



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Elaboración de un material biocompuesto a partir de la fibra de plátano

Lady Joana Rodríguez Sepúlveda

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Industrial
Manizales, Colombia

2014

Elaboración de un material biocompuesto a partir de la fibra de plátano

Process for manufacturing of biocomposite material based on plantain fibers

Lady Joana Rodríguez Sepúlveda

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título
de:

Magister en Ingeniería Industrial

Director:

Ph.D. Carlos Eduardo Orrego Alzate

Codirector (a):

Ph.D. William Ariel Sarache Castro

Grupo de Investigación:

Alimentos Frutales

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Industrial

Manizales, Colombia

2014

Agradecimientos

Al grupo de trabajo Instituto de Biotecnología y Agroindustria y al Grupo de Alimentos-Frutales

Al programa de Colciencias: Jóvenes investigadores 566/2012

Universidade do Minho y en especial al Dr. Raúl Figueiro y su equipo de trabajo, por los conocimientos adquiridos de fibras naturales y compuestos.

Al Dr. Carlos Eduardo Orrego director de la tesis y profesor de la Universidad Nacional

Al Dr. William Ariel Sarache codirector de la tesis y profesor de la Universidad Nacional

A mi familia y a todas las personas que estuvieron cerca apoyándome

Y principalmente a Dios

Resumen

Las fibras del seudotallo de plátano (FSP) fueron tratadas con anhídrido acético (AA), epiclorhidrina (EP) y la mezcla de anhídrido acético y epiclorhidrina (AA_EP). Se fabricaron materiales biocompuestos con FSP en matriz de poliéster, utilizando FSP tratada y sin tratar, mediante la técnica de moldeo manