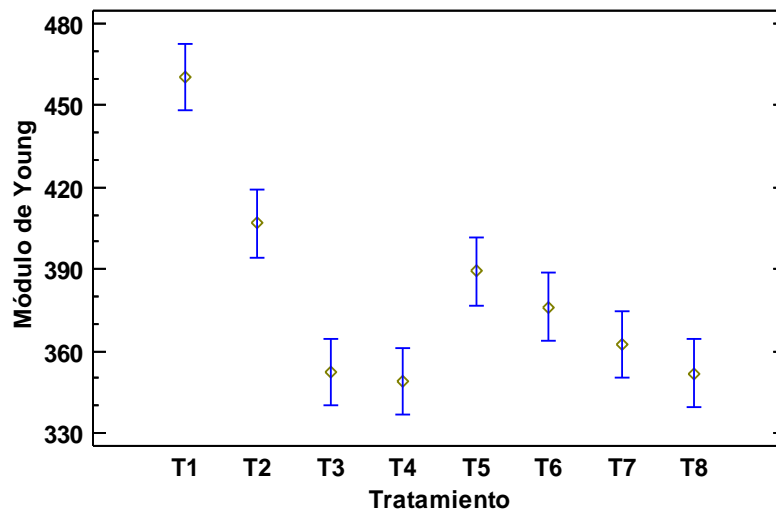


Figura 5.28. Gráfico de medias para tratamientos para módulo de Young en fibra de algodón por método de LSD Fisher a un 95% de confianza.

Fuente: Este estudio.

5.1.3 Optimización del tratamiento óptimo de impregnación a vacío sobre fibras vegetales.

5.1.3.1 Optimización del tratamiento óptimo de impregnación a vacío sobre fibra de fique.

Tabla 5.13

Valores óptimos de los factores tiempo, temperatura y presión.

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Tiempo	2,0	10,0	2,0
Temperatura	15,0	60,0	15,0
Presión	0,2	0,7	0,2

Fuente: Este estudio.

La tabla 5.13 muestra que la mejor interacción entre los factores tiempo, temperatura y presión para maximizar resistencia a la tracción, elongación total a fuerza máxima y módulo de Young es el tratamiento de 2 minutos, 15°C y 0,2 bar, correspondiente al tratamiento T1 para fibra de fique. estos resultados son similares a los reportados por Vargas *et al.* (2009) y Martínez-Monzó *et al.* (1998), los cuales reportan mejoras en la resistencia mecánica utilizando tiempos de impregnación total a 4 y 5 minutos, a bajas presiones 5 kPa (0,05 bar) y 50 mbar (0,05 bar).

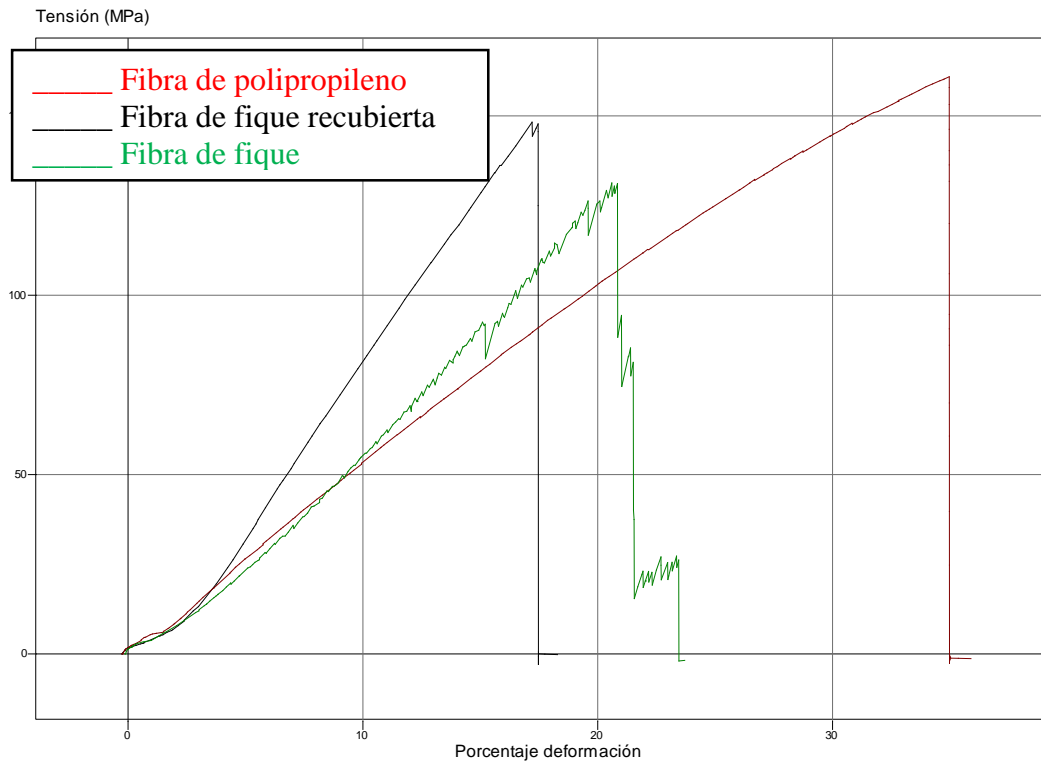


Figura 5.29. Diagrama de tensión contra porcentaje de deformación para fibra de fique y fibra de fique recubierta, comparadas con fibra de polipropileno.

Fuente: Este estudio.

En la figura 5.29 se puede comparar la gráfica obtenida para fibra de fique (sin impregnar) con respecto a fibra de fique recubierta (impregnada), del diagrama de fibra de fique se observa que no es uniforme siendo esto una desventaja característica de esta fibra, haciendo que el diagrama de tensión forme picos debido al rompimiento progresivo de agrupaciones de microfibrillas, hasta llegar a su elongación máxima y su ruptura total (Contreras *et al.*, 2009). Ahora bien, la fibra de fique recubierta a diferencia de la fibra de fique sin impregnar o recubrir, presenta uniformidad y homogeneidad, ventaja que no posee la fibra de fique sin impregnar por naturaleza, en comparación al diagrama de tensión de la fibra de fique sin impregnar, la fibra de fique recubierta muestra una ruptura total de la fibra en el punto de elongación total a fuerza máxima, lo cual puede ser debido al efecto de compactación producido por el líquido de impregnación y la ocupación del mismo dentro de los poros de la matriz (Betalleluz, 2016).

Al comparar la fibra de polipropileno con las fibras de fique sin impregnar e impregnada, se observa que la fibra de fique impregnada y polipropileno, presentan uniformidad hasta que alcanzan el punto máximo de porcentaje de deformación produciendo su ruptura, mientras que, la fibra de fique sin impregnar se desprende de sus microfibras hasta llegar al rompimiento en su deformación máxima.

Tabla 5.14

Comparación de propiedades mecánicas de fibras de fique, fique recubierto y polipropileno.

Tratamiento	Resistencia a la tracción (MPa)	Elongación total a fuerza máxima (%)	Módulo de Young (MPa)
Fique	143,434 ±4,893	20,106 ±0,111	945,608 ±14,310
Fique recubierto	153,131 ±13,641	18,007 ±1,063	1132,63 ±124,238
Polipropileno	167,437 ± 4,379	37,533 ±1,882	556,027 ±12,636

*Valores promedio (n=5) ± desviación estándar.

Fuente: Este estudio.

En la tabla 5.14 se puede observar que la fibra de fique recubierta presenta mayor resistencia a la tracción que la fibra de fique, pero menor a la fibra de polipropileno. Se resalta que, a pesar de que el T1 fue el óptimo, éste se impregnó nuevamente a esas condiciones para determinar las respectivas propiedades mecánicas, ya que, al ser una fibra vegetal las proporciones de los compuestos lignocelulósicos varían entre sí, como consecuencia de esta variabilidad las

propiedades y características físicas de las fibras de fique no son homogéneas (Mohan *et al.*, 2006). La elongación total a fuerza máxima de la fibra de fique recubierta es aproximada con las fibras de fique, mientras que, la fibra de polipropileno es mucho más elástica que éstas. El módulo de Young de la fibra de fique recubierto es mayor en comparación a las fibras de fique y polipropileno, es decir, la fibra de fique es más rígida en comparación a las fibras de fique y polipropileno debido al efecto de compactación ya mencionado anteriormente.

En la figura 5.30 se puede observar que los valores medios de resistencia a la tracción entre fibras de fique y fique recubierto no presentaron diferencias estadísticamente significativas, no obstante, la fibra de fique recubierto presenta mayor valor medio para la variable de respuesta. Al comparar con la fibra de polipropileno, ésta presenta diferencias estadísticamente significativas con respecto a las fibras de fique y fique recubierto, siendo la fibra polipropileno la que presenta el mayor valor medio para resistencia a la tracción; Si bien estos resultados no muestran diferencias entre fibra de fique y fibra de fique recubierto, el valor medio que presenta la fibra de fique recubierto podría ser aprovechado en el tutorado de arveja.

Medias y 95,0% de Fisher LSD

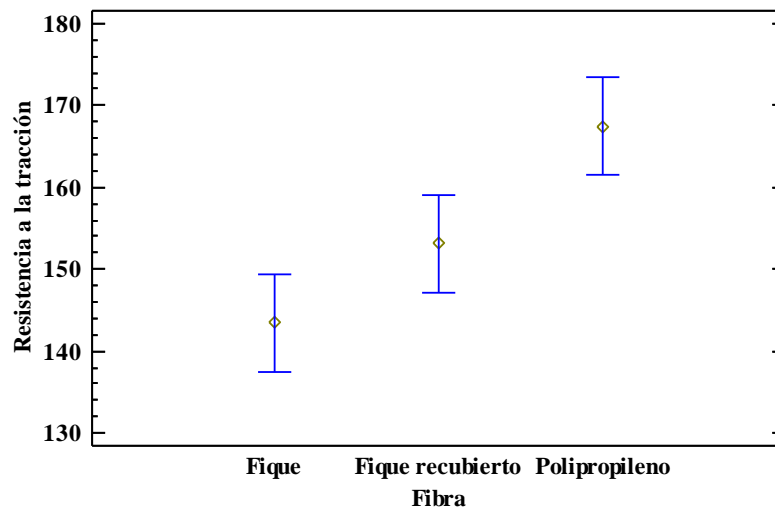


Figura 5.30. Gráfico de medias para resistencia a la tracción de fibras de fique y fique recubierto comparadas con fibra de polipropileno por método de LSD Fisher a un 95% de confianza.

Fuente: Este estudio.

En la figura 5.31 se puede observar que los valores medios de elongación total a fuerza máxima entre fibras de fique y fique recubierto presentaron diferencias estadísticamente significativas, además, la fibra de fique recubierto presenta menor valor medio para la variable de respuesta, esto

es atribuido al estrés mecánico al que se somete en la impregnación y por el efecto del gel formado los grupos carboxílicos de la pectina (Ostos *et al.*, 2012). Al comparar con la fibra de polipropileno, ésta presenta diferencias estadísticamente significativas con respecto a las fibras de fique y fique recubierto, siendo la fibra polipropileno la que presenta el mayor valor medio para la variable de respuesta. Ahora bien, los resultados de fibra de fique recubierta y fibra de fique no son comparables con fibra de polipropileno, no obstante, para efectos del tutorado la elongación presentada por las fibra de fique recubierto y fique podría ser útil, es decir, para el crecimiento y aumento de peso de la planta (aproximadamente 2 kg) se necesita un soporte que la mantenga estable y si la fibra se estira demasiado la planta podría caer al suelo y verse afectada (Revelo *et al.*, 2019), por el contrario, si la fibra no se estira lo suficiente se fracturaría afectando el cultivo, razón por la cual éstas fibras vegetales podrían ser una alternativa técnicamente viable en el tutorado.

Medias y 95,0% de Fisher LSD

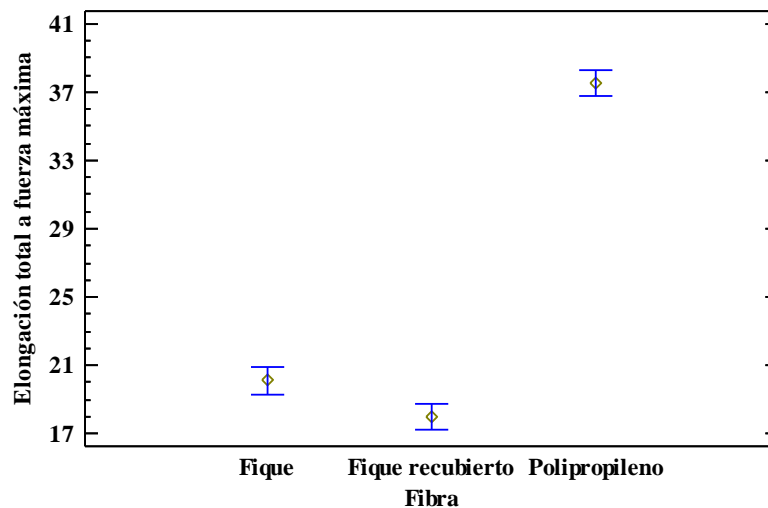


Figura 5.31. Gráfico de medias para elongación total a fuerza máxima de fibras de fique y fique recubierto comparadas con fibra de polipropileno por método de LSD Fisher a un 95% de confianza.

Fuente: Este estudio.

En la figura 5.32 se puede observar que los valores medios de módulo de Young entre fibras de fique y fique recubierto presentaron diferencias estadísticamente significativas, además, la fibra de fique recubierta presenta mayor valor medio para la variable de respuesta. Al comparar con la fibra de polipropileno, ésta presenta diferencias estadísticamente significativas con respecto a las fibras de fique y fique recubierto, siendo la fibra polipropileno la que presenta el menor valor

medio para la variable de respuesta. Ahora bien, se resalta la relación inversamente proporcional existente entre el módulo de Young y elongación total a fuerza máxima, donde a mayor elongación menor módulo de Young. Estos resultados nos muestran que en cuanto a módulo de Young la fibra de fique recubierta podría ser una alternativa para remplazar al polipropileno, por su alta rigidez que brinda un soporte estable a las plantas en el tutorado agrícola.

Medias y 95,0% de Fisher LSD

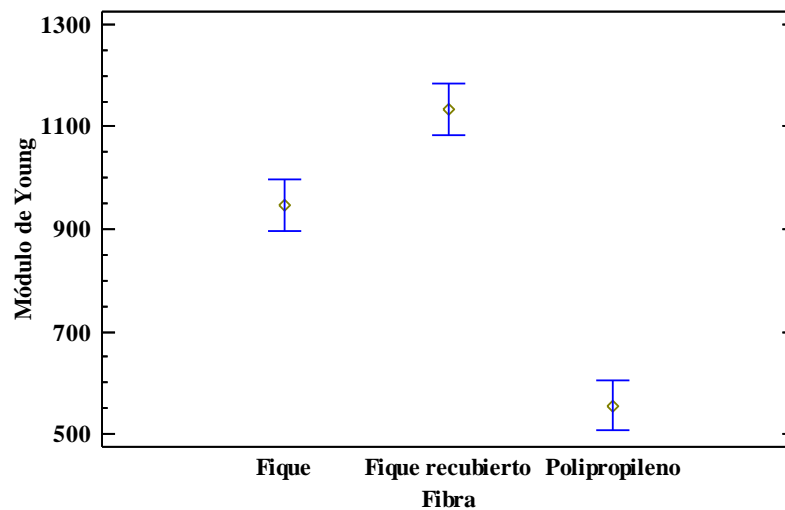


Figura 5.32. Gráfico de medias para Módulo de Young de fibras de fique y fique recubierto comparadas con fibra de polipropileno por método de LSD Fisher a un 95% de confianza.

Fuente: Este estudio.

5.1.3.1.1 Análisis por espectroscopia infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) para fibra de fique impregnada a vacío.

En la figura 5.33 se muestra el espectro FITR para fibra de fique sin impregnar y fibra de fique impregnada o recubierta (tratamiento óptimo). Se puede observar bandas a 3535 cm^{-1} y 2904 cm^{-1} atribuidas a los grupos carboxilo (OH) y C-H respectivamente, que se encuentran asociados a la estructura de la celulosa, hemicelulosa y lignina compuestos presentes en este tipo de fibra son afectados en la fibra impregnada. La banda a 1747 cm^{-1} que se asocia a la presencia de grupos carbonilo (C=O) en la fibra, provenientes de la hemicelulosa se ve afectado por la impregnación, mostrando una señal fuerte. Las señales características de la celulosa se encuentran 1250 cm^{-1} se ve afectada y las de la lignina entre 1500 y 1800 cm^{-1} no se ven afectadas por la IV.

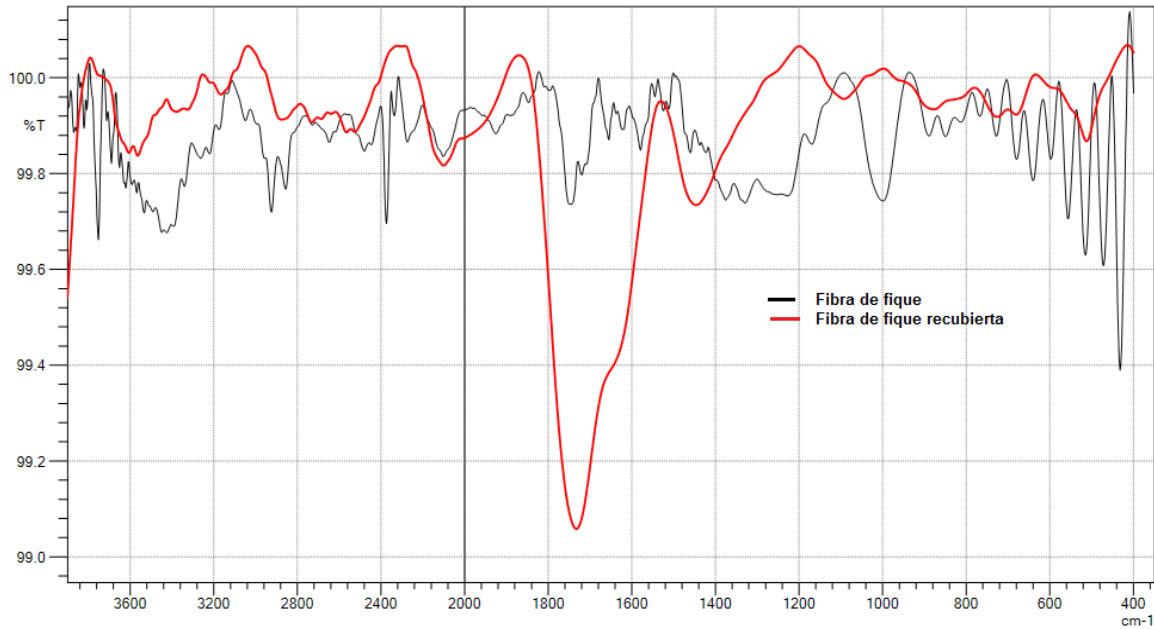


Figura 5.33. Espectro FTIR de fibras de fique y fique impregnado.

Fuente: Este estudio.

5.1.3.2 Optimización del tratamiento óptimo de impregnación a vacío sobre fibra de algodón.

Tabla 5.15

Valores óptimos de los factores tiempo, temperatura y presión.

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Tiempo	2,0	10,0	2,0
Temperatura	15,0	60,0	15,0
Presión	0,2	0,7	0,200593

Fuente: Este estudio.

La tabla 5.15 muestra que la mejor interacción entre los factores tiempo, temperatura y presión para maximizar resistencia a la tracción, elongación total a fuerza máxima y módulo de Young es el tratamiento de 2 minutos, 15°C y 0,2 bar; correspondiente al tratamiento T1 para fibra de algodón del diseño experimental. Obteniendo las mismas condiciones de impregnación óptimas que en fibra de fique. De igual manera, estos resultados son similares a los reportados por Ostos *et al.* (2012), donde obtiene mejoras en resistencia mecánica y disminución en elongación a presión de 138 mmHg (0,184 bar) y un tiempo total de impregnación de 5 minutos.

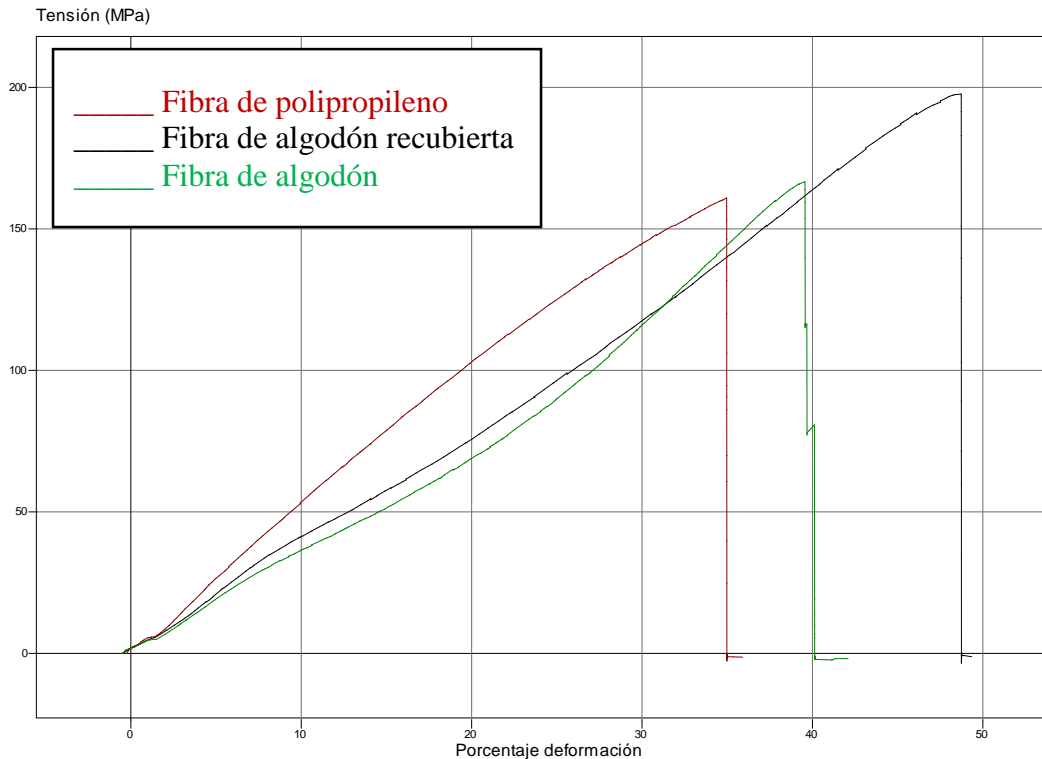


Figura 5.34. Diagrama de tensión contra porcentaje de deformación para fibra de algodón y fibra de algodón recubierta, comparadas con fibra de polipropileno.

Fuente: Este estudio.

En la figura 5.34 se puede comparar la gráfica obtenida para fibra de algodón sin recubrir con respecto a fibra de algodón recubierta, del diagrama de fibra de algodón sin impregnar o sin recubrir se observa que en general presenta una homogeneidad superficial y como reflejo su estiramiento y rompimiento de las fibras no deja fibras en la superficie, es decir, su ruptura se produce por rompimiento total de las microfibrillas, además de su compleja estructura (Garside y Wyeth, 2003). Ahora bien, la fibra de algodón recubierta es similar a la fibra de algodón sin recubrir, presentando uniformidad y homogeneidad, mostrando una ruptura total de las fibras en el punto de elongación total a fuerza máxima, también podría deberse al efecto de compactación producido por el líquido de impregnación y la ocupación del mismo dentro de los poros de la matriz (Betalleluz, 2016).

Al comparar la fibra de polipropileno con las fibras de algodón sin recubrir y algodón recubierta, se observa que su comportamiento es similar, presentando uniformidad hasta que alcanzan el punto máximo de porcentaje de deformación produciendo su ruptura.

Tabla 5.16

Comparación de propiedades mecánicas de fibras de: algodón, algodón recubierto y polipropileno.

Tratamiento	Resistencia a la tracción (MPa)	Elongación total a fuerza máxima (%)	Módulo de Young (MPa)
Algodón	146,009 ± 1,914	41,264 ± 1,131	561,419 ± 83,332
Algodón recubierto	197,738 ± 6,422	43,412 ± 1,152	528,614 ± 111,938
Polipropileno	167,200 ± 3,960	37,506 ± 1,684	559,048 ± 13,509

*Valores promedio (n=5) ± desviación estándar.

Fuente: Este estudio.

En la tabla 5.16 se puede observar que la fibra de algodón recubierta (impregnada) presenta mayor resistencia a la tracción y elongación total a fuerza máxima que las fibras de algodón (sin impregnar) y polipropileno. La fibra de polipropileno es más resistente a la tracción que la fibra de algodón sin impregnar, no obstante, la fibra de algodón sin impregnar presenta mayor elongación total a fuerza máxima. El módulo de Young de la fibra de algodón es mayor en comparación a las fibras de algodón recubierto y polipropileno; el módulo de Young de la fibra de polipropileno es mayor en comparación con la fibra de algodón recubierto.

En la figura 5.35 se puede observar que los valores medios de resistencia a la tracción entre fibras de algodón sin recubrir y algodón recubierto presentan diferencias estadísticamente significativas, la fibra de algodón recubierta tiene mayor valor medio para la variable de respuesta, de igual manera, la fibra de algodón recubierta al compararla con la fibra de polipropileno presentan diferencias estadísticamente significativas, siendo la fibra de algodón recubierto la que presenta el mayor valor medio para resistencia a la tracción. Estos resultados nos indican que la alta resistencia a la tracción de la fibra de algodón recubierta podría soportar el ciclo del tutorado.

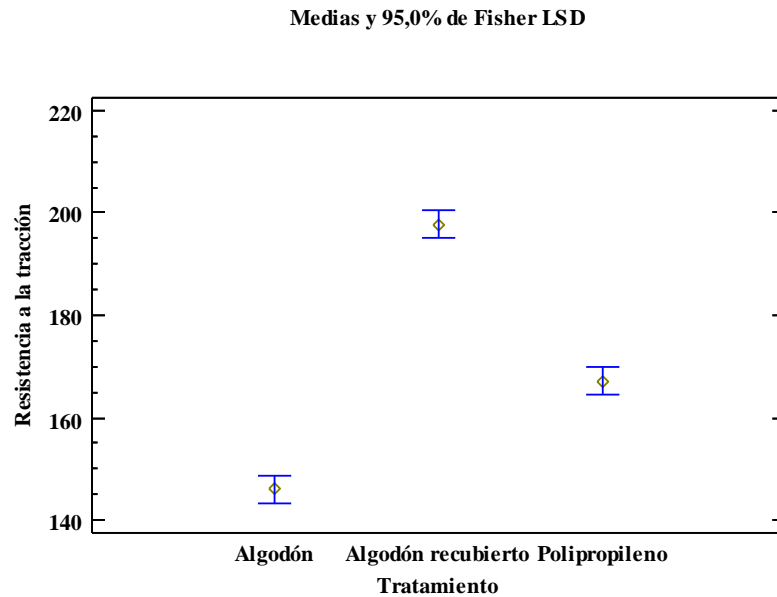


Figura 5.35. Gráfico de medias para resistencia a la tracción de fibras de algodón y algodón recubierto comparadas con fibra de polipropileno por método de LSD Fisher a un 95% de confianza.

Fuente: Este estudio.

En la figura 5.36 se puede observar que los valores medios de elongación total a fuerza máxima entre fibras de algodón y algodón recubierto presentaron diferencias estadísticamente significativas, sin embargo, la fibra de algodón recubierta presenta mayor valor medio para la variable de respuesta, de igual manera, la fibra de algodón recubierta comparada con la fibra de polipropileno presenta diferencias estadísticamente significativas, siendo la fibra de algodón recubierta la que presenta el mayor valor medio para la variable de respuesta.

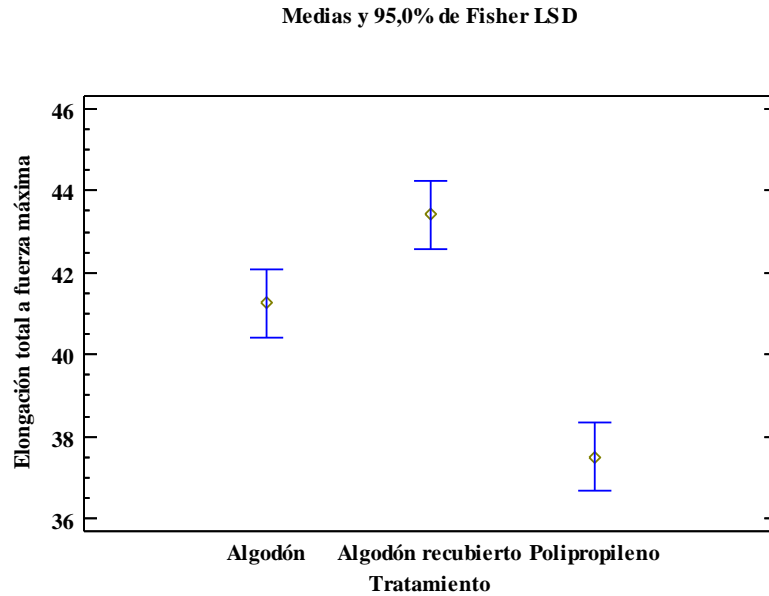


Figura 5.36. Gráfico de medias para elongación total a fuerza máxima de fibras de algodón y algodón recubierto comparadas con fibra de polipropileno por método de LSD Fisher a un 95% de confianza.

Fuente: Este estudio.

En la figura 5.37 se puede observar que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las fibras de algodón, algodón recubierto y polipropileno, siendo las fibras de polipropileno y algodón recubierto las que presenta mayor y menor valores medios, respectivamente. Ahora bien, se resalta la relación inversamente proporcional existente entre el módulo de Young y elongación total a fuerza máxima, donde a mayor elongación menor módulo de Young, no obstante, a pesar de que la fibra de algodón recubierta presentó diferencias estadísticamente significativas en cuanto a elongación comparada con la fibra de algodón sin recubrir, en el módulo de Young esta relación no fue significativa, por lo tanto, no afectaría el tutorado. Estos resultados nos muestran que en cuanto a módulo de Young la fibra de algodón recubierta es comparable con el polipropileno en el tutorado y por lo tanto una alternativa en el tutorado.

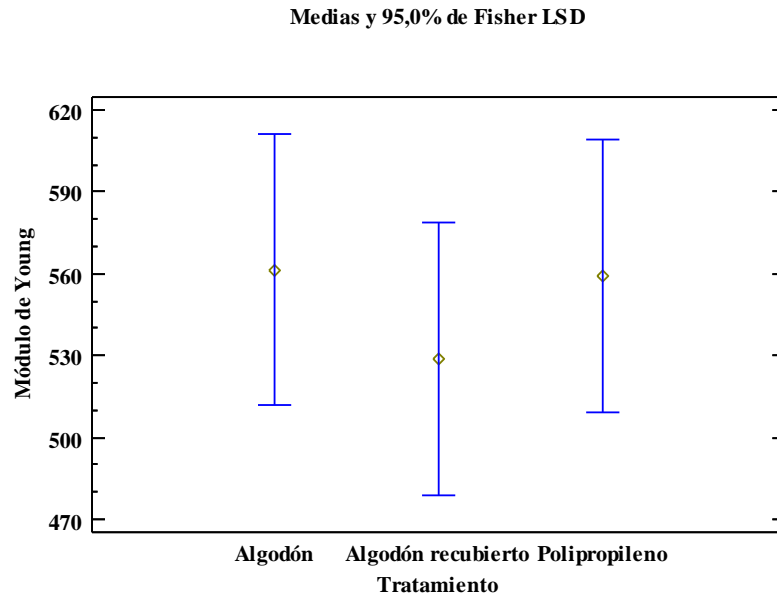


Figura 5.37. Gráfico de medias para módulo de Young de fibras de algodón y algodón recubierto comparadas con fibra de polipropileno por método de LSD Fisher a un 95% de confianza.

Fuente: Este estudio.

5.1.3.2.1 Análisis por espectroscopia infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) para fibra de algodón impregnada a vacío.

En la figura 5.38 se muestra el espectro FITR para fibra de algodón impregnada o recubierta (tratamiento óptimo), a diferencia de la figura 5.4 del numeral 5.1.1.4.2, no se puede observar claramente los grupos funcionales propios de la fibra de algodón, no obstante, se observa que los picos característicos de la fibra recubierta presentan la señal característica del biopolímero entre 3000 y 3370 cm^{-1} .

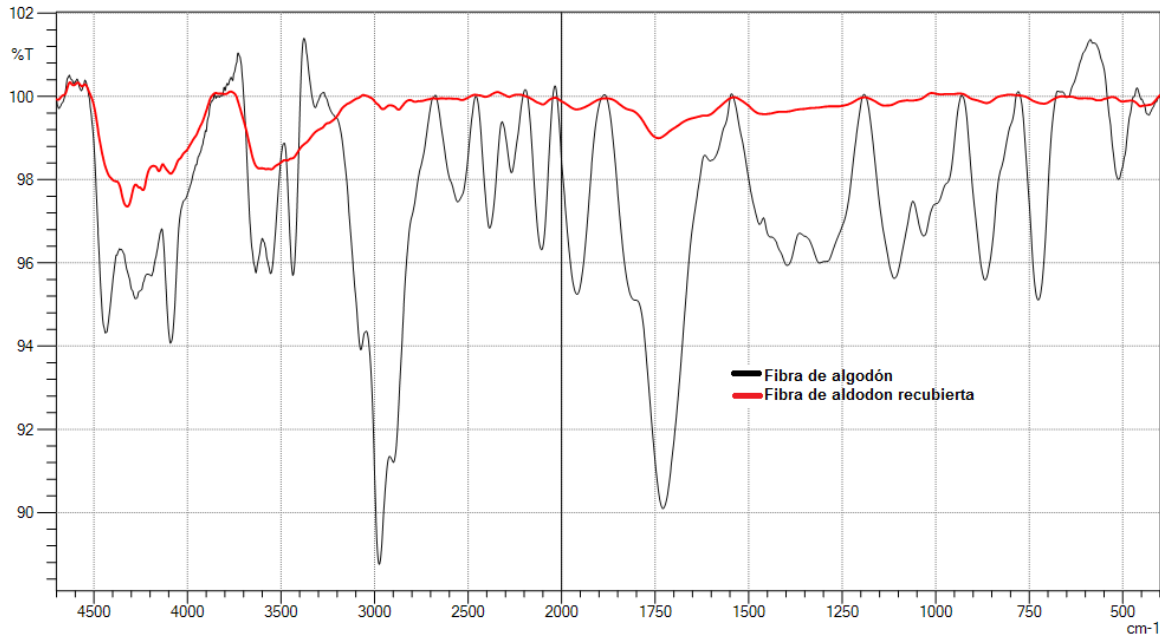


Figura 5.38. Espectro FTIR de fibras de algodón y algodón impregnado.

Fuente: Este estudio.

5.1.4 Parámetros característicos de impregnación a vacío en fibras vegetales.

Para la determinación de los presentes parámetros de impregnación se utilizaron las propiedades fisicoquímicas que se muestran en el anexo 1.

5.1.4.1 parámetros característicos de fibras de fique impregnadas a vacío.

La tabla 5.17 muestra los parámetros característicos de impregnación a vacío para cada tratamiento evaluado.

Tabla 5.17*Parámetros característicos de impregnación a vacío de fibra de fique.*

Tratamiento	Parámetros característicos de impregnación a vacío				
	X (cm ³ EI / cm ³ fibra)	X _{HDM} (g EI/ g de fibra)	γ (cm ³ deformac ión / cm ³ fibra)	ε _r	ε _e
T1	0,706 ^f ± 0,004	0,580 ^f ± 0,00007	0,584 ^{bc} ±0,003	0,628 ^d ± 0,002	0,454 ^a ±0,007
T2	0,940 ^g ± 0,015	0,652 ^h ± 0,00006	0,758 ^c ± 0,017	0,635 ^c ± 0,006	0,225 ^a ±0,092
T3	0,523 ^b ± 0,008	0,482 ^b ± 0,00002	0,445 ^b ± 0,029	0,591 ^b ± 0,006	0,288 ^a ±0,035
T4	0,581 ^d ± 0,001	0,508 ^d ± 0,00010	0,418 ^b ± 0,018	0,590 ^b ± 0,001	0,203 ^a ±0,090
T5	0,222 ^a ± 0,001	0,207 ^a ± 0,00016	0,175 ^a ± 0,009	0,380 ^a ± 0,002	0,173 ^a ±0,012
T6	0,687 ^e ± 0,005	0,597 ^g ± 0,00010	0,513 ^{bc} ±0,327	0,663 ^f ± 0,002	0,215 ^a ±1,665
T7	0,553 ^c ± 0,004	0,507 ^c ± 0,00007	0,489 ^b ± 0,016	0,609 ^c ± 0,003	0,239 ^a ±0,018
T8	0,576 ^d ± 0,004	0,508 ^c ± 0,00015	0,401 ^b ± 0,001	0,594 ^b ± 0,003	0,217 ^a ±0,021

*Valores promedio (n=3) ± desviación estándar. Letras no comunes entre columnas indican diferencias estadísticamente significativas entre medias, según prueba de LSD de Fisher a un 95% de confianza.

Fuente: Este estudio.

En la tabla 5.17 se observan los parámetros característicos de fibra de fique impregnada. El valor positivo de la deformación volumétrica de la muestra (γ) indica un aumento del volumen de la muestra en el tiempo total de inmersión, debido a la expansión del gas ocluido en los poros (Bellatelluz, 2016). El valor positivo de la fracción volumétrica indica una entrada de líquido nativo de los poros, un intercambio de masa y una salida de gas ocluido en los poros (Fito y Pastor, 1994; Fito y Chiralt, 1995; Fito *et al.*, 1996 Barat *et al.*, 2001; Cortes *et al.*, 2007; Betalleluz, 2016; Carda, 2016).

Los valores de porosidad efectiva o disponible (17,3%-45,4%) obtenidos nos muestra una gran disponibilidad de los espacios intercelulares para la incorporación de la emulsión de impregnación, en términos generales menores que la porosidad real (38%-66,3%) de cada tratamiento evaluado; este resultado nos indica, que en términos reales toda la porosidad de la fibra no está disponible

para el proceso de impregnación, debido a muchos factores como: el efecto de capilaridad, las modificaciones estructurales ocasionadas por los cambios de presión en el sistema, la viscosidad de la disolución que determina la pérdida de carga durante la entrada del líquido en los poros del tejido (Mujica, 2003). Las fibras con mayor porosidad presentaron una mayor ganancia de la emulsión de impregnación, lo cual es apreciable en los tratamientos T1, T2, T6 y T7.

La fracción volumétrica de los tratamientos en general es alta debido a que la fibra de fique presenta alta porosidad (Chafer *et al.*, 2003).

Corzo y Barrios, (2012) reportan que a una temperatura constante cuando se aumenta la presión de vacío y, un tiempo de impregnación constante cuando se aumenta la presión de vacío la fracción volumétrica aumenta; por tal razón, los tratamientos T2, T4, T6 y T8 presentan en general alta fracción volumétrica; Además reportan, que a presión constante cuando se aumenta la temperatura desde 35°C hasta 43,4°C la fracción volumétrica aumenta, lo cual es apreciable en los tratamientos T3, T4, T7 y T8; y que a una presión de vacío constante cuando se aumenta el tiempo de impregnación, se incrementa la fracción volumétrica, lo cual es apreciable en los tratamientos T5, T6 T7 y T8.

Fito *et al.* (2001) señalan que la ganancia hidrodinámica de la disolución externa en el producto poroso durante el restablecimiento de la presión atmosférica es muy rápida y es únicamente dependiente de la caída de presión durante el flujo del líquido determinada por su viscosidad, además de la porosidad de la matriz sólida; a lo anterior podría atribuirse que la fracción másica incorporada en términos generales presente valores altos debido a que la fibra de fique es una matriz sólida altamente porosa que junto a la viscosidad permitió incorporar de manera efectiva la emulsión de impregnación, además, el relativamente amplio espacio intercelular, además del pequeño diámetro de las muestras estaría contribuyendo a la rapidez del proceso.

La variabilidad de la fracción volumétrica, fracción másica y deformación volumétrica se debe al trabajar con soluciones con cierta viscosidad impidiendo una impregnación homogénea, bloqueándose el flujo de la disolución de impregnación en la zona superficial; este comportamiento es reportado por Guillemin *et al.* (2008).

5.1.4.2 parámetros característicos de fibras de algodón impregnación a vacío.

La tabla 5. 18 muestra los parámetros característicos de impregnación a vacío para cada tratamiento evaluado.

Tabla 5.18

Parámetros característicos de impregnación a vacío de fibra de algodón

Tratamiento	Parámetros característicos de impregnación a vacío				
	X (cm ³ EI / cm ³ fibra)	X _{HDM} (g EI/ g de fibra)	γ (cm ³ deformac ión / cm ³ fibra)	ε _r	ε _e
T1	0,727 ^{cd} ±0,013	0,666 ^{cd} ±0,00015	0,565 ^{bc} ±0,010	0,633 ^a ±0,006	0,221 ^a ± 0,013
T2	0,678 ^{bc} ±0,057	0,648 ^b ±0,00004	0,648 ^{bc} ±0,270	0,628 ^a ±0,031	0,151 ^a ± 1,132
T3	0,450 ^a ±0,019	0,548 ^a ±0,00594	0,251 ^a ±0,058	0,625 ^a ±0,019	0,272 ^a ± 0,056
T4	0,738 ^{de} ±0,023	0,663 ^{bcd} ±0,00007	0,721 ^c ±0,091	0,621 ^a ±0,012	0,091 ^a ± 0,368
T5	0,775 ^{de} ±0,043	0,675 ^d ±0,00008	0,484 ^b ±0,072	0,624 ^a ±0,021	0,398 ^a ± 0,056
T6	0,790 ^e ±0,028	0,680 ^d ±0,00006	0,755 ^c ±0,138	0,626 ^a ±0,013	0,180 ^a ± 0,733
T7	0,773 ^{de} ±0,014	0,672 ^d ±0,00008	0,564 ^{bc} ±0,054	0,619 ^a ±0,007	0,286 ^a ± 0,055
T8	0,647 ^b ±0,039	0,649 ^{bc} ±0,02924	0,598 ^{bc} ±0,034	0,647±0,026	0,254 ^a ± 0,089

*Valores promedio (n=3) ± desviación estándar. Letras no comunes entre columnas indican diferencias estadísticamente significativas entre medias, según prueba de LSD de Fisher a un 95% de confianza.

Fuente: Este estudio.

En la tabla 5.18 se observan los parámetros característicos de impregnación en fibra de algodón. El valor positivo de la deformación volumétrica de la muestra (γ) indica un aumento del volumen de la muestra en el tiempo total de inmersión, debido a la expansión del gas ocluido en los poros (Bellatelluz, 2016). El valor positivo de la fracción volumétrica indica una entrada de líquido nativo de los poros, un intercambio de masa y una salida de gas ocluido en los poros (Fito y Pastor, 1994; Fito y Chiralt, 1995; Fito *et al.*, 1996 Barat *et al.*, 2001; Cortes *et al.*, 2007; Betalleluz, 2016; Carda, 2016).

Los valores de porosidad efectiva (15,1%-39,8%) obtenidos nos muestra una gran disponibilidad de los espacios intercelulares para la incorporación de la emulsión de impregnación, en términos generales menores que la porosidad real (61,9%-64,7%) de cada tratamiento evaluado; este resultado nos indica, que en términos reales toda la porosidad de la fibra no está disponible para el proceso de impregnación, debido a muchos factores como: el efecto de capilaridad, las modificaciones estructurales ocasionadas por los cambios de presión en el sistema, la viscosidad de la disolución que determina la pérdida de carga durante la entrada del líquido en los poros del tejido (Mujica, 2003). Las fibras con mayor porosidad presentan una mayor ganancia de emulsión de impregnación, lo cual es apreciable en los todos los tratamientos (Chafer *et al.*, 2003).

Corzo y Barrios, (2012) reportan que, a una temperatura constante cuando se aumenta la presión de vacío y, un tiempo de impregnación constante cuando se aumenta la presión de vacío la fracción volumétrica aumenta; por tal razón, los tratamientos T2, T4, T6 y T8 presentan en general alta fracción volumétrica; Además reportan, que a presión constante cuando se aumenta la temperatura desde 35°C hasta 43,4°C la fracción volumétrica aumenta, lo cual es apreciable en los tratamientos T3, T4, T7 y T8; y que a una presión de vacío constante cuando se aumenta el tiempo de impregnación, se incrementa la fracción volumétrica, lo cual es apreciable en los tratamientos T5, T6 T7 y T8.

Fito *et al.* (2001), señalan que la ganancia hidrodinámica de la disolución externa en el producto poroso durante el restablecimiento de la presión atmosférica es muy rápida y es únicamente dependiente de la caída de presión durante el flujo del líquido determinada por su viscosidad, además de la porosidad de la matriz sólida; Por esta razón, la fracción másica incorporada en términos generales, presentó valores altos debido a que la fibra de algodón es una matriz sólida altamente porosa que junto a la viscosidad permitió incorporar de manera efectiva la emulsión de impregnación, además, el relativamente amplio espacio intercelular y una estructura celular relativamente elástica de algodón, además del pequeño diámetro de las muestras estarían contribuyendo a la rapidez del proceso.

La variabilidad de la fracción volumétrica, fracción másica y deformación volumétrica se debe al trabajar con soluciones viscosas impidiendo una impregnación homogénea, bloqueándose el flujo de la disolución de impregnación en la zona superficial; este comportamiento es reportado por Guillemín *et al.* (2008).

5.2 Modelamiento de las cinéticas de pérdida de propiedades mecánicas de fibras vegetales en el tutorado de arveja (*Pisum sativum* L.)

5.2.1 Parámetros cinéticos del modelo de Page para resistencia a la tracción para cada fibra evaluada.

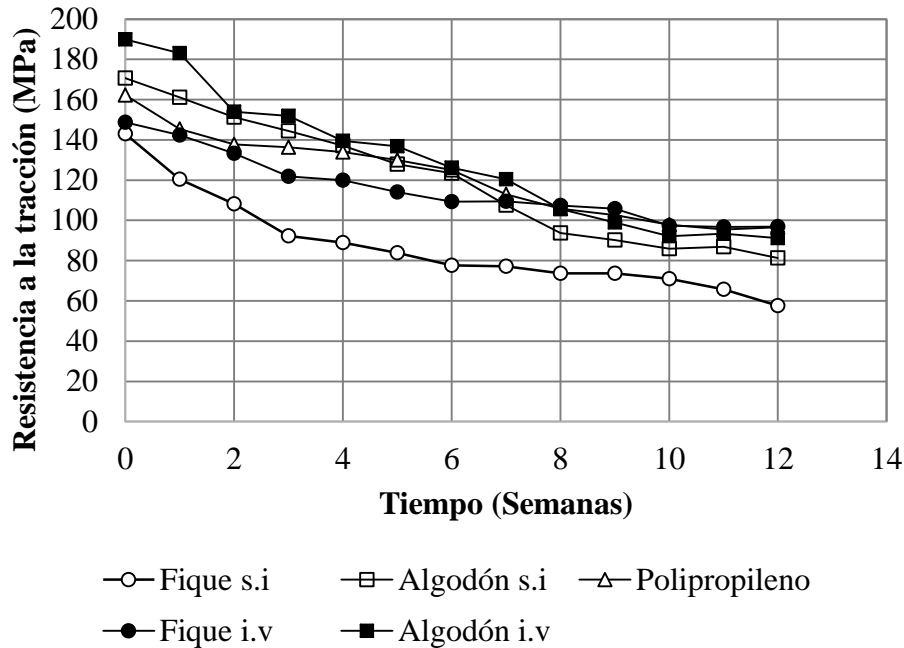


Figura 5.39. Cinética de pérdida de resistencia a la tracción de las diferentes fibras evaluadas.

Fuente: Este estudio.

Fique s.i = fique sin impregnar; algodón s.i= algodón sin impregnar; polipropileno; fique i.v= fique impregnado a vacío; algodón i.v= algodón impregnado a vacío.

En la figura 5.39 se observa la tendencia de la resistencia a la tracción a disminuir en las semanas de experimentación. La mayor pérdida de resistencia se presentó en fique sin impregnar, algodón sin impregnar y algodón impregnado, porcentualmente 59.7%, 52.4%, 51.9%, respectivamente. La menor pérdida de resistencia se presentó en fique impregnado y polipropileno (34.8% y 40.4% respectivamente).

Tabla 5.19

Parámetros cinéticos del modelo de Page para resistencia a la tracción para cada fibra evaluada.

Parámetro	Fibra	k* (semanas ⁻¹)	n*	Ecuación modelo de Page
Resistencia a la tracción	Fique s.i	0,207 ^b ±	0,565±	$MR_{T1} = e^{(-k1 \times t^{n1})}$
		0,016	0,038	$= e^{(-0,207 \times t^{0,565})}$
	Algodón s.i	0,052 ^a ±	1,102±	$MR_{T2} = e^{(-k2 \times t^{n2})}$
		0,008	0,070	$= e^{(-0,052 \times t^{1,102})}$
	Polipropileno	0,071 ^a ±	0,826±	$MR_{T3} = e^{(-k3 \times t^{n3})}$
		0,011	0,073	$= e^{(-0,071 \times t^{0,826})}$
	Fique i.v	0,079 ^a ±	0,702±	$MR_{T4} = e^{(-k4 \times t^{n4})}$
		0,009	0,054	$= e^{(-0,079 \times t^{0,702})}$
	Algodón i.v	0,084 ^a ±	0,904±	$MR_{T5} = e^{(-k5 \times t^{n5})}$
		0,011	0,062	$= e^{(-0,084 \times t^{0,904})}$

* Valores promedio (n=3) ± desviación estándar. Letras no comunes entre columnas indican diferencias estadísticamente significativas entre medias, según prueba de LSD de Fisher a un 95% de confianza.

Fuente: Este estudio.

En la tabla 5.19 se observa los valores de la constante k de cada fibra, un valor de la constante $n > 1$ indica que k aumenta con el tiempo; cuando $n < 1$, k disminuye con el tiempo y si n toma valores aproximados a 1, k se considera constante con el tiempo (Revelo *et al.*, 2019).

Al comparar la constante k de fique sin impregnar y fique impregnado, se observaron diferencias estadísticamente significativas, siendo la constante k de resistencia de fique sin impregnar mayor, es decir, el fique sin impregnar pierde resistencia más rápido. Por otra parte, al comparar la constante k de algodón sin impregnar e impregnado, se observó que no presentaron diferencias estadísticamente significativas, además, la constante k de algodón impregnado es mayor, no obstante, la constante n es mayor a 1 para algodón sin impregnar ($n=1.102$), es decir, la constante k aumenta en el tiempo, al contrario, la constante n es menor a 1 ($n=0.904$) para algodón impregnado, es decir, la constante k disminuye en el tiempo. Las constantes k de algodón sin

impregnar, polipropileno, fique impregnado y algodón impregnado no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre medias.

La pérdida de resistencia en fique sin impregnar puede atribuirse a su débil estructura que sumado a las fuertes lluvias permitieron que el agua ingrese a la pared celular (Kicińska-Jakubowska *et al.*, 2012), en consecuencia, sus microfibrillas se desprenden y las sustancias amorfas encargadas de aglutinar la celulosa se degradan, por consiguiente, las superficies de contacto de la celulosa con el agua aumentan, perdiendo resistencia (Muñoz-Velez *et al.*, 2014; Saravanakumar *et al.*, 2013).

ahora bien, la menor velocidad de pérdida de resistencia del fique impregnado en comparación al fique sin impregnar, es debido al efecto de compactación producido por el líquido de impregnación y la ocupación del mismo dentro de los poros de la fibra (Chiralt *et al.*, 2001), de igual manera (Enríquez *et al.*, 2012) reporta que la pectina de alto metoxilo forma excelentes películas, sumado que al mezclarse con el plastificante produce reducción de los puentes de hidrógeno reduciendo fuerzas intermoleculares en las cadenas de los polímeros, mejorando su resistencia a la tracción.

En el caso del algodón sin impregnar e impregnado, se debe a que su composición es 95.86% de celulosa, quien a su vez presenta mayor grado de polimerización y cristalinidad que la celulosa presente en el fique, además, el sistema de hilado y los enlaces de hidrógeno de los grupos hidroxilo de áreas cristalinas de las cadenas de celulosa dentro de éstas fibras permiten mantener compacta su estructura (Blas-Sevillano *et al.*, 2018; De Silva y Byrne, 2017). Por otro lado, el alto contenido de celulosas define las paredes celulares primarias, secundarias y terciarias que permiten que la fibra de algodón sin impregnar e impregnada presente mayor resistencia a la tracción en el tiempo, además, el lumen hace que esta fibra posea mayor área para soportar el esfuerzo al concentrar una mayor cantidad de microfibrillas de celulosa (Dochia *et al.*, 2012). También, se resalta que la fibra de algodón combina resistencia mecánica con una alta capacidad de absorción de agua aproximadamente el 71% (Dochia *et al.*, 2012; Lozano, 2016; Revelo *et al.*, 2019). De igual manera, la fibra de polipropileno es altamente resistente debido a que posee una estructura semicristalina (Jmal *et al.*, 2018).

Se resalta que, la constante de velocidad de pérdida de resistencia a la tracción de fibra de fique es mayor que a las demás fibras evaluadas, pero esta fibra soportó el ciclo de tutorado hasta la cosecha al término de la última semana de estudio.

Ahora bien, la observación gráfica es uno de los primeros criterios para evaluar la calidad de ajuste de un modelo, en este se puede juzgar la forma en que los valores calculados del modelo se ajustan a los datos experimentales (cualitativamente) (Costa y Oliveira, 1999).

Por lo anterior, en la figura 5.40 se muestra la representación gráfica del modelo de Page ajustado a la cinética de pérdida de resistencia a la tracción para cada fibra evaluada, respectivamente. Se puede observar la tendencia de los datos de pérdida de propiedades mecánicas, experimentalmente y los obtenidos por el modelo de Page (y (MR), x (Tiempo)), representados por puntos y línea continua, respectivamente. En términos generales, se observa que los valores obtenidos por el modelo de Page se ajustan adecuadamente a los datos experimentales.

5.2.1.1 Calidad de ajuste del modelo de Page ajustado a la cinética de pérdida de resistencia a la tracción para cada fibra evaluada.

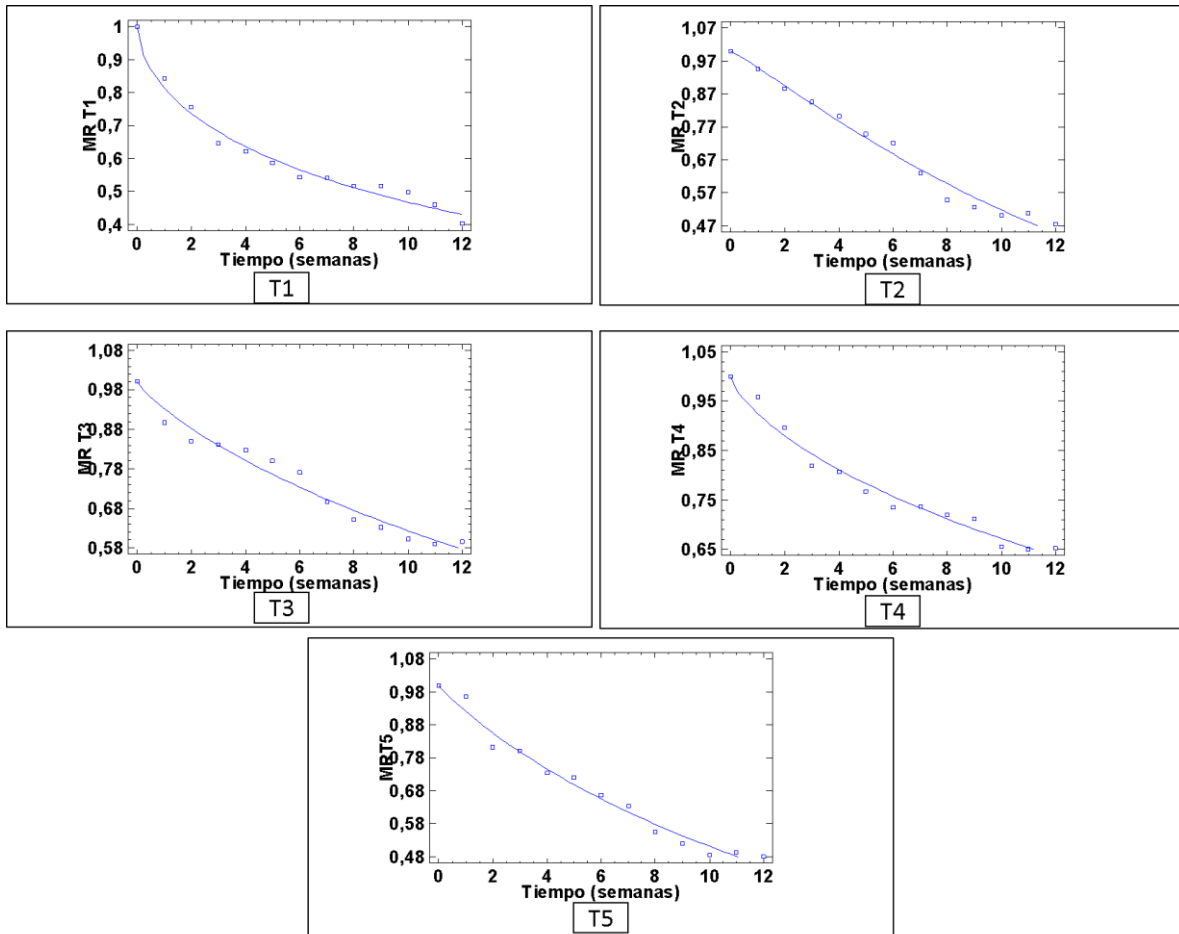


Figura 5.40. Modelo de Page ajustado a la cinética de pérdida de resistencia a la tracción para cada fibra evaluada.

Fuente: Este estudio.

Tabla 5.20

Parámetros estadísticos de ajuste del modelo de Page de la cinética de pérdida de resistencia a la tracción para cada fibra evaluada.

Fibra	R ²	R ² aj	SSE x 10 ⁻³	RMSE x 10 ⁻³
Fique s.i	98,279	98,122	5,763	2,106
Algodón s.i	98,282	98,126	6,920	1,487
Polipropileno	96,464	96,143	7,377	5,712
Fique i.v	97,566	97,344	3,819	5,659
Algodón i.v	98,018	97,838	7,443	6,668

Fuente: Este estudio.

En términos generales en la tabla 5.20 se puede observar que los parámetros estadísticos de ajuste del modelo de Page de la cinética de pérdida de resistencia a la tracción para cada fibra, presentó un buen ajuste. Se reportan rangos entre 96,464–98,282 para R^2 , 96,143-98,126 para R^2_{adj} , $3,819 \times 10^{-3}$ – $7,443 \times 10^{-3}$ para SSE; $1,487 \times 10^{-3}$ – $6,668 \times 10^{-3}$ para RMSE; teniendo en cuenta que se desea valores cercanos a 1 (>0.85) para los parámetros R^2 y R^2_{adj} ; y valores cercanos a 0 para los parámetros SSE y RMSE. Estos resultados indican que el modelo de Page describe de manera adecuada la cinética de pérdida de resistencia a la tracción para cada fibra evaluada, presentando un buen ajuste de los datos calculados con los datos experimentales.

5.2.2 Parámetros cinéticos del modelo de Page para elongación total a fuerza máxima para cada fibra evaluada.

En la figura 5.41 se observa la tendencia de la elongación total a fuerza máxima a disminuir en las semanas de experimentación. El fique sin impregnar e impregnado son los de mayor pérdida de elongación (53.97% y 33.7%). La pérdida de elongación es del 26.02% y 30.3% para algodón sin impregnar e impregnado, respectivamente. La pérdida de elongación del polipropileno es menor en comparación a las demás fibras (21.6%), lo que puede atribuirse a su inalterabilidad a agentes atmosféricos y baja absorción de humedad, tal como lo reporta (Muñoz-Velez *et al.*, 2014).

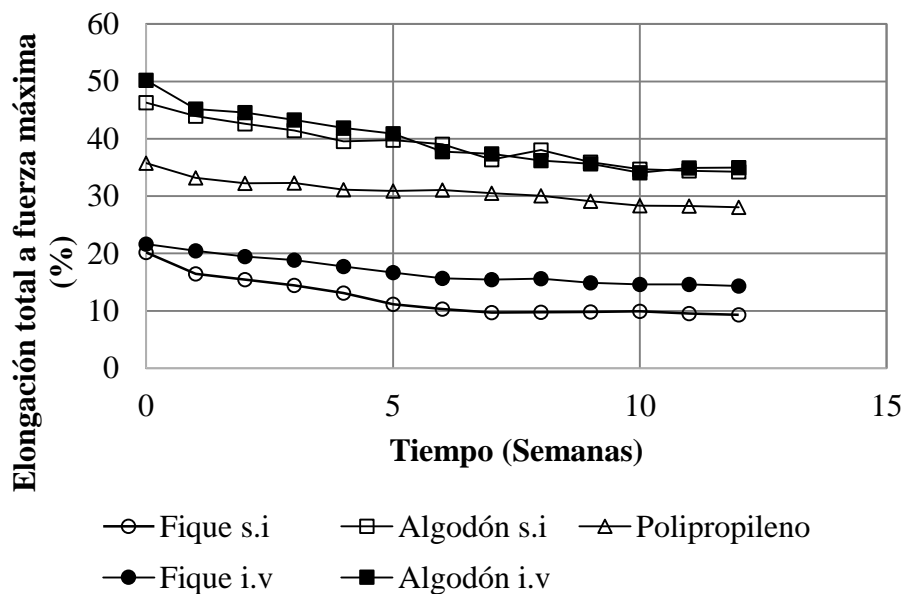


Figura 5.41. Modelado de la cinética de pérdida de elongación total a fuerza máxima de las diferentes fibras evaluadas.

Fuente: Este estudio.

En la tabla 5.21 al comparar la constante k de fique sin impregnar e impregnado, se observó diferencias estadísticamente significativas, siendo la constante k de elongación del fique sin

impregnar mayor al fique impregnado, es decir, el fique sin impregnar pierde elongación más rápido. Por otra parte, al comparar el algodón sin impregnar e impregnado, se observó que no presentaron diferencias estadísticamente significativas, la constante n es menor a 1 para estas fibras, es decir, la constante k disminuye en el tiempo. Las constantes k de algodón sin impregnar e impregnado, polipropileno y fique impregnado no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre medias.

La pérdida de elongación según (Rodríguez *et al.*, 2014) puede estar atribuida a la absorción de agua, que penetra capilares y poros difundándose dentro de las regiones amorfas, reduciendo la elongación; entonces, la mayor pérdida de elongación del fique sin impregnar podría atribuirse a que los espacios porosos al estar vacíos están libres para absorber agua. De igual manera, el fique tiene un contenido de hemicelulosa del 12.44%, que a su vez es la responsable de la absorción de humedad afectando la elongación (Córdoba *et al.*, 2010; Rong *et al.*, 2001).

Ahora bien, la estructura del algodón (sin impregnar) es diferente, donde el hilado que presenta podría contribuir a su menor pérdida de elongación (Blas-Sevillano *et al.*, 2018), además, esta fibra presentó bajos contenidos de hemicelulosa (1.15%), que podría representar su menor pérdida de elongación.

Mientras que, el fique y algodón impregnados tienen los espacios porosos ocupados parcialmente por el líquido de impregnación por acción capilar y gradientes de presión impuestas en el sistema (Betoret *et al.*, 2011), permitiendo a estas fibras que estructuralmente se mantengan uniformes y compactas, corrigiendo defectos propios de las fibras vegetales en organización estructural que facilitan la entrada de humedad (Hughes, 2012).

Tabla 5.21

Parámetros cinéticos del modelo de Page para elongación total a fuerza máxima para cada fibra evaluada.

Parámetro	Fibra	k*		Ecuación modelo de Page
		(semana s ⁻¹)	n*	
Elongación total a fuerza máxima	Fique s.i	0,208 ^b ± 0,024	0,567 ± 0,057	$MR_{T1} = e^{(-k1 \times t^{n1})}$ $= e^{(-0,208 \times t^{0,567})}$
	Algodón s.i	0,049 ^a ± 0,006	0,740 ± 0,058	$MR_{T2} = e^{(-k2 \times t^{n2})}$ $= e^{(-0,049 \times t^{0,740})}$
	Polipropileno	0,060 ^a ± 0,006	0,548 ± 0,048	$MR_{T3} = e^{(-k3 \times t^{n3})}$ $= e^{(-0,060 \times t^{0,548})}$
	Fique i.v	0,072 ^a ± 0,009	0,720 ± 0,059	$MR_{T4} = e^{(-k4 \times t^{n4})}$ $= e^{(-0,072 \times t^{0,720})}$
	Algodón i.v	0,082 ^{ab} ± 0,009	0,633 ± 0,051	$MR_{T5} = e^{(-k5 \times t^{n5})}$ $= e^{(-0,082 \times t^{0,633})}$

* Valores promedio (n=3) ± desviación estándar. Letras no comunes entre columnas indican diferencias estadísticamente significativas entre medias, según prueba de LSD de Fisher a un 95% de confianza.

Fuente: Este estudio.

En la figura 5.42 se muestra la representación gráfica del modelo de Page ajustado a la cinética de pérdida de elongación total a fuerza máxima para cada tratamiento en campo, respectivamente. Se puede observar la tendencia de los datos de pérdida de propiedades mecánicas, experimentalmente y los obtenidos por el modelo de Page (y (MR), x (Tiempo)), representados por puntos y línea continua, respectivamente. En términos generales, se observa que los valores obtenidos por el modelo de Page se ajustan adecuadamente a los datos experimentales.

5.2.2.1 Calidad de ajuste del modelo de Page ajustado a la cinética de pérdida de elongación total a fuerza máxima para cada fibra evaluada.

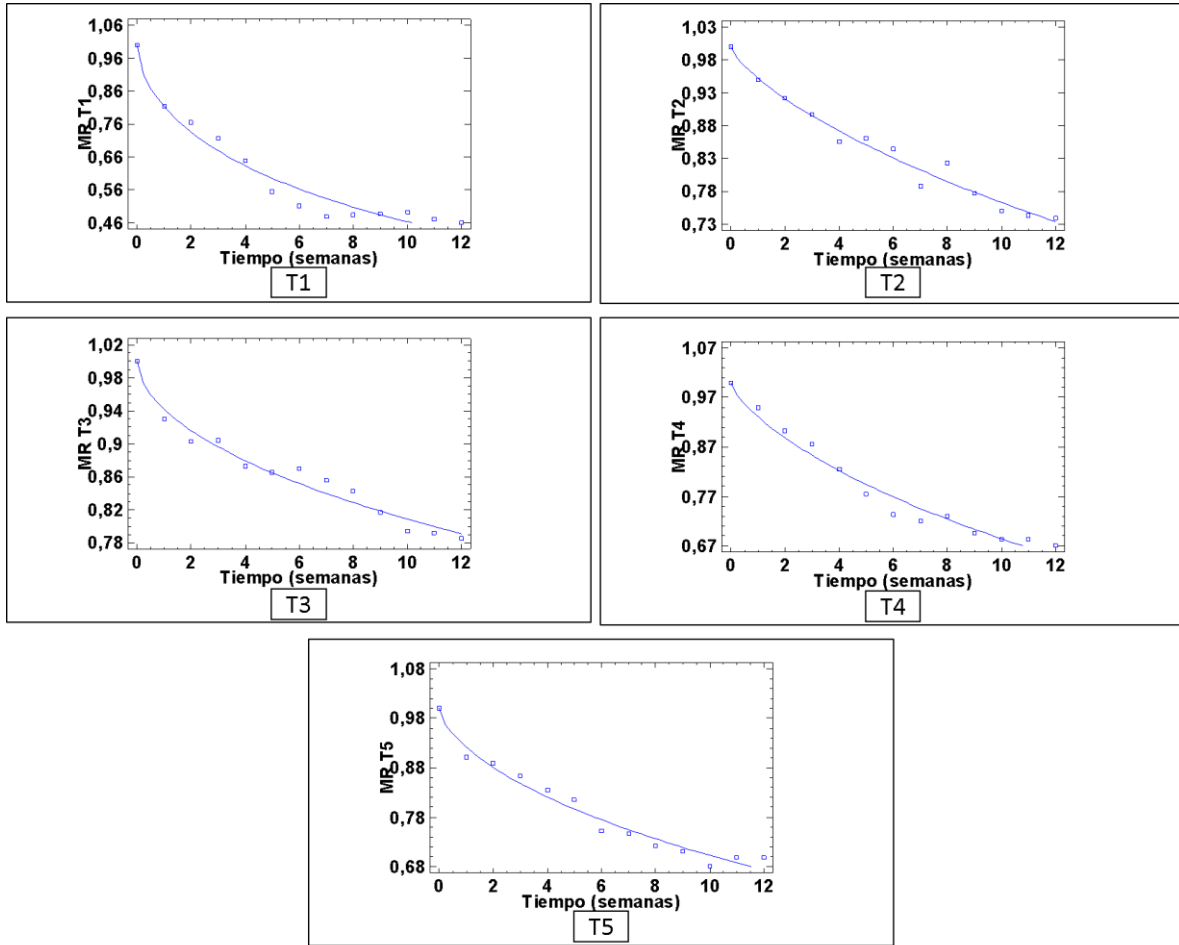


Figura 5.42. Modelo de Page ajustado a la cinética de pérdida de elongación total a fuerza máxima para cada fibra evaluada.

Fuente: Este estudio.

Tabla 5.22

Parámetros estadísticos de ajuste del modelo de Page de la cinética de pérdida de elongación total a fuerza máxima para cada fibra evaluada.

Fibra	R ²	R ² aj	SSE x 10 ⁻³	RMSE x 10 ⁻³
Fique s.i	96,170	95,822	1,329	3,197
Algodón s.i	97,343	97,101	2,200	8,387
Polipropileno	96,751	96,456	1,466	2,546
Fique i.v	97,134	96,874	4,255	5,974
Algodón i.v	97,207	96,953	3,274	4,422

Fuente: Este estudio.

En términos generales en la tabla 5.22 se puede observar que los parámetros estadísticos de ajuste del modelo de Page de la cinética de pérdida de elongación total a fuerza máxima para cada fibra, presentó un buen ajuste. Se reportan rangos entre 96,170–97,343 para R^2 , 95,822–97,101 para R^2_{adj} , $1,329 \times 10^{-3}$ – $4,255 \times 10^{-3}$ para SSE; $2,546 \times 10^{-3}$ – $8,387 \times 10^{-3}$ para RMSE; teniendo en cuenta que se desea valores cercanos a 1 (>0.85) para los parámetros R^2 y R^2_{adj} ; y valores cercanos a 0 para los parámetros SSE y RMSE. Estos resultados indican que el modelo de Page describe de manera adecuada la cinética de pérdida de elongación total a fuerza máxima para cada fibra evaluada, presentando un buen ajuste de los datos calculados con los datos experimentales.

5.2.3 Parámetros cinéticos del modelo de Page para módulo de Young para cada fibra evaluada.

En la figura 5.43 se observa la tendencia del módulo de Young a disminuir en las semanas de experimentación. Se resalta la diferencia inversamente proporcional entre el módulo de Young y la elongación, por lo tanto, valores más bajos de módulo de Young implican valores más altos de elongación, debido a que las fibras vegetales con mayor contenido de lignina son rígidas (mayor módulo de Young) pero con menor elongación. El fique y algodón impregnados tienen la menor pérdida de módulo de Young, 12.3% y 21.5% respectivamente, mientras que, la mayor pérdida de módulo de Young se presenta en algodón sin impregnar, polipropileno y fique sin impregnar (35.7%, 29.1% y 26.3% respectivamente).

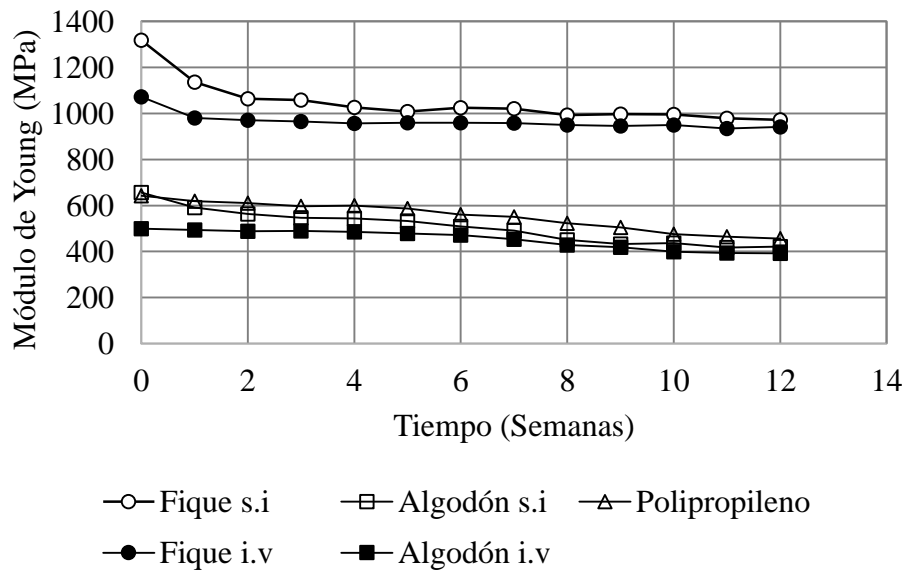


Figura 5.43. Modelado de la cinética de pérdida de módulo de Young para las diferentes fibras evaluadas. Fuente: Este estudio.

En la tabla 5.23 al comparar las constante k de fique sin impregnar e impregnado, se observaron diferencias estadísticamente significativas, siendo la constante k de módulo de Young de fique sin impregnar mayor, es decir, el fique sin impregnar pierde módulo de Young más rápido. Por otra parte, al comparar las constante k de fibra de algodón sin impregnar e impregnada, se observaron diferencias estadísticamente significativas, donde el algodón sin impregnar pierde módulo de Young más rápido.

Se observa que la pérdida de módulo de Young del polipropileno ($k=0.013$ semanas⁻¹; $n=1.327$) no presentó diferencias estadísticamente significativas con el algodón impregnado ($K=0.004$ semanas⁻¹; $n=1.727$).

Por otro lado, la lignina responsable de otorgar rigidez a la pared celular de fibras vegetales se degrada por los rayos UV (Córdoba *et al.*, 2010; Rong *et al.*, 2001), además, estructuralmente se produce ruptura de fibras exteriores y desprendimiento longitudinal sin ruptura de microfibrillas (Bessadok *et al.*, 2008; Contreras *et al.*, 2009), por tal razón, el fique sin impregnar pierde mayor módulo de Young. Mientras que, el fique impregnado permanecerá más compacto por inclusión del líquido de impregnación en los espacios porosos (Betoret *et al.*, 2011), corrigiendo defectos estructurales.

Por otro lado, el hilado le permite al algodón (sin impregnar) conservar esta propiedad en el tiempo; en el algodón impregnado puede atribuirse igual comportamiento, además de la inclusión del líquido de impregnación en los espacios porosos (Blas-Sevillano *et al.*, 2018; De Silva y Byrne, 2017).

Tabla 5.23*Parámetros cinéticos del modelo de Page para módulo de Young para cada fibra evaluada.*

Parámetro	Fibra	k* (semanas ⁻¹)	n*	Ecuación modelo de Page
Módulo de Young	Fique s.i	0,171 ^c ± 0,008	0,232 ± 0,023	$MR_{T1} = e^{(-k1 \times t^{n1})} = e^{(-0,171 \times t^{0,232})}$
	Algodón s.i	0,080 ^b ± 0,009	0,703 ± 0,059	$MR_{T2} = e^{(-k2 \times t^{n2})} = e^{(-0,080 \times t^{0,703})}$
	Polipropileno	0,013 ^a ± 0,003	1,327 ± 0,090	$MR_{T3} = e^{(-k3 \times t^{n3})} = e^{(-0,013 \times t^{1,327})}$
	Fique i.v	0,088 ^b ± 0,003	0,152 ± 0,017	$MR_{T4} = e^{(-k4 \times t^{n4})} = e^{(-0,088 \times t^{0,152})}$
	Algodón i.v	0,004 ^a ± 0,001	1,727 ± 0,148	$MR_{T5} = e^{(-k5 \times t^{n5})} = e^{(-0,004 \times t^{1,727})}$

* Valores promedio (n=3) ± desviación estándar. Letras no comunes entre columnas indican diferencias estadísticamente significativas entre medias, según prueba de LSD de Fisher a un 95% de confianza.

Fuente: Este estudio.

En la figura 5.44 se muestra la representación gráfica del modelo de Page ajustado a la cinética de pérdida de módulo de Young para cada tratamiento en campo, respectivamente. Se puede observar la tendencia de los datos de pérdida de propiedades mecánicas, experimentalmente y los obtenidos por el modelo de Page (y (MR), x (Tiempo)), representados por puntos y línea continua, respectivamente. En términos generales, se observa que los valores obtenidos por el modelo de Page se ajustan adecuadamente a los datos experimentales.

5.2.3.1 Calidad de ajuste del modelo de Page ajustado a la cinética de pérdida de módulo de Young para cada fibra evaluada.

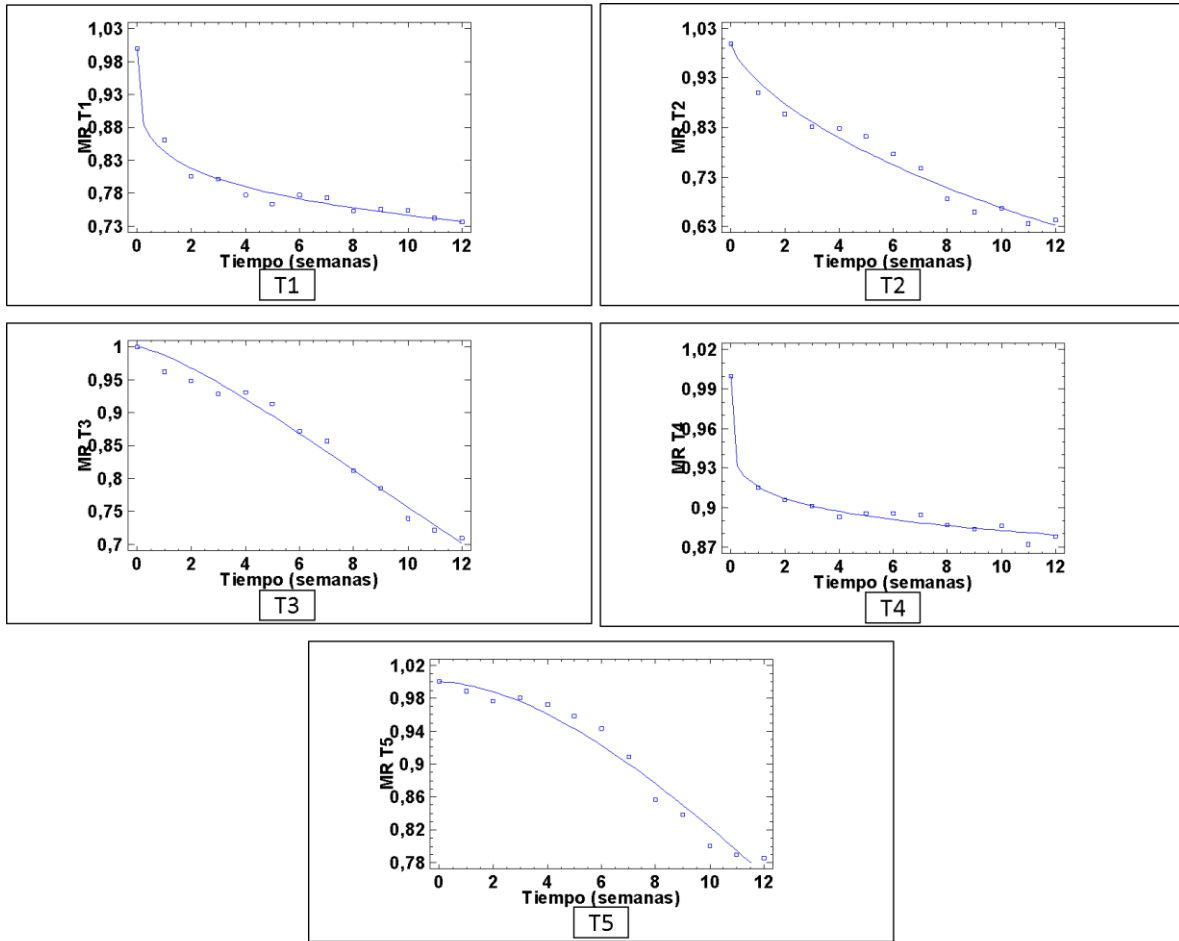


Figura 5.44. Modelo de Page ajustado a la cinética de pérdida de módulo de Young para cada fibra evaluada.

Fuente: Este estudio.

Tabla 5.24

Parámetros estadísticos de ajuste del modelo de Page de la cinética de pérdida de módulo de Young para cada fibra evaluada.

Fibra	R ²	R ² aj	SSE x 10 ⁻³	RMSE x 10 ⁻³
Fique s.i	98,189	98,025	1,079	9,110
Algodón s.i	96,879	96,595	4,720	1,228
Polipropileno	97,916	97,726	2,390	3,251
Fique i.v	98,596	98,468	0,172	1,200
Algodón i.v	96,875	96,591	2,525	3,884

Fuente: Este estudio.

En términos generales en la tabla 5.24 se puede observar que los parámetros estadísticos de ajuste del modelo de Page de la cinética de pérdida de módulo de Young para cada fibra, presentó un buen ajuste. Se reportan rangos entre 96,875–98,596 para R^2 , 96,591-98,468 para R^2_{adj} , $0,172 \times 10^{-3}$ – $4,720 \times 10^{-3}$ para SSE; $1,200 \times 10^{-3}$ - $9,110 \times 10^{-3}$ para RMSE; teniendo en cuenta que se desea valores cercanos a 1 (>0.85) para los parámetros R^2 y R^2_{adj} ; y valores cercanos a 0 para los parámetros SSE y RMSE. Estos resultados indican que el modelo de Page describe de manera adecuada la cinética de pérdida de elongación total a fuerza máxima para cada fibra evaluada, presentando un buen ajuste de los datos calculados con los datos experimentales.

5.2.2 Cambios superficiales de la estructura de fibras vegetales

Al material experimental descrito en el numeral 4.21 (fique sin impregnar (T1), algodón sin impregnar (T2), polipropileno (T3), fique impregnado (T4), algodón impregnado (T5)) se le realizó durante las 13 semanas de las pruebas de campo un seguimiento por estereomicroscopia, para determinar superficialmente los cambios estructurales, en consecuencia, la pérdida de calidad de sus propiedades mecánicas. En la figura 5.45 se puede observar el seguimiento a tiempo cero de las fibras estudiadas, en general se puede observar que las microfibrillas de las fibras de fibra de fique y algodón impregnadas se encuentran recubiertas en su totalidad por la emulsión de impregnación, dándole una apariencia uniforme, mientras que, las fibras de fique y algodón sin impregnar es observable sus microfibrillas y heterogeneidades.

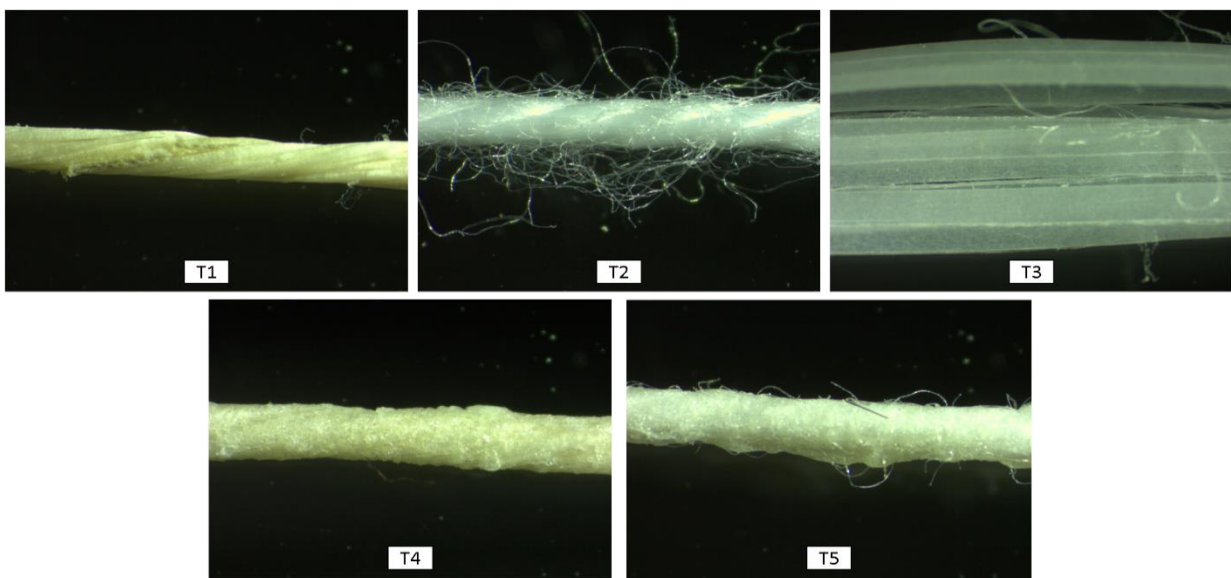


Figura 5.45. Estudio de superficie de los diferentes tratamientos a la semana cero; T1: fique sin impregnar, T2: algodón sin impregnar, T3: polipropileno, T4: fique impregnado T5: algodón impregnado.

Fuente: Este estudio.

5.2.2.1 Estudio superficial de pérdida de propiedades mecánicas de fibra de fique sin impregnar.

En la figura 5.46 se observa que la fibra de fique sin impregnar se abre en el transcurso del tutorado, haciendo visibles sus microfibrillas de menor diámetro, de igual manera, se observan desprendimientos a lo largo del eje axial a diferentes longitudes y ruptura de fibras exteriores, provocando la pérdida de sus propiedades mecánicas, sin llegar a la ruptura total. (Bessadok *et al.*, 2008; Contreras *et al.*, 2009).

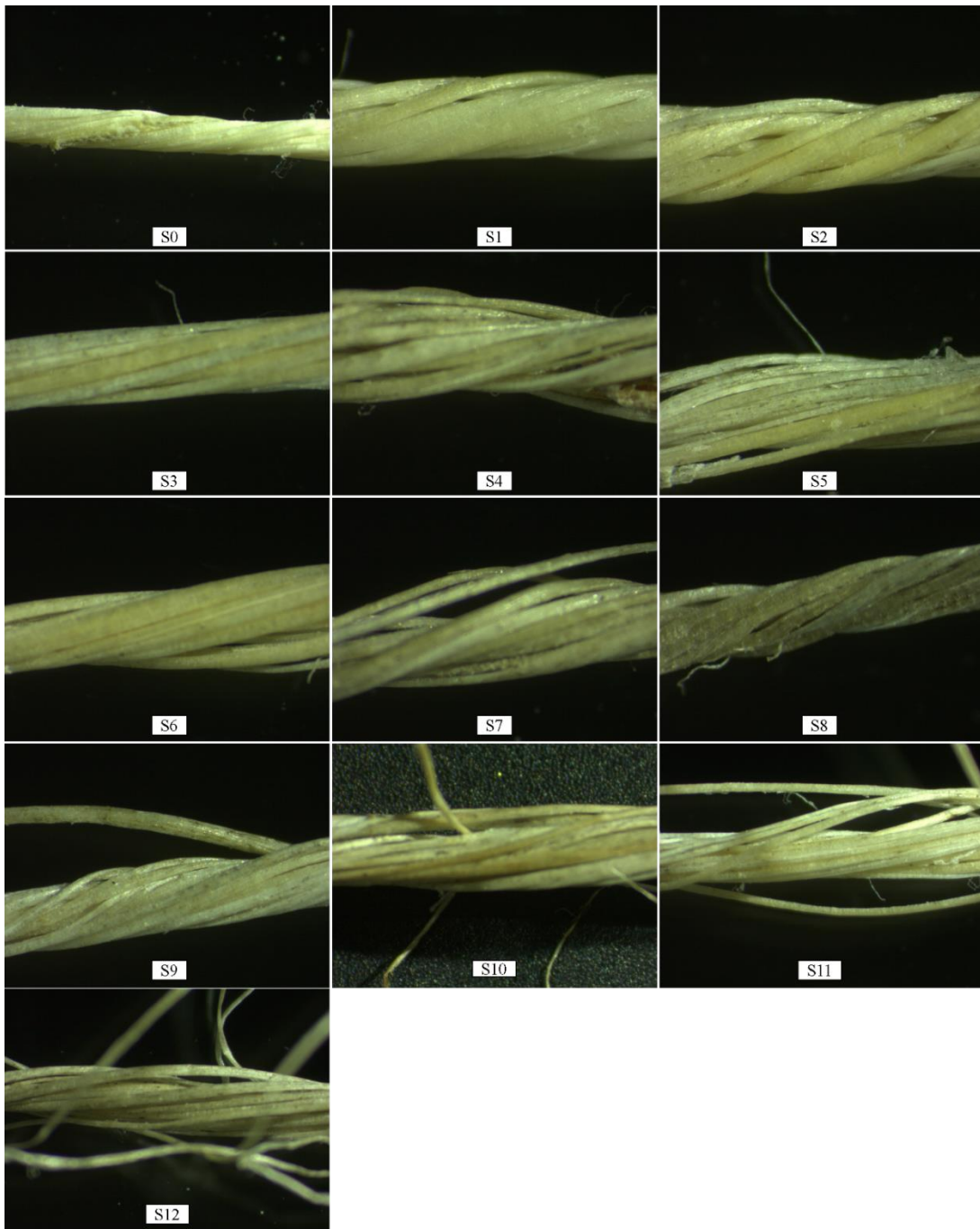


Figura 5.46. Estudio superficial de fibra de fique sin impregnar desde la semana cero (S0) hasta la semana doce (S12) en condiciones de cultivo.

Fuente: Este estudio.

5.2.2.2 Estudio superficial de pérdida de propiedades mecánicas de fibra de algodón sin impregnar.

En la figura 5.47 se observa que la fibra de algodón sin impregnar se mantiene compacta en el transcurso del tutorado, manteniendo su estructura con alteraciones mínimas lo cual se ve reflejado en sus propiedades mecánicas (Lozano, 2016), ésta fibra compuesta casi en su totalidad de celulosa que presenta un grado cristalinidad aumenta la resistencia y durabilidad del algodón(De Silva y Byrne, 2017).

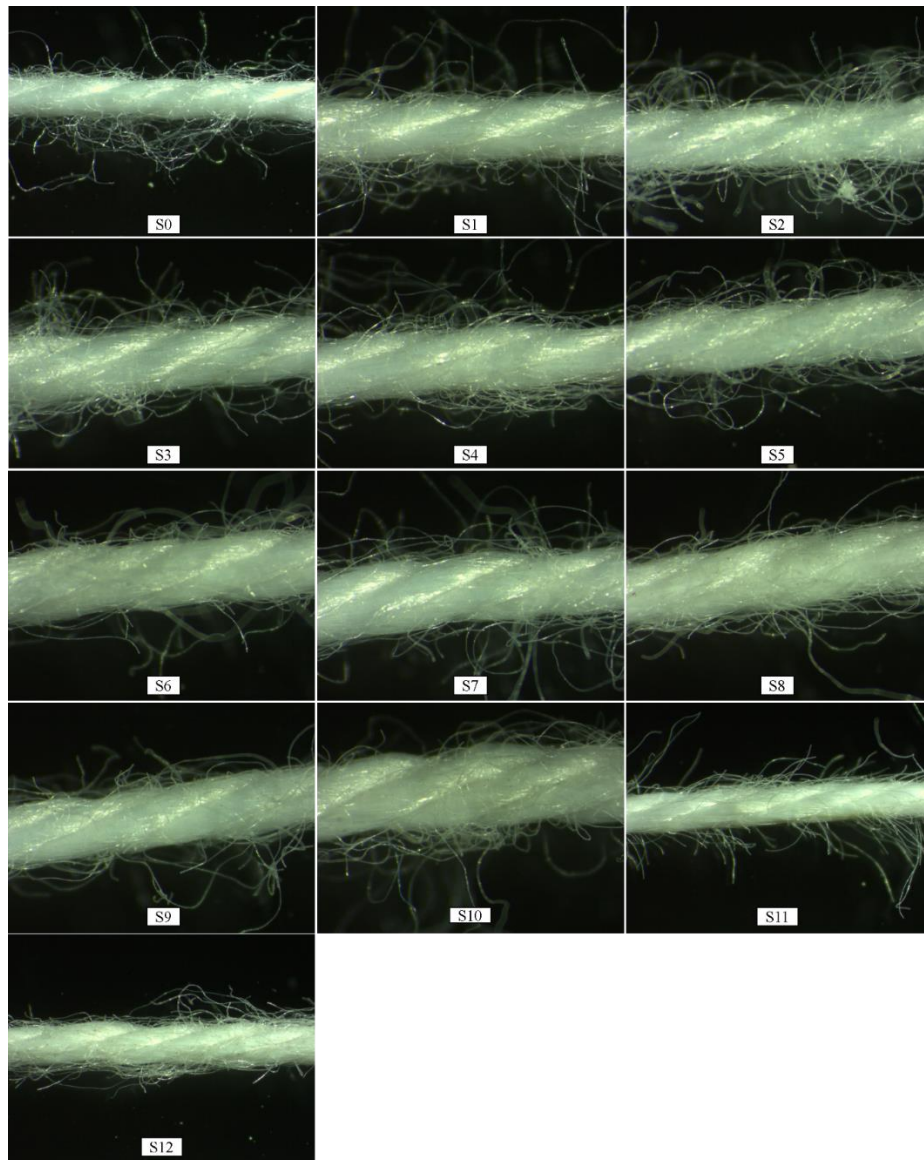


Figura 5.47. Estudio superficial de fibra de algodón sin impregnar desde la semana cero (S0) hasta la semana doce (S12) en condiciones de cultivo.

Fuente: Este estudio.

5.2.2.3 Estudio superficial de pérdida de propiedades mecánicas de fibra de polipropileno.

En la figura 5.48 se observa que la fibra de polipropileno se mantiene compacta en el transcurso del tutorado, manteniendo su estructura con alteraciones mínimas lo cual se ve reflejado en sus propiedades mecánicas (Lozano, 2016), De igual forma, la fibra de polipropileno es altamente resistente debido a que posee una estructura semicristalina, con un grado de cristalinidad, esto teniendo en cuenta que la cristalinidad influye en la resistencia mecánica (Jmal *et al.*, 2018).

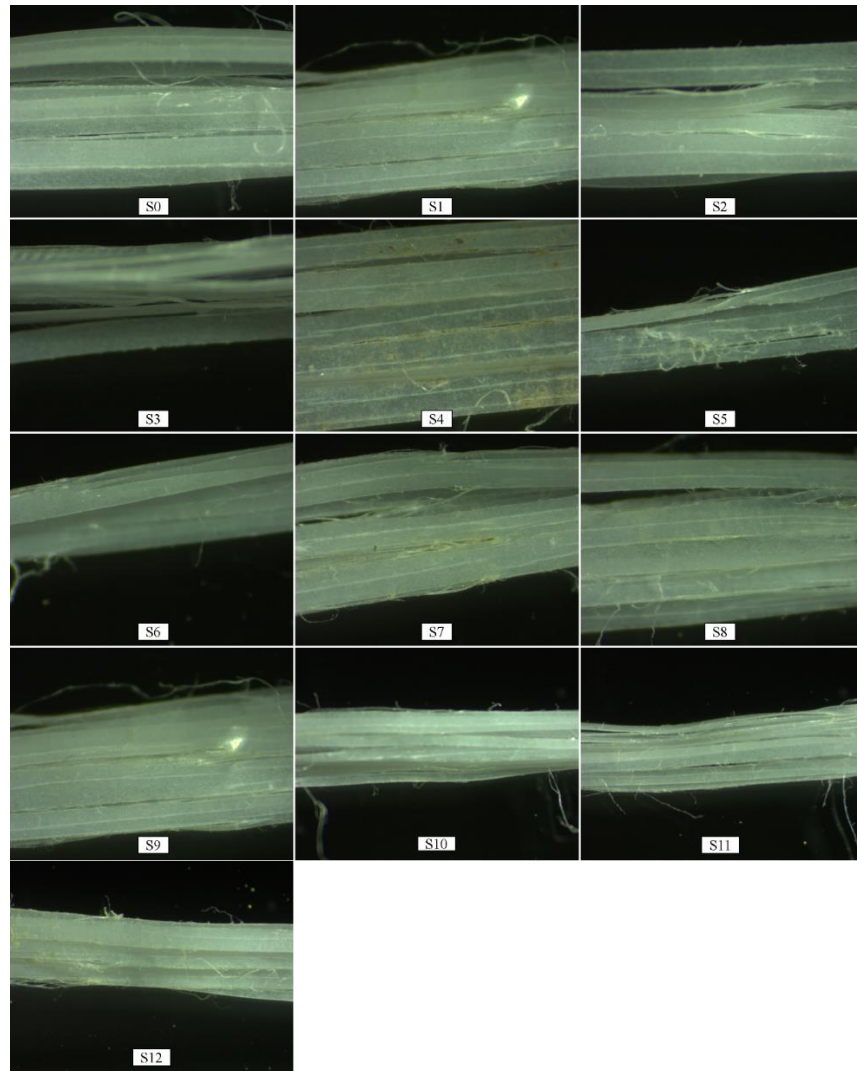


Figura 5.48. Estudio superficial de fibra de polipropileno delgado desde la semana cero (S0) hasta la semana doce (S12) en condiciones de cultivo.

Fuente: Este estudio.

5.2.2.4 Estudio superficial de pérdida de propiedades mecánicas de fibra de fique impregnada a vacío.

En la figura 5.49 se observa que la fibra de fique impregnada se mantiene compacta en el transcurso del tutorado, manteniendo su estructura con alteraciones mínimas, debido a que al impregnarle la emulsión de impregnación esta actúa como elemento resistente; ya que, la impregnación aprovecha la microestructura porosa de la fibra, para reemplazar el gas ocluido en su estructura celular por solutos contenidos en la emulsión de impregnación mediante acción capilar y gradientes de presión impuestas en el sistema (Fito, *et al.*, 1996; Laurindo *et al.*, 2007), permitiendo la incorporación de componentes mejoradores de propiedades mecánicas (Fito *et al.*, 2001). Por esta razón, le proporcionan rigidez y resistencia a la fibra.

Se puede observar que hasta la semana 3, el recubrimiento esta alrededor de la fibra impregnada, posteriormente, la emulsión de impregnación comienza a ser retirada en el tiempo por efecto de las condiciones ambientales, no obstante, el tratamiento de impregnación a vacío permite a nivel estructural interno que se mantenga uniforme y compacta, corrigiendo defectos propios de las fibras de fique en organización estructural que facilitan la entrada de humedad (Hughes, 2012).

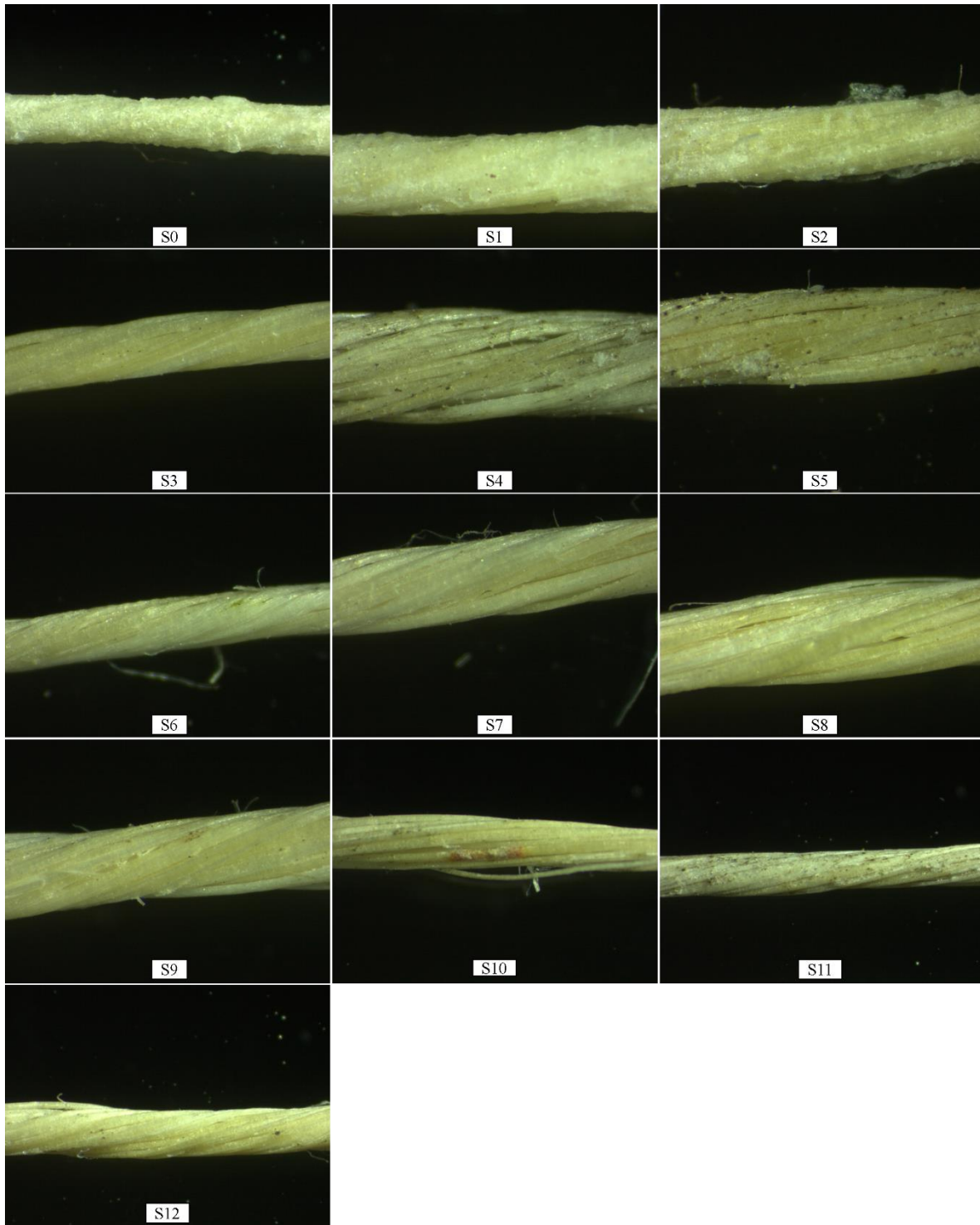


Figura 5.49. Estudio superficial de fibra de fique impregnada a vacío desde la semana cero (S0) hasta la semana doce (S12) en condiciones de cultivo.

Fuente: Este estudio.

5.2.2.5 Estudio superficial de pérdida de propiedades mecánicas de fibra de algodón impregnada a vacío.

En la figura 5.50 se observa que la fibra de algodón impregnada se mantiene compacta en el transcurso del tutorado, manteniendo su estructura con alteraciones mínimas lo cual se ve reflejado en sus propiedades mecánicas.

Se puede observar que hasta la semana 4, el recubrimiento esta alrededor de la fibra impregnada, posteriormente, la emulsión de impregnación comienza a ser retirada en el tiempo por efecto de las condiciones ambientales, no obstante, el tratamiento de impregnación permite a nivel estructural que se mantenga uniforme. Además, de la compleja estructura de la fibra de algodón (Dochia *et al.*, 2012)

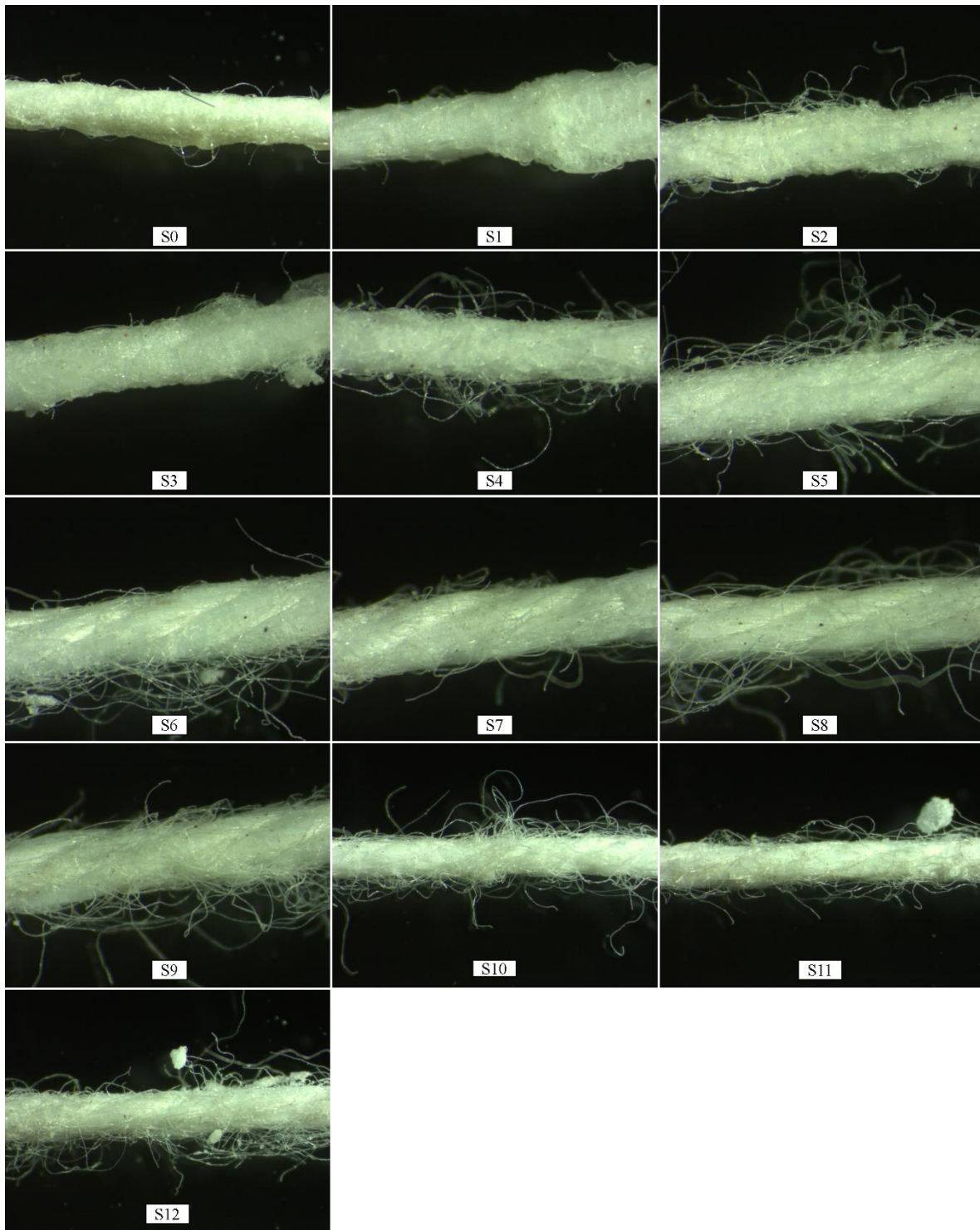


Figura 5.50. Estudio superficial de fibra de algodón impregnada a vacío desde la semana cero (S0) hasta la semana doce (S12) en condiciones de cultivo.

Fuente: Este estudio.

6. CONCLUSIONES

Las condiciones óptimas de impregnación a vacío con la inclusión del recubrimiento biopolimérico permitieron recubrir de manera efectiva las fibras de fique y algodón, permitiendo mejorar falencias en sus propiedades mecánicas.

La pérdida de calidad mecánica del fique impregnado a vacío fue menor en comparación al fique sin impregnar en resistencia a la tracción, elongación total a fuerza máxima y módulo de Young.

La pérdida de calidad mecánica del algodón impregnado a vacío fue menor en comparación al algodón sin impregnar en módulo de Young,

Las fibras de fique y algodón impregnadas a vacío son estadísticamente comparables en cuanto a propiedades mecánicas con la fibra de polipropileno, por lo tanto, estas fibras vegetales impregnadas son una alternativa técnicamente viable para sustituir parcialmente el uso convencional de fibra de polipropileno en las labores agrícolas del tutorado de arveja (*Pisum sativum* L.).

7. RECOMENDACIONES

Aunque el estudio determinó el potencial de fibras vegetales sin impregnar e impregnadas en las labores del tutorado agrícola, se recomienda realizar un estudio de factibilidad para evaluar la rentabilidad de su implementación, teniendo en cuenta no solo los costos, sino también el aporte ambiental.

Complementar el estudio, realizando tratamientos preliminares superficiales a las fibras vegetales que permitan un mejor acoplamiento de la emulsión de impregnación a las fibras de fique y algodón.

De igual manera, se recomienda evaluar otras técnicas de incorporación de compuestos en fibras de fique y algodón, que permitan mejorar los resultados obtenidos en la presente investigación.

Complementar el estudio acerca de la emulsión de impregnación, que permita mejorar los resultados obtenidos en términos de resistencia mecánica y biodegradabilidad.

Profundizar en el tema, realizando un estudio de biodegradabilidad de las fibras vegetales impregnadas a vacío.

Si bien el modelo empírico utilizado se ajustó adecuadamente a los datos experimentales obtenidos para el modelado de la cinética de pérdida de propiedades mecánicas, se recomienda profundizar comparando con otros modelos matemáticos, además, de modelamientos matemáticos en absorción de humedad y biodegradabilidad.

8. REFERENCIAS

- Alvarez, L. A., Benitez, R., Michel, B., Prudent, P., Mangano, V., Centurion, C. J. (2004). Cultivo del algodón.
- Alves, V. D., Mali, S., Beléia, A., y Grossmann, M. V. E. (2007). Effect of glycerol and amylose enrichment on cassava starch film properties. *Journal of Food Engineering*, 78(3), 941–946.
- Alzamora, S. M., Salvatori, D., Tapia, M. S., López-Malo, A., Welti-Chanes, J., y Fito, P. (2005). Novel functional foods from vegetable matrices impregnated with biologically active compounds. *Journal of Food Engineering*, 67(1–2), 205–214.
- American Society for Testing and Materials. (2007). ASTM D3822-07 standard test method for tensile properties of single textile fibers.
- Anino, S. V, Salvatori, D. M., & Alzamora, S. M. (2006). Changes in calcium level and mechanical properties of apple tissue due to impregnation with calcium salts. *Food Research International*, 39(2), 154–164.
- Arévalo Vela, C., y Ortega Alvizuri, V. (1995). Uso de tutores en el cultivo de arveja.
- Baley, C. (2002). Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(7), 939–948.
- Banga, J. R., Balsa-Canto, E., Moles, C. G., y Alonso, A. A. (2003). Improving food processing using modern optimization methods. *Trends in Food Science & Technology*, 14(4), 131–144.
- Banga, J. R., & Singh, R. P. (1994). Optimization of air drying of foods. *Journal of Food Engineering*, 23(2), 189–211.
- Banjongsinsiri, P., Shields, J., y Wicker, L. (2004). Vacuum Infusion of Plant or Fungal Pectinmethylesterase and Calcium Affects the Texture and Structure of Eggplant. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(26), 8214–8223. <http://doi.org/10.1021/JF0487405>
- Barat, J. M., Chiralt, A., y Fito, P. (2001). Effect of osmotic solution concentration, temperature and vacuum impregnation pretreatment on osmotic dehydration kinetics of apple slices. *Food Science and Technology International*, 7(5), 451–456.
- Barat, J. M., Martinez-Monzo, J., Alvarruiz, A., Chiralt, A., y Fito, P. (1994). Changes in thermal properties due to vacuum impregnation. *Proceedings of the Poster Session, ISOPOW Practicum II*, 117–120.
- Bejarano Arana, N. (2014). *Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de un bioplástico elaborado con harina de yuca gelatinizada*. (Tesis doctoral). Facultad De Ingeniería, Programa de Ingeniería Agroindustrial, Universidad de San Buenaventura, Cali, Colombia.

- Bessadok, A., Marais, S., Roudesli, S., Lixon, C., y Métayer, M. (2008). Influence of chemical modifications on water-sorption and mechanical properties of Agave fibres. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(1), 29–45.
- Betalleluz Pallardel, I. M. (2016). *Estudio del enriquecimiento de manzana con prebióticos, probióticos y componentes antioxidantes provenientes de zumo de mandarina por impregnación a vacío para el desarrollo de aperitivos altamente funcionales y con bajo contenido calórico* (Tesis Doctoral). Universitat Politècnica de València. Valencia, España.
- Betoret, E., Betoret, N., Arilla, A., Bennár, M., Barrera, C., Codoñer, P., y Fito, P. (2012). No invasive methodology to produce a probiotic low humid apple snack with potential effect against *Helicobacter pylori*. *Journal of Food Engineering*, 110(2), 289–293.
- Betoret, E., Betoret, N., Vidal, D., y Fito, P. (2011). Functional foods development: Trends and technologies. *Trends in Food Science & Technology*, 22(9), 498–508.
- Betoret, N., Puente, L., Diaz, M. J., Pagan, M. J., Garcia, M. J., Gras, M. L., ... Fito, P. (2003). Development of probiotic-enriched dried fruits by vacuum impregnation. *Journal of Food Engineering*, 56(2–3), 273–277.
- Bledzki, A. K., y Gassan, J. (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science*, 24(2), 221–274.
- Bongarde, U. S., y Shinde, V. D. (2014). Review on natural fiber reinforcement polymer composites. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, 3(2), 431–436.
- Botero, A. (2008). Aplicación de la ingeniería de matrices en el desarrollo de uchuva (*Physalis peruviana* L.) mínimamente procesada fortificada con calcio y vitaminas C y E. *Medellin (Colombia): Universidad de Antioquia, Facultad de Química Farmacéutica Y Alimentos*.
- Cadefique. (2006). *Guía ambiental del subsector fiquero*. Recuperado de http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/6697/1/2007222154336_GuiaAmbientaFiguera2006.pdf
- Carda Navarro, C. (2016). Aplicación de la impregnación a vacío a la hidrólisis enzimática de residuos de industrialización de frutas y hortalizas. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10251/68696>.
- Castelló, M. L., Fito, P. J., y Chiralt, A. (2006). Effect of osmotic dehydration and vacuum impregnation on respiration rate of cut strawberries. *LWT - Food Science and Technology*, 39(10), 1171–1179. <http://doi.org/10.1016/J.LWT.2005.07.001>
- Castro, C. (2007). 4. Determination of optimal alkaline treatment conditions for fiqué fiber bundles

as reinforcement of composites materials. *Revista Técnica de La Facultad de Ingeniería Universidad Del Zulia*, 30(2).

Castro Aguirre, A. (2011). Sistema de sostenimiento para la planta de granadilla.

Castro Rodriguez, M. M. (1995). *Evaluación de arveja voluble (Pisum sativum L.), en diferentes densidades y sistemas de siembra en la región de Simijaca (Cundinamarca)*. (Trabajo de grado). Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Centeno-Mora, O. (2016). Estimación de proteína en semolina de arroz, mediante aplicación de regresiones en el infrarrojo cercano. *Agronomía Mesoamericana*, 367–376.

Cerón, A., Latorre, L., Bucheli, M., Osorio, O., Mejia, D., y Garcés, L. (2015). Determinación de constantes de velocidad de rehidratación y cambios sobre algunas propiedades físicas en semillas de arveja (*Pisum sativum L.*). *Revista Lasallista de Investigación*, 12(1), 21–32.

Chafer, M., Gonzalez-Martinez, C., Fernandez, B., Perez, L., y Chiralt, A. (2003). Effect of blanching and vacuum pulse application on osmotic dehydration of pear. *Food Science and Technology International*, 9(5), 321–328.

Checa, O. (2014). *Investigación para el mejoramiento de la tecnología de producción de arveja arveja (Pisum sativum L.) en el departamento de Nariño*. Recuperado de https://www.ucc.edu.co/pasto/prensa/2014/Documents/11-Resumen_Proyecto_Mejoramiento_arveja.pdf

Chiralt, A., Fito, P., Andrés, A., Barat, J. M., Martinez-Monzó, J., Martinez-Navarrete, N., y others. (1999). Vacuum impregnation: a tool in minimally processing of foods. *Processing of Foods: Quality Optimization and Process Assessment*, 341–356.

Cho, D., Kim, H.-J., y Drzal, L. T. (2014). Surface treatment and characterization of natural fibers: effects on the properties of biocomposites. *Edited by Sabu Thomas, Kuruvilla Joseph, SK Malhotra*.

Confederación Colombiana del Algodón (Conalgodón) (2007). Resultados de la cosecha algodonera Costa-Llanos 2006/2007. Recuperado de *Url: Http://www. Conalgodon.com/portal/02_cos-Tosprod.*

Contreras, M. F., Hormaza, W. A., y Marañón, A. (2009). Fractografía de la fibra natural extraída del fique y de un material compuesto reforzado con tejido de fibra de fique y matriz resina poliéster. *Suplemento de La Revista Latinoamericana de Metalurgia Y Materiales*. S, 1, 57–67.

Córdoba, C., Mera, J., Martinez, D., y Rodriguez, J. (2010). Aprovechamiento de polipropileno y polietileno de alta densidad reciclados, reforzados con fibra vegetal, Tetera (Stromanthe Stromathoides). *Revista Iberoamericana de Polimeros*, 11(7), 417–427.

- Coreño-Alonso, J., & Méndez-Bautista, M. T. (2010). Relación estructura-propiedades de polímeros. *Educación Química*, 21(4), 291–299.
- Corrales, F. (2002). *Modificació de fibres de jute per lelaboració de plàstics reforçats reciclables*. (Tesis doctoral), Universitat de Girona, Girona, España.
- Costa, R. M., y Oliveira, F. A. R. (1999). Modelling the kinetics of water loss during potato frying with a compartmental dynamic model. *Journal of Food Engineering*, 41(3–4), 177–185.
- Cruz Hemida, D., y Medina Terán, R. (2008). Cadena Agroindustrial del Fique. Bogotá: *Cadefique*.
- Díaz, W., Cerón, A., Osorio, O., y Mejía, D. (2014). Efecto de la humedad en propiedades físicas de semillas de arveja (*Pisum sativum* L.). *Revista Facultad Nacional Agronomía Medellín*, 67(2), 579–581.
- Departamento Nacional de Estadística (Dane). (2015). *El cultivo de arveja en Colombia*. Recuperado de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuaria/sipsa/Bol_Insumos31_mar_2015.pdf
- De los Ríos, M. S. M., y García, M. M. (2001). La conservación de los tejidos. *Arbor*, 169(667–668), 677–690.
- De Silva, R., y Byrne, N. (2017). Utilization of cotton waste for regenerated cellulose fibres: Influence of degree of polymerization on mechanical properties. *Carbohydrate Polymers*, 174, 89–94.
- Degraeve, P., Saurel, R., y Coutel, Y. (2003). Vacuum Impregnation Pretreatment with Pectinmethylesterase to Improve Firmness of Pasteurized Fruits. *Journal of Food Science*, 68(2), 716–721. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2003.tb05738.x>
- Del Valle, J. M., Aránguiz, V., y León, H. (1998). Effects of blanching and calcium infiltration on PPO activity, texture, microstructure and kinetics of osmotic dehydration of apple tissue. *Food Research International*, 31(8), 557–569. [http://doi.org/10.1016/S0963-9969\(99\)00029-0](http://doi.org/10.1016/S0963-9969(99)00029-0)
- Delgado, E. (2018). *Aprovechamiento de los residuos agroindustriales del beneficio del fique* (Tesis de pregrado). Programa de ingeniería agroindustrial, Facultad de ingeniería agroindustrial, Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, Colombia.
- Delgado, O. C., y Barrios, V. (2012). Efectos de la condiciones de impregnación a vacío sobre la fracción volumétrica en el durazno (*Prunus Persica*) utilizando la metodología de superficie de respuesta. *SABER. Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente*, 24(2), 176–184.

- Dochia, M., Sirghie, C., Kozłowski, R. M., y Roskwitalski, Z. (2012). Cotton fibres. In *Handbook of natural fibres* (pp. 11–23), Elsevier.
- Echeverri, R. D. E., Montoya, L. M. F., y Velásquez, M. R. G. (2015). *Fique en Colombia*. Instituto Tecnológico Metropolitano. Recuperado de <https://fondoeditorial.itm.edu.co/libros-electronicos/Fique-en-colombia/detalle-libro.html>
- Edgar L. Linares, Gloria Galeano, Néstor García, y Yisela Figueroa. (2008). *Fibras vegetales utilizadas en artesanías en Colombia*. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá (330). Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Nestor_Garcia7/publication/279205047_Fibras_vegetales_usadas_en_artesantias_en_Colombia/links/55bbc30e08aec0e5f4419307/Fibras-vegetales-usadas-en-artesantias-en-Colombia.pdf
- Enríquez, M., Velasco, R., y Ortiz, V. (2012). Composition and processing of STARCH-based biodegradable films. *Biotechnología En El Sector Agropecuario Y Agroindustrial*, 10(1), 182–192.
- Espitia Camacho, M. M., Araméndiz Tatis, H., y Cadena Torres, J. (2008). Correlaciones y análisis de sendero en algodón (*Gossypium hirsutum L.*) en el Caribe colombiano. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín*, 61(1), 4325–4335.
- Federación nacional de cultivadores de cereales (Fenalce). (2010). El cultivo de la arveja, historia e importancia. Recuperado de http://www.academia.edu/11576151/importancia_de_los_cultivos_representados_por_fenalce
- Fiore, V., Scalici, T., y Valenza, A. (2014). Characterization of a new natural fiber from *Arundo donax L.* as potential reinforcement of polymer composites. *Carbohydrate Polymers*, 106, 77–83.
- Fischer, G., y Almanza, P. J. (1993). Nuevas tecnologías en el cultivo de la uchuva *Physalis peruviana L.* *Revista Agrodesarrollo*, 4(1–2), 294.
- Fito, P. (1994). Modelling of vacuum osmotic dehydration of food. In *Water in Foods* (pp. 313–328): Pergamon.
- Fito, P., Andrés, A., Chiralt, A., y Pardo, P. (1996). Coupling of hydrodynamic mechanism and deformation-relaxation phenomena during vacuum treatments in solid porous food-liquid systems. *Journal of Food Engineering*, 27(3), 229–240.
- Fito, P., y Chiralt, A. (1995). An update on vacuum osmotic dehydration. *Food Preservation by Moisture Control: Fundamentals and Applications*, 351–372.
- Fito, P., Chiralt, A., Betoret, N., Gras, M., Cháfer, M., Martínez-Monzó, J., ... Vidal, D. (2001).

- Vacuum impregnation and osmotic dehydration in matrix engineering: Application in functional fresh food development. *Journal of Food Engineering*, 49(2–3), 175–183.
- Fito, P., y Pastor, R. (1994). Non-diffusional mechanisms occurring during vacuum osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, 21(4), 513–519.
- Flieger, M., Kantorova, M., Prell, A., Rezanka, T., y Votruba, J. (2003). Biodegradable plastics from renewable sources. *Folia Microbiologica*, 48(1), 27.
- Forero, A. F., y Ligarreto, G. A. (2009). Evaluación de dos sistemas de tutorado para el cultivo de la arveja voluble (*Pisum sativum* L.) en condiciones de la Sabana de Bogotá. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 3(1), 81-94.
- Gañán, P., y Mondragon, I. (2002). Surface modification of fique fibers. Effect on their physico-mechanical properties. *Polymer Composites*, 23(3), 383–394.
- García Orrego, F. (2015). *Formulación, evaluación y apoyo en presupuestos y actividades relacionadas con plantaciones de fique para la compañía de Empaques SA*. (Tesis doctoral). Corporación Universitaria Lasallista. Medellín, Colombia.
- García, R. (2003). Estudio de la estabilidad de un alimento funcional formulado con placas de manzana impregnadas a vacío con calcio y zinc (Trabajo de grado). Departamento de Ingeniería Química y Alimentos Universidad de las Américas. Puebla, México.
- Garside, P., y Wyeth, P. (2003). Identification of cellulosic fibres by FTIR spectroscopy - thread and single fibre analysis by attenuated total reflectance. *Studies in Conservation*, 48(4), 269–275. <http://doi.org/10.1179/sic.2003.48.4.269>
- Gilibert, A. (2002). *Desarrollo de alimentos funcionales. Incorporación de calcio y zinc por procesos de impregnación a vacío de jarabes de sacarosa*. (Tesis doctoral, Tesis de maestría). Universidad de las Américas, Puebla, México.
- Giraldo, G. A. (2006). El efecto del tratamiento de impregnación a vacío en la respiración de frutas (manzana, fresa, melocotón y sandía mínimamente procesadas. *Vitae*, 13(2), 21–25.
- Gómez, E. F., y Michel, F. C. (2013). Biodegradability of conventional and bio-based plastics and natural fiber composites during composting, anaerobic digestion and long-term soil incubation. *Polymer Degradation and Stability*, 98(12), 2583–2591. <http://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.09.018>
- Gómez, P. A., y Artés, F. (2004). Controlled atmospheres enhance postharvest green celery quality. *Postharvest Biology and Technology*, 34(2), 203–209.
- Goodger, E. M. (1975). *Hydrocarbon fuels: production, properties and performance of liquids and gases*. Londrés, Inglaterra: editorial wiley.

- Gras, M. L., Vidal, D., Betoret, N., Chiralt, A., y Fito, P. (2003). Calcium fortification of vegetables by vacuum impregnation: interactions with cellular matrix. *Journal of Food Engineering*, 56(2–3), 279–284.
- Gras, M., Vidal-Brotóns, N., Betoret, A., y Fito, P. (2002). The response of some vegetables to vacuum impregnation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 3(3), 263–269.
- Guillemin, A., Guillon, F., Degraeve, P., Rondeau, C., Devaux, M.-F., Huber, F., ... Lahaye, M. (2008). Firming of fruit tissues by vacuum-infusion of pectin methylesterase: visualisation of enzyme action. *Food Chemistry*, 109(2), 368–378.
- Gutiérrez Pulido, H., y Salazar, V., (2^{da} edición). (2004). Análisis y diseño de experimentos. México DF, México:editorial Mc Graw Hill.
- Herrera-Franco, Pj., y Valadez-Gonzalez, A. (2005). A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, 36(8), 597–608.
- Hollas, J. M. (2004). *Modern spectroscopy*. Recuperado de https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=IVyXQZkcKKkC&oi=fnd&pg=PR5&dq=Modern+Spectroscopy&ots=ajvROrRiJa&sig=5DGCA3_5eesWOyk8byOIyXurBXw#v=onepage&q=Modern+Spectroscopy&f=false
- Hughes, M. (2012). Defects in natural fibres: their origin, characteristics and implications for natural fibre-reinforced composites. *Journal of Materials Science*, 47(2), 599–609.
- Ibrahim, M. M., Dufresne, A., El-Zawawy, W. K., y Agblevor, F. A. (2010). Banana fibers and microfibrils as lignocellulosic reinforcements in polymer composites. *Carbohydrate Polymers*, 81(4), 811–819.
- Idicula, M., Boudenne, A., Umadevi, L., Ibos, L., Candau, Y., y Thomas, S. (2006). Thermophysical properties of natural fibre reinforced polyester composites. *Composites Science and Technology*, 66(15), 2719–2725.
- Javeri, H., Toledo, R., y Wicker, L. (1991). Vacuum Infusion of Citrus Pectinmethylesterase and Calcium Effects on Firmness of Peaches. *Journal of Food Science*, 56(3), 739–742. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1991.tb05371.x>
- Jmal, H., Bahlouli, N., Wagner-Kocher, C., Leray, D., Ruch, F., Munsch, J.-N., y Nardin, M. (2018). Influence of the grade on the variability of the mechanical properties of polypropylene waste. *Waste Management*, 75, 160–173.
- Johansson, C., Bras, J., Mondragon, I., Nechita, P., Plackett, D., ... Simon, P. (2012). Renewable fibers and bio-based materials for packaging applications--a review of recent developments. *BioResources*, 7(2), 2506–2552.

- Joseph, P. V., Joseph, K., y Thomas, S. (1999). Effect of processing variables on the mechanical properties of sisal-fiber-reinforced polypropylene composites. *Composites Science and Technology*, 59(11), 1625–1640.
- Kalia, S., Kaith, B. S., y Kaur, I. (2011). *Cellulose fibers: bio-and nano-polymer composites: green chemistry and technology*. Springer Science & Business Media.
- Karakacs, B., y Yildiz, F. (2007). Peroxidation of membrane lipids in minimally processed cucumbers packaged under modified atmospheres. *Food Chemistry*, 100(3), 1011–1018.
- Kicińska-Jakubowska, A., Bogacz, E., y Zimmiewska, M. (2012). Review of Natural Fibers. Part I-Vegetable Fibers. *Journal of Natural Fibers*, 9(3), 150–167. <http://doi.org/10.1080/15440478.2012.703370>
- Laurindo, J. B., Stringari, G. B., Paes, S. S., y Carciofi, B. A. M. (2007). Experimental determination of the dynamics of vacuum impregnation of apples. *Journal of Food Science*, 72(8).
- Lima, P. R. L., Santos, R. J., Ferreira, S. R., y Toledo Filho, R. D. (2014). Characterization and treatment of sisal fiber residues for cement-based composite application. *Engenharia Agricola*, 34(5), 812–825.
- Liu, W., Mohanty, A. K., Drzal, L. T., Askel, P., y Misra, M. (2004). Effects of alkali treatment on the structure, morphology and thermal properties of native grass fibers as reinforcements for polymer matrix composites. *Journal of Materials Science*, 39, 1051–1054. <http://doi.org/10.1023/B:JMSE.0000012942.83614.75>
- López, D. F., Osorio, O., & Checa, O. (2019). Estudio de las Propiedades Mecánicas de un Material de Pectina para Revestimiento de Fibras Naturales Utilizadas en el Tutorado de Arveja (*Pisum sativum* L.). *Información Tecnológica*, 30(3), 189–198.
- López Sánchez, Á.,. (2004). *Influencia del proceso de reciclado sobre las propiedades de los materiales compuestos obtenidos por inyección de poliestireno reforzado con fibras lignocelulósicas*. (Tesis doctoral). Universitat de Girona, Girona, España.
- Lozano Tafur, C.,. (2016). *Deformación y fractura de una resina epóxica reforzada con fibra de algodón* (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá.
- MADR y Cadefique. (2014). *Ficha técnica cultivo del fique*. Recuperado de <https://sioc.minagricultura.gov.co/Fique/Documentos/005 - Documentos Técnicos/005 - D.T - Ficha Tecnica Cultivo de Fique.pdf>
- Martinez-Monzó, J., Martinez-Navarrete, N., Chiralt, A., y Fito, P. (1998). Mechanical and structural changes in apple (var. Granny Smith) due to vacuum impregnation with cryoprotectants. *Journal of Food Science*, 63(3), 499–503.

- Mata Montes, M., y Maupoey, P. J. F. (1992). *Aportación al desarrollo de un proceso de deshidratación osmótica al vacío para alimentos*. (Tesis doctoral), Departamento de tecnología en alimentos, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Milošević, M., Krkobabić, A., Radoičić, M., Šaponjić, Z., Radetić, T., y Radetić, M. (2017). Biodegradation of cotton and cotton/polyester fabrics impregnated with Ag/TiO₂nanoparticles in soil. *Carbohydrate Polymers*, 158, 77–84. <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.12.006>
- Mohan, D., Pittman, C. U., y Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy & Fuels*, 20(3), 848–889.
- Mohan, T. P., y Kanny, K. (2012). Chemical treatment of sisal fiber using alkali and clay method. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(11), 1989–1998.
- Mohanty, A. K., Misra, M., y Drzal, L. T. (1^{era} edición) (2005). *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites*: editorial CRC press.
- Mojica, A., y Paredes, J. (2004). El cultivo del fique en el departamento de Santander. *Centro Regional de Estudios Económicos, Bucaramanga (Santander, Colombia)*, 154.
- Mora Rodriguez, L., Álvarez Garcia, E., y Hernández González, J. R. (2009). Determination of mechanical properties of fibers of Bambusa Vulgaris to use in bamboo mat board. *Revista Ingeniería de Construcción*, 24(2), 153–166.
- Moriana, R., Vilaplana, F., Karlsson, S., y Ribes, A. (2014). Correlation of chemical, structural and thermal properties of natural fibres for their sustainable exploitation. *Carbohydrate Polymers*, 112, 422–431.
- Mosiewicki, M. A., Marcovich, N. E., y Aranguren, M. I. (2011). Characterization of fiber surface treatments in natural fiber composites by infrared and Raman spectroscopy. *Interface Engineering of Natural Fibre Composites for Maximum Performance*, 117–145. <http://doi.org/10.1533/9780857092281.1.117>
- Muñoz, D. M., y Cifuentes, G. C. (2007). El fique como aislante térmico. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 5(1), 9–16.
- Muñoz-Velez, M. F., Hidalgo-salazar, M.A., y Mina-Hernandez, J. H. (2014). Fibras de fique una alternativa para el reforzamiento de plásticos. influencia de la modificación superficial. *Bioteología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 12(2).
- Nam, G. B., Kim, J. W., Byeon, J. M., Kim, B. S., Kim, T. K., y Song, J. I. (2011). Effect of surface treatment on mechanical behavior of jute fiber-reinforced polypropylene composite. In *18th International conference on composite materials.*, 21–26. Recuperado de [http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM18proceedings/data/2.Oral Presentation/Aug25\(Thursday\)/Th27 Natural Fiber Composite Materials+Green](http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM18proceedings/data/2.Oral%20Presentation/Aug25(Thursday)/Th27%20Natural%20Fiber%20Composite%20Materials+Green)

Composites/Th27-6-AK1243.pdf

NTC 3941. Textiles. Cordeles de cabuya.

NTC 992. Textiles. Fibras naturales. Cabuya para hilados y tejidos.

Occhino, E., Hernando, I., Llorca, E., Neri, L., y Pittia, P. (2011). Effect of Vacuum Impregnation Treatments to Improve Quality and Texture of Zucchini (*Cucurbita Pepo*, L). *Procedia Food Science*, 1, 829–835. <http://doi.org/10.1016/J.PROFOO.2011.09.125>

Ochoa Mendoza, A. (2005). *Reciclado mecánico de materiales compuestos con fibras de celulosa* (Tesis doctoral). Escuela técnica superior de ingenieros industriales, Universidad politécnica de Madrid, Madrid, España .

Ostos, S., Díaz, A., y Suarez, H. (2012). Evaluación de diferentes condiciones de proceso en la fortificación de mango (*Tommy Atkins*) con calcio mediante impregnación a vacío. *Revista Chilena de Nutrición*, 39(2), 181-190.

Páez Moscoso, J. C. (2007). *Obtención de compuestos de polidropileno reforzado con fibras de abacá mediante moldeo por compresión* (Tesis de maestría). Escuela de ingeniería, Escuela politécnica nacional, Quito, Ecuador.

Pantoja, D., Muñoz, K., y Checa, O. (2014). Evaluación y correlación de componentes de rendimiento en líneas avanzadas de arveja *Pisum sativum* con gen afila. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 31(2), 24–39.

Peinado, J. E., Ospina, L. F., Rodriguez, L., Miller, J., Carvajal, C., y Negrete, R. (2006). Guía ambiental del subsector fiquero. Bogotá DC: Cadena productiva nacional del fique-Cadefique. vol. 21.

Peña, F., Rodriguez, M. C., y Gonzalez, J. H. G. (2015). Uchuva minimamente procesada impregnada al vacío con calcio y vitaminas b9. *Biotechnología en el sector agropecuario y agroindustrial: BSAA*, 13(1), 110–119.

Perez-Cabrera, L., Chafer, M., Chiralt, A., y Gonzalez-Martinez, C. (2011). Effectiveness of antibrowning agents applied by vacuum impregnation on minimally processed pear. *LWT - Food science and technology*, 44(10), 2273–2280. <http://doi.org/10.1016/J.LWT.2011.04.007>

Phoon, P. Y., Galindo, F. G., Vicente, A., y Dejmeck, P. (2008). Pulsed electric field in combination with vacuum impregnation with trehalose improves the freezing tolerance of spinach leaves. *Journal of Food Engineering*, 88(1), 144–148. article.

Ponappa, T., Scheerens, J. C., & Miller, A. R. (1993). Vacuum Infiltration of Polyamines Increases Firmness of Strawberry Slices Under Various Storage Conditions. *Journal of Food Science*, 58(2), 361–364. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1993.tb04275.x>

- Puente-Díaz, L., Echegaray-Pacheco, E., Castro-Montero, E., y Di Scala, K. (2013). Aplicación de modelos matemáticos al proceso de secado asistido por infrarrojos de descartes de limón (*Citrus limon* L.) Burm. F. Cv. Genova). *Dyna*, 80(181), 91–97.
- Ramos, J. (2018). *Modelado de las cinéticas de pérdida de humedad y absorción de aceite durante la fritura a vacío de papa ratona morada cultivada en el departamento de Nariño* (Tesis de pregrado). Programa de ingeniería agroindustrial, Facultad de ingeniería agroindustrial, Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, Colombia.
- Rao, K. M. M., y Rao, K. M. (2007). Extraction and tensile properties of natural fibers: Vakka, date and bamboo. *Composite Structures*, 77(3), 288–295.
- Razak, N., Ibrahim, N., Zainuddin, N., Rayung, M., Saad, W., Razak, N. I. A., ... Saad, W. Z. (2014). The influence of chemical surface modification of kenaf fiber using hydrogen peroxide on the mechanical properties of biodegradable kenaf fiber/poly(lactic acid) composites. *Molecules*, 19(3), 2957–2968. <http://doi.org/10.3390/molecules19032957>
- Reddy, N., y Yang, Y. (2005). Structure and properties of high quality natural cellulose fibers from cornstalks. *Polymer*, 46(15), 5494–5500.
- Revelo, J. D., Osorio, O., Checa, O., & Vaquiro, H.A. (2019). Evaluación de la pérdida de calidad mecánica de tres fibras naturales como alternativa de tutorado en el cultivo de arveja (*Pisum sativum* L.). *Información tecnológica*, 30 (5), en prensa.
- Rhim, J.-W., y Ng, P. K. W. (2007). Natural biopolymer-based nanocomposite films for packaging applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 47(4), 411–433.
- Rodríguez, L., y Suarez, O. (2010). Formular alternativas basadas en tecnología de acumulación para el uso eficiente de la cadena de valor del plátano. *Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Nacional de Colombia. Manizales*, 136.
- Romanzini, D., Ornaghi Junior, H. L., Amico, S. C., y Zattera, A. J. (2012). Preparation and characterization of ramie-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites. *Materials Research*, 15(3), 415–420.
- Romero, A. del P. M. (2010). *Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (Guadua angustifolia) para su uso potencial como refuerzo de materiales compuestos*. (Tesis doctoral. Universidad de los Andes, Bogota D.C, Colombia.
- Rong, M. Z., Zhang, M. Q., Liu, Y., Yang, G. C., y Zeng, H. M. (2001). The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 61(10), 1437–1447.
- Salvatori, D., Andres, A., Chiralt, A., y Fito, P. (1998). The response of some properties of fruits to vacuum impregnation. *Journal of Food Process Engineering*, 21(1), 59–73.

- Schulze, B., Hubbermann, E. M., & Schwarz, K. (2014). Stability of quercetin derivatives in vacuum impregnated apple slices after drying (microwave vacuum drying, air drying, freeze drying) and storage. *LWT-Food Science and Technology*, 57(1), 426–433.
- Sgriccia, N., Hawley, M. C., & Misra, M. (2008). Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(10), 1632–1637. <http://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2008.07.007>
- Stevens, C. (2010). *Industrial applications of natural fibres: structure, properties and technical applications* (Vol. 10). John Wiley & Sons.
- Symington, M. C., Banks, W. M., West, O. D., y Pethrick, R. A. (2009). Tensile testing of cellulose based natural fibers for structural composite applications. *Journal of Composite Materials*, 43(9), 1083–1108.
- Tapia, C., Paredes, C., Simbaña, A., y Bermúdez, J. (2006). Aplicación de las Fibras Naturales en el Desarrollo de Materiales Compuestos y como Biomasa. *Revista Tecnológica-ESPOL*, 19(1).
- Valadez-Gonzalez, A., Cervantes-Uc, J. M., Olayo, R., y Herrera-Franco, P. J. (1999). Chemical modification of henequén fibers with an organosilane coupling agent. *Composites: Part B* 30, 30, 321–331.
- Vallo, C., Kenny, J. M., Vazquez, A., y Cyras, V. P. (2004). Effect of chemical treatment on the mechanical properties of starch-based blends reinforced with sisal fibre. *Journals.sagepub.com*, 38(16), 1387–1399. <http://doi.org/10.1177/0021998304042738>
- Van de Weyenberg, I., Ivens, J., De Coster, A., Kino, B., Baetens, E., y Verpoest, I. (2003). Influence of processing and chemical treatment of flax fibres on their composites. *Composites Science and Technology*, 63(9), 1241–1246.
- Vargas, M., Chiralt, A., Albors, A., y González-Martínez, C. (2009). Effect of chitosan-based edible coatings applied by vacuum impregnation on quality preservation of fresh-cut carrot. *Postharvest Biology and Technology*, 51(2), 263–271. <http://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2008.07.019>
- Veiga-Santos, P., Oliveira, L. M., Cereda, M. P., Alves, A. J., y Scamparini, A. R. P. (2005). Mechanical properties, hydrophilicity and water activity of starch-gum films: effect of additives and deacetylated xanthan gum. *Food Hydrocolloids*, 19(2), 341–349.
- Vignon, M. R., Heux, L., Malainine, M.-E., y Mahrouz, M. (2004). Arabinan--cellulose composite in *Opuntia ficus-indica* prickly pear spines. *Carbohydrate Research*, 339(1), 123–131.
- Wambua, P., Ivens, J., y Verpoest, I. (2003). Natural fibres: can they replace glass in fibre

- reinforced plastics? *Composites Science and Technology*, 63(9), 1259–1264.
- Young, R. A. (1997). Utilization of natural fibers: characterization, modification and applications. *Lignocellulosic-Plastics Composites*.
- Yousif, B. F., y El-Tayeb, N. S. M. (2009). Mechanical and wear properties of oil palm and glass fibres reinforced polyester composites. *International Journal of Precision Technology*, 1(2), 213–222.
- Zamorano, C., López, H., y Alzate, G. (2008). Evaluación de la competencia de arvenses en el cultivo de arveja (*Pisum sativum*) en Fusagasugá, Cundinamarca (Colombia). *Agronomía Colombiana*, 26(3), 443.
- Zhao, Y., y Xie, J. (2004). Practical applications of vacuum impregnation in fruit and vegetable processing. *Trends in Food Science & Technology*, 15(9), 434–451.

9. ANEXOS

Anexo 1. Datos experimentales de la caracterización fisicoquímica de fibras vegetales.

1.1 Datos experimentales caracterización fisicoquímica de fibra de fique.

Tabla 1.1

Datos obtenidos de peso de fibra fique.

Tratamiento	Corrida	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	X peso inicial (g)	σ	X peso final (g)	σ
T1	1	0,7345	1,7478	0,7346	0,0002	1,7478	0,0003
	2	0,7344	1,7475				
	3	0,7348	1,748				
T2	1	0,676	1,9442	0,6761	0,0002	1,9444	0,0002
	2	0,6763	1,9445				
	3	0,6761	1,9446				
T3	1	0,8718	1,6833	0,8718	0,0002	1,6834	0,0003
	2	0,872	1,6837				
	3	0,8717	1,6832				
T4	1	0,9643	1,9578	0,9642	0,0001	1,9580	0,0002
	2	0,9641	1,9581				
	3	0,9641	1,958				
T5	1	1,5725	1,9814	1,5723	0,0002	1,9816	0,0002
	2	1,5723	1,9818				
	3	1,5721	1,9816				
T6	1	0,8544	2,1211	0,8543	0,0001	2,1214	0,0003
	2	0,8543	2,1217				
	3	0,8542	2,1215				
T7	1	0,7291	1,4779	0,7291	0,0001	1,4781	0,0002
	2	0,729	1,4781				
	3	0,7292	1,4783				
T8	1	0,9734	1,9775	0,9732	0,0002	1,9775	0,0004
	2	0,973	1,9778				
	3	0,9731	1,9771				

X: promedio; σ : desviación estándar.

Tabla 1.2

Datos obtenidos de diámetro de fibra fique.

Tratamiento	Corrida	Diámetro Inicial (mm)	diámetro Final (mm)	X diámetro inicial (mm)	Σ	X diámetro final (mm)	σ
-------------	---------	-----------------------	---------------------	-------------------------	----------	-----------------------	----------

T1	1	0,938	1,171	0,938	0,003	1,170	0,002
	2	0,94	1,172				
	3	0,935	1,168				
T2	1	0,908	1,203	0,910	0,002	1,206	0,006
	2	0,91	1,213				
	3	0,911	1,203				
T3	1	0,973	1,162	0,974	0,004	1,171	0,010
	2	0,978	1,17				
	3	0,971	1,181				
T4	1	1,025	1,224	1,025	0,004	1,220	0,005
	2	1,021	1,221				
	3	1,028	1,215				
T5	1	1,061	1,151	1,061	0,003	1,150	0,002
	2	1,058	1,151				
	3	1,063	1,148				
T6	1	1,062	1,162	1,060	0,004	1,321	0,142
	2	1,063	1,435				
	3	1,055	1,366				
T7	1	0,912	1,108	0,913	0,003	1,114	0,005
	2	0,916	1,116				
	3	0,911	1,118				
T8	1	1,032	1,222	1,034	0,003	1,224	0,003
	2	1,037	1,227				
	3	1,033	1,222				

X: promedio; σ : desviación estándar.

Tabla 1.3

Datos obtenidos de longitud de fibra fique.

Tratamiento	Corrida	Longitud (m)	X (m)	σ
T1	1	2,010	1,997	0,015
	2	1,980		

	3	2,000		
T2	1	1,970	1,993	0,025
	2	1,990		
	3	2,020		
T3	1	1,990	2,000	0,017
	2	2,020		
	3	1,990		
T4	1	1,990	1,990	0,010
	2	2,000		
	3	1,980		
T5	1	2,010	2,003	0,012
	2	2,010		
	3	1,990		
T6	1	2,010	2,007	0,025
	2	1,980		
	3	2,030		
T7	1	1,990		0,006
	2	1,990		
	3	1,980	1,987	
T8	1	1,990		0,006
	2	2,000		
	3	1,990	1,993	

X: promedio; σ : desviación estándar.

Tabla 1.4

Datos obtenidos de volumen de fibra fique.

Tratamiento	Corrida	Volumen Inicial (cm ³)	Volumen Final (cm ³)	X volumen inicial (cm ³)	Σ	X	σ
						volumen final (cm ³)	

T1	1	1,389	2,165	1,379	0,009	2,148	0,015
	2	1,374	2,136				
	3	1,373	2,143				
T2	1	1,276	2,239	1,296	0,021	2,278	0,034
	2	1,294	2,300				
	3	1,317	2,296				
T3	1	1,480	2,110	1,490	0,024	2,154	0,038
	2	1,517	2,172				
	3	1,474	2,180				
T4	1	1,642	2,342	1,641	0,003	2,326	0,027
	2	1,637	2,342				
	3	1,643	2,296				
T5	1	1,777	2,091	1,770	0,006	2,081	0,018
	2	1,767	2,091				
	3	1,766	2,060				
T6	1	1,780	2,132	1,771	0,012	2,770	0,564
	2	1,757	3,202				
	3	1,775	2,975				
T7	1	1,301	1,919	1,301	0,010	1,936	0,015
	2	1,311	1,947				
	3	1,291	1,944				
T8	1	1,665	2,334	1,674	0,013	2,344	0,018
	2	1,689	2,365				
	3	1,668	2,334				

X: promedio; σ : desviación estándar.

Tabla 1.5

Datos obtenidos de densidad real de fibra fique.

Corrida	Densidad real (g/cm ³)	X (g/cm ³)	σ
1	1,434	1,432	0,002
2	1,431		

3	1,432
---	-------

X: promedio; σ : desviación estándar.

Tabla 1.6

Datos obtenidos de densidad aparente de fibra fique.

Tratamiento	Corrida	Densidad	Densidad	X	σ	X Densidad	σ
		aparente Inicial (g/cm ³)	aparente Final (g/cm ³)	Densidad aparente Inicial (g/cm ³)		aparente final (g/cm ³)	

T1	1	0,529	0,807	0,533	0,003	0,800	0,006
	2	0,534	0,818				
	3	0,535	0,816				
T2	1	0,530	0,868	0,522	0,008	0,853	0,013
	2	0,523	0,846				
	3	0,513	0,847				
T3	1	0,589	0,798	0,585	0,009	0,782	0,014
	2	0,575	0,775				
	3	0,592	0,772				
T4	1	0,587	0,836	0,588	0,001	0,842	0,010
	2	0,589	0,836				
	3	0,587	0,853				
T5	1	0,885	0,947	0,888	0,003	0,952	0,008
	2	0,890	0,948				
	3	0,890	0,962				
T6	1	0,480	0,995	0,482	0,003	0,766	0,179
	2	0,486	0,663				
	3	0,481	0,713				
T7	1	0,561	0,770	0,560	0,005	0,763	0,006
	2	0,556	0,759				
	3	0,565	0,761				
T8	1	0,585	0,847	0,581	0,005	0,844	0,006
	2	0,576	0,836				
	3	0,583	0,847				

X: promedio; σ : desviación estándar.

Tabla 1.7

Datos obtenidos de humedad de fibra fique.

Corrida	Humedad (%)	X (%)	Σ
1	11,715	11,253	0,528
2	10,678		

3	11,365
---	--------

X: promedio; σ : desviación estándar.

1.2 Datos experimentales de la caracterización fisicoquímica de fibra de algodón.

Tabla 1.8

Datos obtenidos de peso de fibra algodón.

Tratamiento	Corrida	Peso	Peso	X peso	Σ	X peso	σ
		Inicial (g)	Final (g)	inicial (g)		final (g)	

T1	1	0,5747	1,723	0,5746	0,0002	1,7230	0,0002
	2	0,5744	1,7232				
	3	0,5748	1,7229				
T2	1	0,6061	1,7216	0,6060	0,0001	1,7214	0,0002
	2	0,606	1,7213				
	3	0,6059	1,7214				
T3	1	0,6055	1,3491	0,6055	0,0001	1,3391	0,0174
	2	0,6054	1,3492				
	3	0,6055	1,319				
T4	1	0,6054	1,7965	0,6054	0,0002	1,7965	0,0001
	2	0,6056	1,7966				
	3	0,6053	1,7965				
T5	1	0,6043	1,8611	0,6042	0,0001	1,8611	0,0001
	2	0,6041	1,8612				
	3	0,6043	1,861				
T6	1	0,6077	1,9011	0,6077	0,0002	1,9013	0,0002
	2	0,6079	1,9015				
	3	0,6076	1,9013				
T7	1	0,5959	1,818	0,5959	0,0001	1,8181	0,0002
	2	0,5958	1,8183				
	3	0,596	1,8181				
T8	1	0,5821	1,5824	0,5554	0,0463	1,5824	0,0001
	2	0,5822	1,5825				
	3	0,502	1,5824				

X: promedio; σ : desviación estándar.

Tabla 1.9

Datos obtenidos de diámetro de fibra algodón.

Tratamiento	Corrida	Diámetro		X diámetro	σ	X		σ
		Inicial (mm)	Final (mm)			diámetro	σ	

				inicial		final	
				(mm)		(mm)	
T1	1	0,989	1,233	0,985	0,004	1,232	0,001
	2	0,985	1,233				
	3	0,981	1,231				
T2	1	0,9899	1,283	1,006	0,043	1,291	0,055
	2	1,055	1,24				
	3	0,974	1,35				
T3	1	0,985	1,118	0,997	0,022	1,116	0,002
	2	1,023	1,114				
	3	0,984	1,115				
T4	1	0,988	1,295	0,996	0,013	1,306	0,022
	2	1,011	1,292				
	3	0,988	1,331				
T5	1	0,978	1,193	0,997	0,030	1,214	0,018
	2	0,981	1,224				
	3	1,031	1,225				
T6	1	0,991	1,366	0,997	0,015	1,320	0,055
	2	0,987	1,259				
	3	1,014	1,336				
T7	1	0,991	1,219	0,985	0,006	1,232	0,014
	2	0,986	1,232				
	3	0,979	1,246				
T8	1	0,981	1,244	0,988	0,009	1,249	0,006
	2	0,998	1,247				
	3	0,985	1,256				

X: promedio; σ : desviación estándar.

Tabla 1.10

Datos obtenidos de longitud de fibra algodón.

Tratamiento	Corrida	Longitud (m)	X	σ
			(m)	

T1	1	2,01	1,99	0,026
	2	1,96		
	3	2		
T2	1	1,96	1,987	0,025
	2	1,99		
	3	2,01		
T3	1	2	2,003	0,015
	2	2,02		
	3	1,99		
T4	1	1,99	1,990	0,010
	2	2		
	3	1,98		
T5	1	2	1,997	0,006
	2	2		
	3	1,99		
T6	1	2,01	2,013	0,015
	2	2		
	3	2,03		
T7	1	2,000	1,990	0,010
	2	1,990		
	3	1,980		
T8	1	1,990	1,987	0,015
	2	2,000		
	3	1,970		

X: promedio; σ : desviación estándar.

Tabla 1.11

Datos obtenidos de volumen de fibra algodón.

Tratamiento	Corrida	Volumen	Volumen	X volumen	σ	X volumen	σ
-------------	---------	---------	---------	-----------	----------	-----------	----------

		Inicial (cm³)	Final (cm³)	inicial (cm³)		final (cm³)	
T1	1	1,544	2,400				
	2	1,494	2,340	1,516	0,026	2,373	0,030
	3	1,512	2,380				
T2	1	1,508	2,534				
	2	1,740	2,403	1,582	0,137	2,605	0,245
	3	1,498	2,877				
T3	1	1,524	1,963				
	2	1,660	1,969	1,566	0,082	1,958	0,014
	3	1,513	1,943				
T4	1	1,526	2,621				
	2	1,606	2,622	1,550	0,048	2,666	0,077
	3	1,518	2,755				
T5	1	1,502	2,236				
	2	1,512	2,353	1,558	0,089	2,311	0,066
	3	1,661	2,345				
T6	1	1,550	2,946				
	2	1,530	2,490	1,573	0,058	2,760	0,240
	3	1,639	2,846				
T7	1	1,543	2,334				
	2	1,519	2,372	1,518	0,026	2,374	0,040
	3	1,490	2,414				
T8	1	1,504	2,419				
	2	1,565	2,443	1,523	0,036	2,434	0,013
	3	1,501	2,441				

X: promedio; σ : desviación estándar.

Tabla 1.2.5

Datos obtenidos de densidad real de fibra algodón.

Corrida	Densidad real (g/cm³)	X (g/cm³)	σ
----------------	---	---------------------------------------	----------------------------

1	1,035	1,032	0,003
2	1,031		
3	1,030		

X: promedio; σ : desviación estándar.

Tabla 1.12

Datos obtenidos de densidad aparente de fibra de algodón.

Tratamiento	Corrida	Densidad aparente Inicial (g/cm ³)	Densidad aparente Final (g/cm ³)	X Densidad aparente Inicial (g/cm ³)	σ	X Densidad aparente final (g/cm ³)	σ
T1	1	0,372	0,718	0,379	0,006	0,726	0,009
	2	0,385	0,736				
	3	0,380	0,724				
T2	1	0,402	0,679	0,384	0,032	0,661	0,060
	2	0,348	0,716				
	3	0,405	0,598				
T3	1	0,397	0,687	0,387	0,020	0,684	0,004
	2	0,365	0,685				
	3	0,400	0,679				
T4	1	0,397	0,685	0,391	0,012	0,674	0,019
	2	0,377	0,685				
	3	0,399	0,652				
T5	1	0,402	0,832	0,388	0,022	0,805	0,023
	2	0,400	0,791				
	3	0,364	0,793				
T6	1	0,392	0,645	0,386	0,014	0,689	0,063
	2	0,397	0,764				
	3	0,371	0,668				
T7	1	0,386	0,779	0,393	0,007	0,766	0,013
	2	0,392	0,766				
	3	0,400	0,753				
T8	1	0,387	0,654	0,365	0,027	0,650	0,004
	2	0,372	0,648				
	3	0,334	0,648				

X: promedio; σ : desviación estándar.

Tabla 1.13

Datos obtenidos de humedad de fibra algodón.

Corrida	Humedad (%)	X	σ
---------	-------------	---	----------

		(%)	
1	5,11		
2	5,3	5,11	0,19
3	4,92		

X: promedio; σ : desviación estándar.

1.3 Datos experimentales caracterización fisicoquímica emulsión de impregnación.

Tabla 1.14

Datos obtenidos de densidad de la emulsión de impregnación.

Corrida	Densidad real (g/cm ³)	X (g/cm ³)	σ
1	1,04151		
2	1,15151	1,04151	0,11
3	0,93151		

X: promedio; σ : desviación estándar.

Tabla 1.15


Datos obtenidos de viscosidad de la emulsión de impregnación.

Corrida	Viscosidad (cP)	X (cP)	σ
1	1539,36		
2	1713,57	1539,357	174,215
3	1365,14		

X: promedio; σ : desviación estándar.

Anexo 2. Datos experimentales de la caracterización composicional y mecánica de fibras vegetales.

2.1 Reporte de análisis bromatológico fibra de fique.

 Universidad de Nariño FUNDADA EN 1964	SECCIÓN DE LABORATORIOS				Código: LBE-PRS-FR-76	
	REPORTE DE RESULTADOS				Página: 1 de 1	
					Versión: 2	
					Vigente a partir de: 2014-01-15	
LABORATORIO		BROMATOLOGÍA - ABONOS ORGÁNICOS				
DATOS USUARIO		DATOS MUESTRA		REPORTE No. LB-R- 009C-18		
Solicitante: Jorge Daniel Revelo Rosero. Tesis Ing. Agroindustrial		Muestra Fibra de Fique. 0 Días		Código muestra 112		
Dirección: Mz 14 casa 10. Tamasagra 2. Pasto		Procedencia Laboratorio Grupo de Investigación Gaida. Bloque Tecnológico, Lab. 506. Universidad de Nariño, Sede Torobajo. Pasto				
cc / nit: 1.085.311.811		Responsable del Muestreo *		Jorge Daniel Revelo Rosero		
Teléfono: 316 796 8605		Fecha de Muestreo *		AA 18	MM 02	DD 27
e-mail: jormilros@hotmail.com		Fecha Recepción Muestra en Laboratorio		AA 18	MM 03	DD 05
		Fecha de Emisión del Reporte		AA 18	MM 04	DD 26
FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO		2018-04-09 a 2018-04-26				
ANÁLISIS SOLICITADO		FDN, FDA, Lignina				
PARÁMETRO	MÉTODO	TÉCNICA	UNIDAD DE MEDIDA	Base Paratelm. Seca		
Fibra Detergente Neutro	Van Soest Secuencial. Bolsas Ankom	Gravimétrica	g/100g	68,26		
Fibra Detergente Ácido	Van Soest Secuencial. Bolsas Ankom	Gravimétrica	g/100g	55,82		
Lignina	Van Soest Secuencial. Oxidación KMnO ₄	Gravimétrica	g/100g	11,85		
Celulosa	Van Soest Secuencial.	Gravimétrica	g/100g	44,00		
Hemicelulosa	Van Soest Secuencial.	Gravimétrica	g/100g	12,44		
OBSERVACIONES						
<i>Nota a</i>		Información suministrada por el usuario				
RESULTADOS VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA MUESTRA ANALIZADA						
UNA VEZ ENTREGADO ESTE INFORME DE RESULTADOS, EL LABORATORIO DEJA DE TENER CONTROL SOBRE SU REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL.						

Original firmado

Gloria Sandra Espinosa Montoya

Téc. Laboratorio Bromatología - Abonos Orgánicos

Elaboración del Reporte

Aprobación del Reporte

Revisó: GSEN 2018-04-26

FIN REPORTE DE RESULTADOS

Tabla 2.2


Datos experimentales propiedades mecánicas fibra de fique.

Propiedad mecánica	Corrida	Valor	X	Σ
---------------------------	----------------	--------------	----------	----------

Resistencia a la tracción (MPa)	1	140,847		
	2	137,099		
	3	142,647		
	4	147,522	143,434	4,893
	5	149,056		
Elongación total a fuerza máxima (%)	1	19,971		
	2	20,102		
	3	20,038		
	4	20,158	20,105	0,111
	5	20,259		
Módulo de Young (MPa)	1	1131,749		
	2	759,467		
	3	945,608		
	4	783,966	945,608	186,141
	5	1107,759		

X: promedio; σ : desviación estándar.

2.3 Reporte análisis bromatológico fibra de algodón.

 Universidad de Nariño FUNDADA EN 1984	SECCIÓN DE LABORATORIOS			Código: LBE-PRS-FR-76	
	REPORTE DE RESULTADOS			Página: 1 de 1	
				Versión: 2	
				Vigente a partir de: 2014-01-15	
LABORATORIO BROMATOLOGIA - ABONOS ORGÁNICOS					
DATOS USUARIO		DATOS MUESTRA		REPORTE No. LB-R- 009A-18	
Solicitante: Jorge Daniel Revelo Rosero. Tesis Ing. Agroindustrial		Muestra Fibra de Algodón. 0 Días		Código muestra 110	
Dirección: Mz 14 casa 10. Tamasagra 2. Pasto		Procedencia Laboratorio Grupo de Investigación Gaida. Bloque Tecnológico, Lab. 506. Universidad de Nariño, Sede Torobajo. Pasto			
cc / nit: 1.085.311.611		Responsable del Muestreo *		Jorge Daniel Revelo Rosero	
Teléfono: 316 796 8605		Fecha de Muestreo *		AA 18	MM 02 DD 27
e-mail: jormilros@hotmail.com		Fecha Recepción Muestra en Laboratorio		AA 18	MM 03 DD 05
		Fecha de Emisión del Reporte		AA 18	MM 04 DD 26
FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO		2018-04-09 a 2018-04-26			
ANÁLISIS SOLICITADO		Fibras por Van Soest			
PARÁMETRO	METODO	TECNICA	UNIDAD DE MEDIDA	Base Parotelm. Soes	
Fibra Detergente Neutro	Van Soest Secuencial. Bolsas Ankom	Gravimétrica	g/100g	97,83	
Fibra Detergente Acido	Van Soest Secuencial. Bolsas Ankom	Gravimétrica	g/100g	96,68	
Lignina	Van Soest Secuencial. Oxidación KMnO ₄	Gravimétrica	g/100g	0,44	
Celulosa	Van Soest Secuencial.	Gravimétrica	g/100g	95,86	
Hemicelulosa	Van Soest Secuencial.	Gravimétrica	g/100g	1,15	
OBSERVACIONES					
Nota a	Información suministrada por el usuario				
RESULTADOS VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA MUESTRA ANALIZADA					
UNA VEZ ENTREGADO ESTE INFORME DE RESULTADOS, EL LABORATORIO DEJA DE TENER CONTROL SOBRE SU REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL.					

Original firmado

Gloria Sandra Espinosa Moranday

Téc. Laboratorio Bromatología - Abonos Orgánicos

Elaboración del Reporte

Aprobación del Reporte

Revisó:

GBEN

2018-04-26

FIN REPORTE DE RESULTADOS

Tabla 2.4

Datos experimentales propiedades mecánicas fibra de algodón.

Propiedad mecánica	Corrida	Valor	\bar{X}	Σ
Resistencia a la tracción (MPa)	1	40,578	145,477	1,568
	2	39,951		
	3	41,544		
	4	40,690		
	5	41,645		
Elongación total a fuerza máxima (%)	1	147,719	40,881	0,710
	2	145,321		
	3	143,368		
	4	145,900		
	5	145,079		
Módulo de Young (MPa)	1	482,457	531,958	43,458
	2	503,832		
	3	586,698		
	4	565,529		
	5	518,117		

X: promedio; σ : desviación estándar.

Anexo 3. Datos estadísticos del diseño experimental para fibras vegetales.

3.1 Fibra de fique.

Tabla 3.1*Datos estadísticos del diseño experimental para fibra de fique.*

TRATAMIENTOS	Elongación total a fuerza máxima (%)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de Young (MPa)
T1	26,5388623	141,705039	1044,27312
T1	20,4741354	136,82786	941,11709
T1	21,0236738	130,549847	988,577019
T1	20,7851179	133,620821	962,5918
T1	17,1316409	143,116535	1069,60624
T2	14,9101714	117,374792	1077,34082
T2	14,5205438	115,44129	1005,61839
T2	16,3522772	119,842295	1040,37583
T2	15,222094	118,547979	1096,99454
T2	14,7651646	101,726968	1139,03848
T3	14,4046319	93,0593581	1116,61305
T3	14,8553343	97,4177078	1288,53452
T3	13,3334244	94,1071126	1125,71725
T3	14,4984149	95,918404	1184,16588
T3	13,3334244	101,311254	1248,3102
T4	11,5213895	95,8942732	965,184371
T4	12,7768903	94,6174048	1012,5842
T4	12,771223	90,6455011	929,268159
T4	11,0130234	92,6412136	1020,15041
T4	11,7815324	92,7546914	1057,54037
T5	16,0895224	128,562882	1169,49273
T5	16,0796745	121,059962	1203,60363
T5	16,8111607	123,183429	1173,81184
T5	16,6662515	121,057303	1203,63458

T5	15,8791057	119,324202	1207,13222
T6	16,7342774	133,646972	1013,91306
T6	16,8544858	133,301238	1136,38405
T6	15,8194585	120,990338	1078,61233
T6	14,8022374	121,914858	1174,64041
T6	16,2580068	120,212081	1129,8518
T7	14,2894992	97,2023012	1102,53174
T7	14,0258789	109,381774	1228,08422
T7	14,0668998	113,193175	1076,29618
T7	13,072485	119,930223	1197,16339
T7	13,2657604	99,9481237	1045,27908
T8	15,9166413	96,1038729	850,244533
T8	17,4704643	97,5244456	847,629429
T8	14,8039123	114,579481	809,031158
T8	14,0800829	91,9369697	814,328589
T8	16,7448531	115,724395	814,284542

3.1.1 Resistencia a la tracción.

Tabla 3.2*Análisis de Varianza para Resistencia a la tracción.*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Tiempo	210,028	1	210,028	4,04	0,0543
B:Temperatura	6202,96	1	6202,96	119,22	0,0000
C:Presión	456,005	1	456,005	8,76	0,0062
AB	376,125	1	376,125	7,23	0,0119
AC	367,471	1	367,471	7,06	0,0129
BC	81,1164	1	81,1164	1,56	0,2222
ABC	478,104	1	478,104	9,19	0,0052
bloques	17,6511	4	4,41278	0,08	0,9864
Error total	1456,87	28	52,031		
Total (corr.)	9646,33	39			

Tabla 3.3

Resumen Estadístico para Resistencia a la tracción.

Tratamiento	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo
T1	5	21,1907	3,38322	15,9656%	17,1316	26,5389
T2	5	15,1541	0,716313	4,72687%	14,5205	16,3523
T3	5	14,085	0,706439	5,01552%	13,3334	14,8553
T4	5	11,9728	0,781915	6,53076%	11,013	12,7769
T5	5	16,3051	0,407826	2,50121%	15,8791	16,8112
T6	5	16,0937	0,830544	5,16068%	14,8022	16,8545
T7	5	13,7441	0,538733	3,91974%	13,0725	14,2895
T8	5	15,8032	1,38267	8,74928%	14,0801	17,4705
Total	40	15,5436	2,86468	18,4299%	11,013	26,5389

Tabla 3.4

Pruebas de Múltiple Rangos para Resistencia a la tracción por tratamiento Método: 95,0 porcentaje LSD.

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
T4	5	93,3106	X
T3	5	96,3628	XX
T8	5	103,174	XX
T7	5	107,931	XX
T2	5	114,587	XX
T5	5	122,638	XX
T6	5	126,013	X
T1	5	137,164	X

3.1.2 Elongación total a fuerza máxima.

Tabla 3.5*Análisis de Varianza para Elongación total a fuerza máxima.*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Tiempo	0,130224	1	0,130224	0,07	0,7957
B:Temperatura	107,886	1	107,886	56,59	0,0000
C:Presión	24,816	1	24,816	13,02	0,0012
AB	34,5527	1	34,5527	18,12	0,0002
AC	62,4563	1	62,4563	32,76	0,0000
BC	23,9858	1	23,9858	12,58	0,0014
ABC	1,70954	1	1,70954	0,90	0,3518
Bloques	11,1326	4	2,78314	1,46	0,2409
Error total	53,3788	28	1,90639		
Total (corr.)	320,048	39			

Tabla 3.6*Resumen Estadístico para Elongación total a fuerza máxima.*

Tratamiento	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo
T1	5	21,1907	3,38322	15,9656%	17,1316	26,5389
T2	5	15,1541	0,716313	4,72687%	14,5205	16,3523
T3	5	14,085	0,706439	5,01552%	13,3334	14,8553
T4	5	11,9728	0,781915	6,53076%	11,013	12,7769
T5	5	16,3051	0,407826	2,50121%	15,8791	16,8112
T6	5	16,0937	0,830544	5,16068%	14,8022	16,8545
T7	5	13,7441	0,538733	3,91974%	13,0725	14,2895
T8	5	15,8032	1,38267	8,74928%	14,0801	17,4705
Total	40	15,5436	2,86468	18,4299%	11,013	26,5389

Tabla 3.7

Pruebas de Múltiple Rangos para Elongación total a fuerza máxima por Tratamiento Método: 95,0 porcentaje LSD.

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
T4	5	11,9728	X
T7	5	13,7441	XX
T3	5	14,085	XX
T2	5	15,1541	XXX
T8	5	15,8032	XX
T6	5	16,0937	X
T5	5	16,3051	X
T1	5	21,1907	X

3.1.3 Módulo de Young.

Tabla 3.8

Análisis de Varianza para Módulo de Young.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Tiempo	35,4422	1	35,4422	0,01	0,9085
B:Temperatura	31565,8	1	31565,8	11,98	0,0017
C:Presión	164291,	1	164291,	62,35	0,0000
AB	130958,	1	130958,	49,70	0,0000
AC	43079,5	1	43079,5	16,35	0,0004
BC	146577,	1	146577,	55,63	0,0000
ABC	1467,16	1	1467,16	0,56	0,4618
Bloques	24560,9	4	6140,21	2,33	0,0805
Error total	73782,2	28	2635,08		
Total (corr.)	616317,	39			

Tabla 3.9

Resumen Estadístico para Módulo de Young.

Tratamiento	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo
T1	5	1001,23	54,3015	5,42346%	941,117	1069,61
T2	5	1071,87	51,3662	4,79219%	1005,62	1139,04
T3	5	1192,67	75,2089	6,30593%	1116,61	1288,53
T4	5	996,946	50,1093	5,02628%	929,268	1057,54
T5	5	1191,53	18,2709	1,53339%	1169,49	1207,13
T6	5	1106,68	62,1116	5,61242%	1013,91	1174,64
T7	5	1129,87	78,974	6,98965%	1045,28	1228,08
T8	5	827,104	20,0684	2,42634%	809,031	850,245
Total	40	1064,74	125,71	11,8066%	809,031	1288,53

Tabla 3.10

Pruebas de Múltiple Rangos para Módulo de Young por Tratamiento Método: 95,0 porcentaje LSD.

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
T8	5	827,104	X
T4	5	996,946	X
T1	5	1001,23	XX
T2	5	1071,87	XX
T6	5	1106,68	X
T7	5	1129,87	XX
T5	5	1191,53	X
T3	5	1192,67	X

3.2 Optimización fibra de fique.

Tabla 3.11*Condiciones óptimas de impregnación a vacío para fibra de fique.*

Factor	Bajo Alto Óptimo		
Tiempo	2,0	10,0	2,0
Temperatura	15,0	60,0	15,0
Presión	0,2	0,7	0,2

Optimizar Deseabilidad
 Valor óptimo = 0,738576

3.2.1 Resistencia a la tracción.

Tabla 3.12*Resumen Estadístico para Resistencia a la tracción.*

Tratamiento	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo
Fique	5	143,434	4,89313	3,41142%	137,099
Fique recubierto	5	153,131	13,6407	8,90788%	141,577
Polipropileno	5	167,437	4,37945	2,61559%	163,033
Total	15	154,667	13,024	8,42068%	137,099

Tabla 3.13*Pruebas de Múltiple Rangos para Resistencia a la tracción por Tratamiento. Método: 95,0 porcentaje LSD.*

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Fique	5	143,434	X
Fique recubierto	5	153,131	X
Polipropileno	5	167,437	X

3.2.2 Elongación total a fuerza máxima.

Tabla 3.14*Resumen Estadístico para Elongación total a fuerza máxima.*

Tratamiento	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo
Fique	5	20,1055	0,110587	0,550033%	19,9711
Fique recubierto	5	18,0067	0,601177	3,33863%	17,3719
Polipropileno	5	37,5328	1,88167	5,01339%	35,1246
Total	15	25,215	9,12076	36,172%	17,3719

Tabla 3.15*Pruebas de Múltiple Rangos para Elongación total a fuerza máxima por Tratamiento Método: 95,0 porcentaje LSD.*

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Fique recubierto	5	18,0067	X
Fique	5	20,1055	X
Polipropileno	5	37,5328	X

3.2.3 Módulo de Young.

Tabla 3.16*Resumen Estadístico para Módulo de Young.*

Tratamiento	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo
Fique	5	945,608	14,31	1,51331%	928,61
Fique recubierto	5	1132,63	124,238	10,9689%	949,297
Polipropileno	5	556,027	12,6362	2,27259%	538,581
Total	15	878,089	257,539	29,3295%	538,581

Tabla 3.17

*Pruebas de Múltiple Rangos para Módulo de Young por Tratamiento**Método: 95,0 porcentaje LSD.*

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Polipropileno	5	556,027	X
Fique	5	945,608	X
Fique recubierto	5	1132,63	X

3.3 Fibra de algodón

Tabla 3.18*Datos estadísticos del diseño experimental para fibra de algodón.*

TRATAMIENTOS	Elongación total a fuerza máxima (%)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de Young (MPa)
T1	44,1845545	166,875332	532,041199
T1	43,0625914	169,131296	433,706351
T1	41,632447	162,519779	438,31007
T1	44,7279924	159,634226	449,027356
T1	43,9732143	207,166613	470,915143
T1	43,4329939	165,936891	437,647234
T2	46,095325	170,378062	433,640837
T2	45,676861	167,084481	414,433908
T2	47,5116861	171,840861	430,163848
T2	47,0042462	166,036453	414,634237
T2	46,9592909	168,939046	404,598712
T2	47,0935008	137,786808	343,006515
T3	42,1296442	125,870381	343,794264
T3	43,2071827	130,807461	360,561859
T3	43,6653003	130,133096	349,207219
T3	46,0876123	131,918401	351,058357
T3	43,4034435	125,661589	351,727535

T3	41,644682	123,894692	356,79487
T4	46,2824991	139,864517	348,634774
T4	48,3940839	141,330441	357,749233
T4	47,6959416	136,005222	330,216494
T4	46,6884434	140,149271	358,99463
T4	47,7322402	139,653048	346,955276
T4	48,63188	140,597724	350,936759
T5	47,5955928	154,158988	394,597631
T5	47,2717261	153,94207	381,203991
T5	47,5308827	157,512343	404,648963
T5	47,6353674	158,678753	407,527862
T5	47,0042462	155,144197	372,535466
T5	47,3884484	147,238559	375,159432
T6	49,3679454	146,13446	356,52905
T6	48,7339795	154,797739	377,145394
T6	47,6871432	151,453967	394,022154
T6	48,157311	143,161809	381,829179
T6	48,725297	148,920604	373,886992
T6	47,7289298	146,848016	373,986707
T7	42,1422866	123,402679	385,855619
T7	43,3876044	126,480164	387,318847
T7	43,5005922	119,759808	337,677466
T7	44,1577963	121,000842	343,626338
T7	42,7241349	122,383899	355,193135
T7	41,5896884	116,547279	366,129911
T8	44,6323547	128,663381	351,34814
T8	45,2470948	123,953269	355,541538
T8	45,4550188	128,484628	341,94306
T8	45,592396	125,253241	342,052297
T8	44,0064362	129,474822	366,373849
T8	44,2742495	125,301451	354,782856

3.3.1 Resistencia a la tracción.

Tabla 3.19*Análisis de Varianza para Resistencia a la tracción.*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Tiempo	2008,79	1	2008,79	33,17	0,0000
B:Temperatura	11246,4	1	11246,4	185,71	0,0000
C:Presión	5,54471	1	5,54471	0,09	0,7640
AB	133,86	1	133,86	2,21	0,1460
AC	11,9185	1	11,9185	0,20	0,6600
BC	716,32	1	716,32	11,83	0,0015
ABC	55,467	1	55,467	0,92	0,3451
Bloques	578,284	5	115,657	1,91	0,1176
Error total	2119,6	35	60,5599		
Total (corr.)	16876,2	47			

Tabla 3.20*Resumen Estadístico para Resistencia a la tracción.*

Tratamiento	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo
T1	6	171,877	17,6105	10,2459%	159,634	207,167
T2	6	163,678	12,8586	7,85607%	137,787	171,841
T3	6	128,048	3,30543	2,5814%	123,895	131,918
T4	6	139,6	1,8594	1,33195%	136,005	141,33
T5	6	154,446	4,00224	2,59136%	147,239	158,679
T6	6	148,553	4,13204	2,78153%	143,162	154,798
T7	6	121,596	3,37507	2,77564%	116,547	126,48
T8	6	126,855	2,28861	1,80411%	123,953	129,475
Total	48	144,332	18,9491	13,1289%	116,547	207,167

Tabla 3.21

Pruebas de Múltiple Rangos para Resistencia a la tracción por Tratamiento Método: 95,0 porcentaje LSD.

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
T7	6	121,596	X
T8	6	126,855	X
T3	6	128,048	X
T4	6	139,6	X
T6	6	148,553	XX
T5	6	154,446	XX
T2	6	163,678	XX
T1	6	171,877	X

3.3.2 Elongación total a fuerza máxima.

Tabla 3.22

Análisis de Varianza para Elongación total a fuerza máxima.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Tiempo	4,45232	1	4,45232	5,29	0,0268
B:Temperatura	40,1666	1	40,1666	47,70	0,0000
C:Presión	80,845	1	80,845	96,00	0,0000
AB	57,0407	1	57,0407	67,74	0,0000
AC	15,114	1	15,114	17,95	0,0001
BC	2,84759	1	2,84759	3,38	0,0734
ABC	0,00109254	1	0,00109254	0,00	0,9714
Error total	33,6844	40	0,84211		
Total (corr.)	234,152	47			

Tabla 3.23

Resumen Estadístico para Elongación total a fuerza máxima.

Tratamiento	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo
T1	6	43,5023	1,08481	2,49368%	41,6324	44,728
T2	6	46,7235	0,690306	1,47743%	45,6769	47,5117
T3	6	43,3563	1,55012	3,5753%	41,6447	46,0876
T4	6	47,5708	0,925601	1,94573%	46,2825	48,6319
T5	6	47,4044	0,238276	0,502647%	47,0042	47,6354
T6	6	48,4001	0,659041	1,36165%	47,6871	49,3679
T7	6	42,917	0,948763	2,21069%	41,5897	44,1578
T8	6	44,8679	0,657786	1,46605%	44,0064	45,5924
Total	48	45,5928	2,23203	4,89557%	41,5897	49,3679

Tabla 3.24

Pruebas de Múltiple Rangos para Elongación total a fuerza máxima por Tratamiento Método: 95,0 porcentaje LSD.

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
T7	6	42,917	X
T3	6	43,3563	X
T1	6	43,5023	X
T8	6	44,8679	X
T2	6	46,7235	X
T5	6	47,4044	XX
T4	6	47,5708	XX
T6	6	48,4001	X

3.3.3 Módulo de Young.

Tabla 3.25*Análisis de Varianza para Módulo de Young.*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Tiempo	5804,5	1	5804,5	13,06	0,0008
B:Temperatura	35247,6	1	35247,6	79,31	0,0000
C:Presión	4857,36	1	4857,36	10,93	0,0020
AB	9926,35	1	9926,35	22,33	0,0000
AC	823,304	1	823,304	1,85	0,1811
BC	2080,68	1	2080,68	4,68	0,0365
ABC	1716,0	1	1716,0	3,86	0,0564
Error total	17777,9	40	444,447		
Total (corr.)	78233,6	47			

Tabla 3.26*Resumen Estadístico para Módulo de Young.*

Tratamiento	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coficiente de Variación	Mínimo	Máximo
T1	6	460,275	37,6576	8,18155%	433,706	532,041
T2	6	406,746	33,0466	8,12462%	343,007	433,641
T3	6	352,191	5,8681	1,66617%	343,794	360,562
T4	6	348,915	10,3661	2,97097%	330,216	358,995
T5	6	389,279	15,1159	3,88306%	372,535	407,528
T6	6	376,233	12,2262	3,24963%	356,529	394,022
T7	6	362,634	20,9776	5,78479%	337,677	387,319
T8	6	352,007	9,24573	2,62658%	341,943	366,374
Total	48	381,035	40,7988	10,7074%	330,216	532,041

Tabla 3.27

Pruebas de Múltiple Rangos para Módulo de Young por Tratamiento Método: 95,0 porcentaje LSD.

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
T4	6	348,915	X
T8	6	352,007	XX
T3	6	352,191	XX
T7	6	362,634	XX
T6	6	376,233	XX
T5	6	389,279	XX
T2	6	406,746	X
T1	6	460,275	X

3.4 Optimización algodón.

Tabla 3. 28

Condiciones óptimas de impregnación a vacío para fibra de algodón.

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Tiempo	2,0	10,0	2,0
Temperatura	15,0	60,0	15,0
Presión	0,2	0,7	0,200593

Optimizar Deseabilidad
Valor óptimo = 0,605836

3.4.1 Resistencia a la tracción.

Tabla 3.29

Resumen Estadístico para Resistencia a la tracción.

Tratamiento	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coficiente de Variación	Mínimo
Algodón	6	146,009	1,91408	1,31093%	143,368
Algodón recubierto	6	197,738	6,42188	3,24768%	191,024
Polipropileno	6	167,2	3,95953	2,36814%	163,033
Total	18	170,316	22,2523	13,0653%	143,368

Tabla 3.30

Pruebas de Múltiple Rangos para Resistencia a la tracción por Tratamiento Método: 95,0 porcentaje LSD.

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Algodón	6	146,009	X
Polipropileno	6	167,2	X
Algodón recubierto	6	197,738	X

3.4.2 Elongación total a fuerza máxima.

Tabla 3.30

Resumen Estadístico para Elongación total a fuerza máxima.

Tratamiento	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo
Algodón	6	41,2635	1,13098	2,74088%	39,9509
Algodón recubierto	6	43,4124	1,15174	2,65302%	42,2195
Polipropileno	6	37,5056	1,68433	4,49087%	35,1246
Total	18	40,7272	2,8125	6,9057%	35,1246

Tabla 3.31

Pruebas de Múltiple Rangos para Elongación total a fuerza máxima por Tratamiento Método: 95,0 porcentaje LSD.

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Polipropileno	6	37,5056	X
Algodón	6	41,2635	X
Algodón recubierto	6	43,4124	X

3.4.3 Módulo de Young.

Tabla 3.32*Resumen Estadístico para Módulo de Young.*

Tratamiento	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo
Algodón	6	561,419	83,3321	14,8431%	482,457
Algodón recubierto	6	528,614	111,938	21,1757%	469,768
Polipropileno	6	559,048	13,5094	2,4165%	538,581
Total	18	549,694	77,5736	14,1121%	469,768

Tabla 3.33*Pruebas de Múltiple Rangos para Módulo de Young por Tratamiento Método: 95,0 porcentaje LSD.*

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Algodón recubierto	6	528,614	X
Polipropileno	6	559,048	X
Algodón	6	561,419	X

Anexo 4. Datos experimentales de los parámetros característicos de impregnación a vacío de fibras vegetales.

4.1 Datos experimentales de los parámetros característicos de impregnación a vacío de fibra de fique.

Tabla 4.1*Fracción volumétrica de líquido en la impregnación a vacío en fibra de fique.*

Tratamiento	Corrida	X (m ³ EI/m ³ fibra de fique)	X	Σ
T1	1	0,701	0,706	0,004
	2	0,707		
	3	0,708		
T2	1	0,955	0,940	0,015
	2	0,942		
	3	0,924		
T3	1	0,526	0,523	0,008
	2	0,514		
	3	0,529		
T4	1	0,581	0,581	0,001
	2	0,583		
	3	0,581		
T5	1	0,221	0,222	0,001
	2	0,223		
	3	0,223		
T6	1	0,683	0,687	0,005
	2	0,692		
	3	0,685		
T7	1	0,553	0,553	0,004
	2	0,549		
	3	0,557		
T8	1	0,579	0,576	0,004
	2	0,571		
	3	0,578		

X: promedio; σ: desviación estándar.

Tabla 4.2*Fracción másica incorporada en la impregnación a vacío en fibra de fique.*

Tratamiento	Corrida	X_{HDM} (kg de		
		EI/ kg de fibra de fique)	\bar{X}	Σ
T1	1	0,5798	0,580	0,00007
	2	0,5797		
	3	0,5796		
T2	1	0,6523	0,652	0,00006
	2	0,6522		
	3	0,6523		
T3	1	0,4821	0,482	0,00002
	2	0,4821		
	3	0,4821		
T4	1	0,5075	0,508	0,00010
	2	0,5076		
	3	0,5076		
T5	1	0,2064	0,207	0,00016
	2	0,2066		
	3	0,2067		
T6	1	0,5972	0,597	0,00010
	2	0,5974		
	3	0,5974		
T7	1	0,5067	0,507	0,00007
	2	0,5068		
	3	0,5067		
T8	1	0,5078	0,508	0,00015
	2	0,5080		
	3	0,5078		

X: promedio; σ : desviación estándar.

Tabla 4.3

Deformación volumétrica de la muestra en la impregnación a vacío en fibra de fique.

Tratamiento	Corrida	γ	X	Σ
		(m ³ deformación/m ³ fibra de fibra de fique)		
T1	1	0,559	0,584	0,003
	2	0,555		
	3	0,561		
T2	1	0,755	0,758	0,017
	2	0,777		
	3	0,743		
T3	1	0,426	0,445	0,029
	2	0,432		
	3	0,479		
T4	1	0,426	0,418	0,018
	2	0,431		
	3	0,397		
T5	1	0,177	0,175	0,009
	2	0,183		
	3	0,166		
T6	1	0,198	0,513	0,327
	2	0,822		
	3	0,676		
T7	1	0,475	0,489	0,016
	2	0,485		
	3	0,506		
T8	1	0,402	0,401	0,001
	2	0,400		
	3	0,399		

X: promedio; σ : desviación estándar.

Tabla 4.4

Porosidad real (ε_r) y porosidad efectiva (ε_e) de fibra de fique.

Tratamiento	Corrida	Porosidad real (ϵ_r)	Porosidad efectiva (ϵ_e)	X porosidad real	σ	X Porosidad efectiva	σ
T1	1	0,631	0,194	0,628	0,002	0,454	0,007
	2	0,627	0,209				
	3	0,626	0,202				
T2	1	0,630	1,031	0,635	0,006	0,225	0,092
	2	0,635	0,847				
	3	0,642	0,932				
T3	1	0,589	0,138	0,591	0,006	0,288	0,035
	2	0,598	0,112				
	3	0,587	0,069				
T4	1	0,590	0,796	0,590	0,001	0,203	0,090
	2	0,589	0,786				
	3	0,590	0,947				
T5	1	0,382	0,061	0,380	0,002	0,173	0,012
	2	0,378	0,054				
	3	0,378	0,077				
T6	1	0,665	2,504	0,663	0,002	0,215	1,665
	2	0,661	-0,671				
	3	0,664	0,047				
T7	1	0,608	0,107	0,609	0,003	0,239	0,018
	2	0,612	0,087				
	3	0,605	0,070				
T8	1	0,591	0,916	0,594	0,003	0,217	0,021
	2	0,598	0,881				
	3	0,593	0,919				

4.2 Datos experimentales de los parámetros característicos de impregnación a vacío de fibra de algodón.

Tabla 4.5*Fracción volumétrica de líquido en la impregnación a vacío en fibra de algodón.*

Tratamiento	Corrida	X		
		(m ³ EI/m ³ fibra de fique)	X	Σ
T1	1	0,714	0,727	0,013
	2	0,739		
	3	0,729		
T2	1	0,710	0,678	0,057
	2	0,615		
	3	0,716		
T3	1	0,468	0,450	0,019
	2	0,431		
	3	0,453		
T4	1	0,750	0,738	0,023
	2	0,712		
	3	0,754		
T5	1	0,803	0,775	0,043
	2	0,799		
	3	0,727		
T6	1	0,801	0,790	0,028
	2	0,811		
	3	0,758		
T7	1	0,760	0,773	0,014
	2	0,772		
	3	0,787		
T8	1	0,639	0,647	0,039
	2	0,614		

3 0,690

X: promedio; σ : desviación estándar.**Tabla 4.6***Fracción másica incorporada en la impregnación a vacío en fibra de algodón.*

Tratamiento	Corrida	X_{HDM} (kg de		
		EI/ kg de fibra de fique)	X	σ
T1	1	0,666	0,666	0,00015
	2	0,667		
	3	0,666		
T2	1	0,648	0,648	0,00004
	2	0,648		
	3	0,648		
T3	1	0,551	0,548	0,00594
	2	0,551		
	3	0,541		
T4	1	0,663	0,663	0,00007
	2	0,663		
	3	0,663		
T5	1	0,675	0,675	0,00008
	2	0,675		
	3	0,675		
T6	1	0,680	0,680	0,00006
	2	0,680		
	3	0,680		
T7	1	0,672	0,672	0,00008
	2	0,672		
	3	0,672		
T8	1	0,632	0,649	0,02924

2 0,632

3 0,683

X: promedio; σ : desviación estándar.**Tabla 4.7***Deformación volumétrica de la muestra en la impregnación a vacío en fibra de algodón.*

Tratamiento	Corrida	γ		
		(m ³ deformación/m ³ fibra de fibra de fique)	X	σ
T1	1	0,554	0,565	0,010
	2	0,566		
	3	0,574		
T2	1	0,680	0,648	0,270
	2	0,381		
	3	0,921		
T3	1	0,288	0,251	0,058
	2	0,186		
	3	0,284		
T4	1	0,718	0,721	0,091
	2	0,633		
	3	0,815		
T5	1	0,489	0,484	0,072
	2	0,556		
	3	0,412		
T6	1	0,901	0,755	0,138
	2	0,627		
	3	0,736		
T7	1	0,513	0,564	0,054
	2	0,562		
	3	0,620		
T8	1	0,608	0,598	0,034

2	0,561
3	0,626

X: promedio; σ : desviación estándar.

Tabla 4.8

Porosidad real (ϵ_r) y porosidad efectiva (ϵ_e) de fibra de algodón.

Tratamiento	Corrida	Porosidad real (ϵ_r)	Porosidad efectiva (ϵ_e)	X porosidad real	σ	X Porosidad efectiva	σ
T1	1	0,640	0,218	0,633	0,006	0,221	0,013
	2	0,627	0,237				
	3	0,632	0,211				
T2	1	0,610	0,155	0,628	0,031	0,151	1,132
	2	0,663	1,206				
	3	0,608	-1,056				
T3	1	0,615	0,246	0,625	0,019	0,272	0,056
	2	0,646	0,334				
	3	0,612	0,230				
T4	1	0,615	0,167	0,621	0,012	0,091	0,368
	2	0,635	0,409				
	3	0,613	-0,315				
T5	1	0,610	0,429	0,624	0,021	0,398	0,056
	2	0,612	0,332				
	3	0,647	0,431				
T6	1	0,620	-0,514	0,626	0,013	0,180	0,733
	2	0,615	0,947				
	3	0,641	0,113				
T7	1	0,626	0,338	0,619	0,007	0,286	0,055
	2	0,620	0,288				
	3	0,612	0,229				
T8	1	0,625	0,155	0,647	0,026	0,254	0,089

2	0,640	0,271
3	0,676	0,330

1	7	77,807	109,426	116,403	124,662	116,339	77,165	107,535	109,499	120,477	112,956	0,908	2,674	9,765	5,919	4,785
2		76,522	105,645	102,594	116,292	109,573										
1	8	68,865	86,734	116,098	106,750	108,193	73,683	93,665	107,366	105,601	105,756	6,813	9,802	12,350	1,625	3,446
2		78,501	100,596	98,633	104,452	103,319										
1	9	68,579	81,441	110,841	99,037	101,353	73,669	90,147	105,861	98,993	102,593	7,198	12,312	7,044	0,062	1,753
2		78,760	98,852	100,880	98,949	103,832										
1	10	67,344	80,929	99,114	85,093	98,813	71,006	85,879	97,417	92,090	97,872	5,180	7,000	2,401	9,896	1,331
2		74,669	90,828	95,719	99,088	96,931										
1	11	55,962	80,994	100,008	92,247	97,235	65,756	86,868	96,716	93,426	95,438	13,851	8,307	4,656	1,667	2,540
2		75,551	92,742	93,423	94,604	93,642										
1	12	44,111	73,546	98,391	91,777	96,234	57,584	81,330	96,906	91,136	96,612	19,054	11,009	2,099	0,906	0,534
2		71,057	89,114	95,422	90,496	96,989										

Tabla 5.2.

Datos experimentales de elongación total a fuerza máxima.

Corrid a	Tiempo (Semanas)	T1	T2	T4	T5	T3	XT1	XT2	XT4	XT5	XT3	σ T1	σ T2	σ T4	σ T5	σ T3
1	0	20,105	48,971	24,026	51,628	34,165	20,182	46,308	21,617	50,176	35,767	0,108	3,767	3,406	2,053	2,266
2		20,259	43,645	19,209	48,725	37,370										
1	1	17,088	45,951	22,441	44,849	33,279	16,448	43,972	20,481	45,188	33,195	0,906	2,800	2,772	0,481	0,119
2		15,807	41,992	18,521	45,528	33,110										
1	2	16,414	43,721	20,910	44,019	32,465	15,450	42,639	19,442	44,540	32,233	1,363	1,531	2,075	0,738	0,328

Anexo 6. Calidad de ajuste del modelo de Page ajustado a la cinética de pérdida de propiedades mecánicas para cada tratamiento en campo.

6.1 Calidad de ajuste del modelo de Page ajustado a la cinética de pérdida resistencia a la tracción para cada tratamiento en campo.

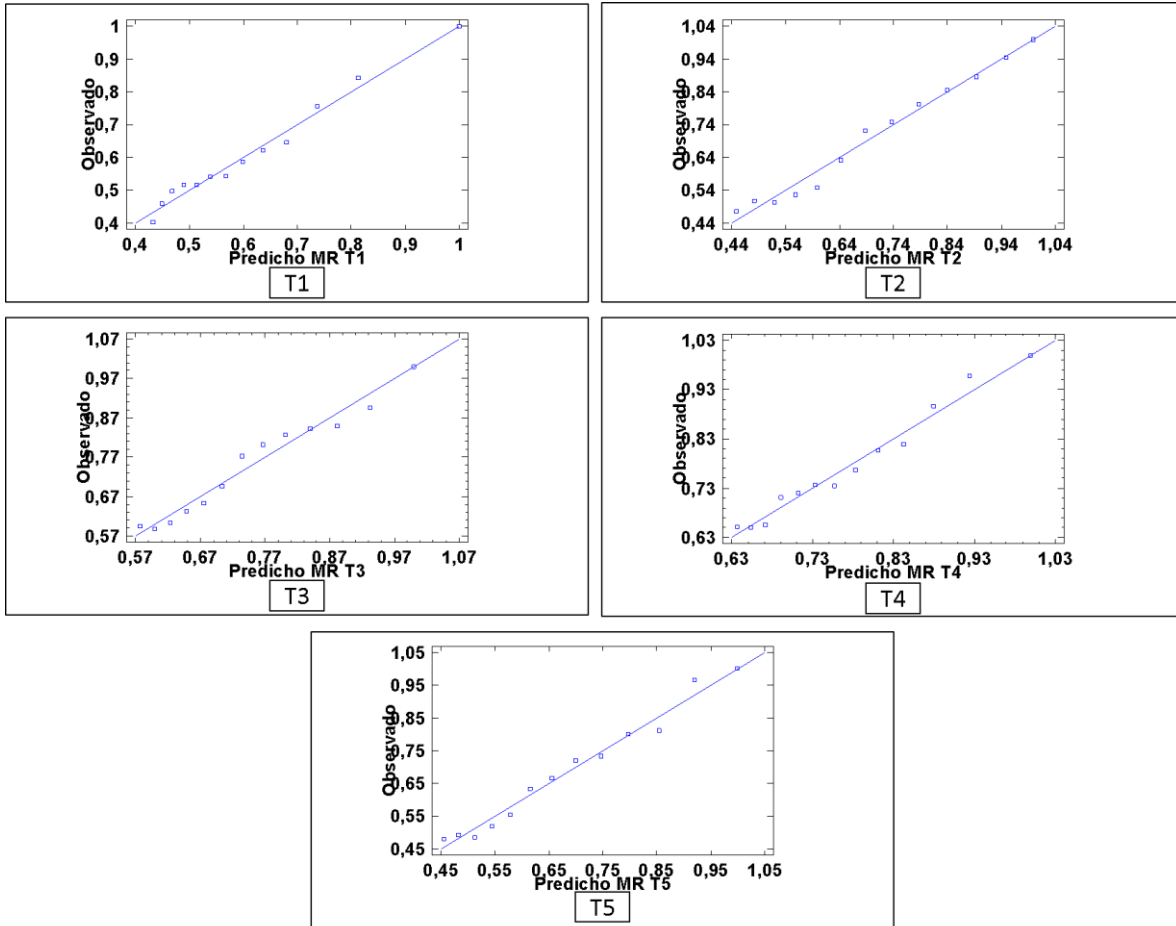


Figura 6.1. Calidad de ajuste del modelo de Page ajustado a la cinética de pérdida resistencia a la tracción para cada tratamiento en campo.

6.2 Calidad de ajuste del modelo de Page ajustado a la cinética de pérdida de elongación total a fuerza máxima para cada tratamiento en campo.

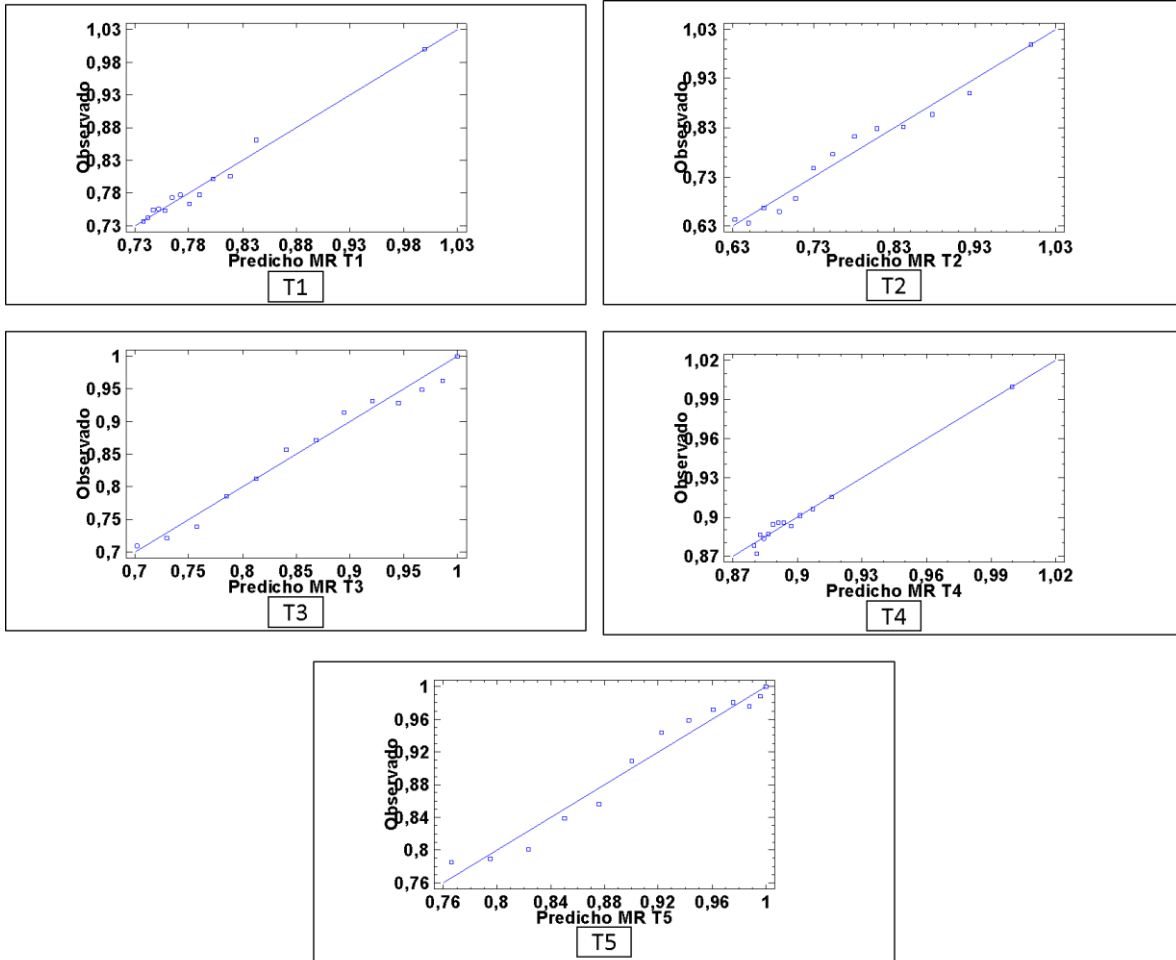


Figura 6.2. Calidad de ajuste del modelo de Page ajustado a la cinética de pérdida de elongación total a fuerza máxima para cada tratamiento en campo.

6.3 Calidad de ajuste del modelo de Page ajustado a la cinética de módulo de Young para cada tratamiento en campo.

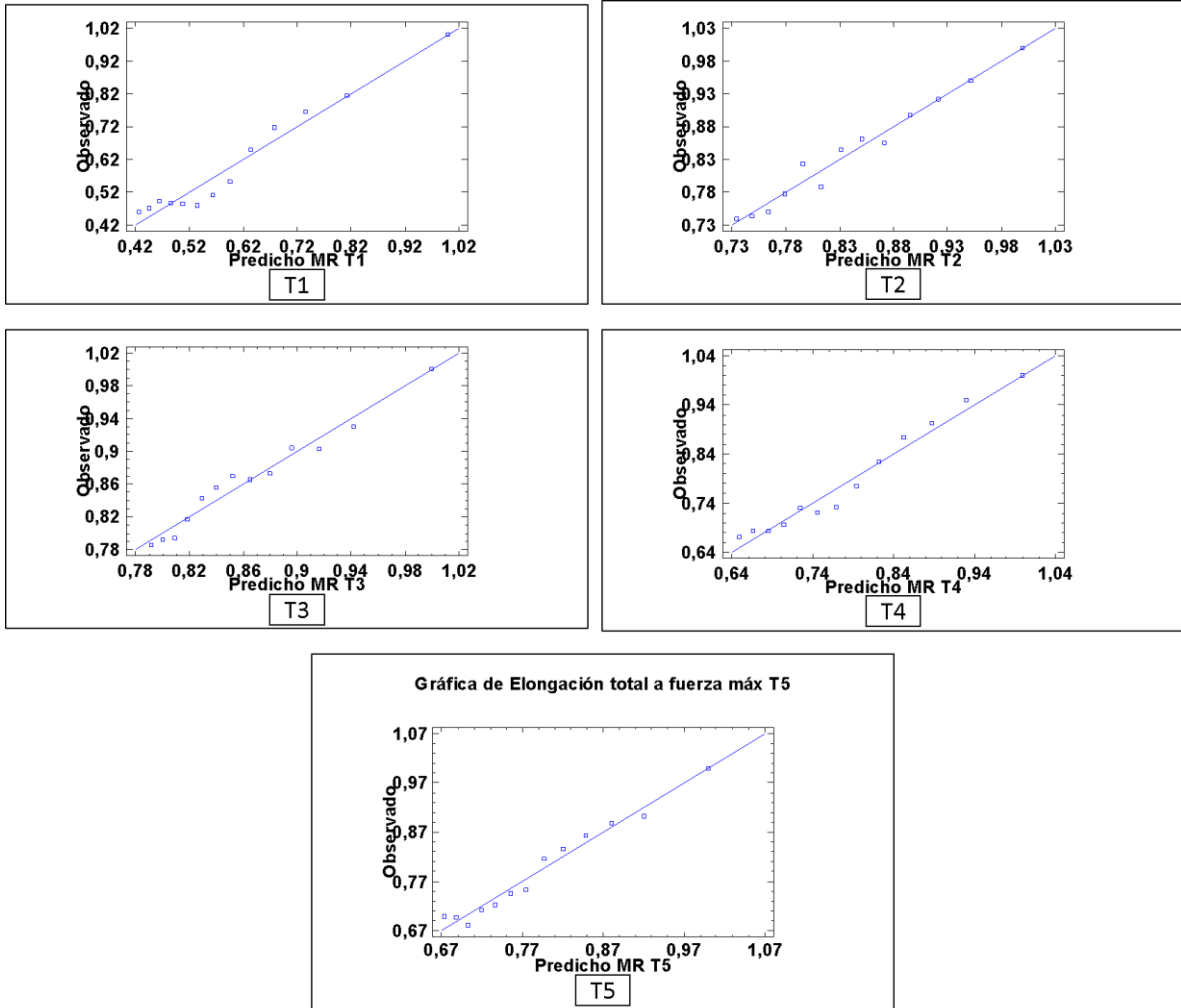


Figura 6.3. Calidad de ajuste del modelo de Page ajustado a la cinética de módulo de Young para cada tratamiento en campo.

Anexo 7. Datos estadísticos del modelo de Page a la cinética de pérdida de propiedades mecánicas de fibras vegetales.

7.1 Datos estadísticos del modelo de Page a la cinética de pérdida de resistencia a la tracción de fibras vegetales.

7.1 *Resumen estadístico para k para resistencia a la tracción.*

FIBRA	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coficiente de Variación	Mínimo	Máximo
T1	2	0,206766	0,00355958	1,72155%	0,204249	0,209283
T2	2	0,0519408	0,00232461	4,47551%	0,050297	0,0535845
T3	2	0,075968	0,0576589	75,8989%	0,035197	0,116739
T4	2	0,0789627	0,00914579	11,5824%	0,0724957	0,0854298
T5	2	0,0842758	0,0171574	20,3586%	0,0721437	0,0964079
Total	10	0,0995827	0,0611655	61,4218%	0,035197	0,209283

Tabla 7.2

ANOVA para k para resistencia a la tracción por FIBRA.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,0299503	4	0,00748758	10,06	0,0131
Intra grupos	0,00372064	5	0,000744129		
Total (Corr.)	0,033671	9			

Tabla 7.3

Pruebas de Múltiple Rangos para k para resistencia a la tracción por FIBRA Método: 95,0 porcentaje LSD.

FIBRA	Casos	Media	Grupos Homogéneos
T2	2	0,0519408	X
T3	2	0,075968	X
T4	2	0,0789627	X
T5	2	0,0842758	X
T1	2	0,206766	X

7.2 Datos estadísticos del modelo de Page a la cinética de pérdida de elongación total a fuerza máxima de fibras vegetales.

Tabla 7.4

Resumen Estadístico para k elongación total a fuerza máx.

FIBRA	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo
T1	2	0,211413	0,0776361	36,7225%	0,156516	0,26631
T2	2	0,0523819	0,0450295	85,9639%	0,0205412	0,0842225
T3	2	0,0635109	0,0621703	97,8891%	0,0195499	0,107472
T4	2	0,0721664	0,0272513	37,7618%	0,0528968	0,091436
T5	2	0,0836319	0,0356851	42,6692%	0,0583987	0,108865
Total	10	0,0966208	0,0729771	75,5294%	0,0195499	0,26631

Tabla 7.5

ANOVA para k elongación total a fuerza máx. por FIBRA.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,0339947	4	0,00849866	3,05	0,1264
Intra grupos	0,0139362	5	0,00278724		
Total (Corr.)	0,0479309	9			

Tabla 7.6

Pruebas de Múltiple Rangos para k elongación total a fuerza máx. por FIBRA Método: 95,0 porcentaje LSD.

FIBRA	Casos	Media	Grupos Homogéneos
T2	2	0,0523819	X
T3	2	0,0635109	X
T4	2	0,0721664	X
T5	2	0,0836319	XX
T1	2	0,211413	X

7.3 Datos estadísticos del modelo de Page a la cinética de pérdida de elongación total a fuerza máxima de fibras vegetales.

Tabla 7.7

Resumen Estadístico para k para módulo de Young.

FIBRA	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo
T1	2	0,171072	0,0340104	19,8808%	0,147023
T2	2	0,0802103	0,00874691	10,905%	0,0740253
T3	2	0,0118984	0	0%	0,0118984
T4	2	0,0880302	0,0209754	23,8275%	0,0731983
T5	2	0,00321852	0,000432933	13,4513%	0,00291239
Total	10	0,0708859	0,065512	92,419%	0,00291239

Tabla 7.8

ANOVA para k para módulo de Young por FIBRA.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,036953	4	0,00923826	27,60	0,0013
Intra grupos	0,00167337	5	0,000334674		
Total (Corr.)	0,0386264	9			

Tabla 7.9

Pruebas de Múltiple Rangos para k para módulo de Young por FIBRA Método: 95,0 porcentaje LSD.

FIBRA	Casos	Media	Grupos Homogéneos
T5	2	0,00321852	X
T3	2	0,0118984	X
T2	2	0,0802103	X
T4	2	0,0880302	X
T1	2	0,171072	X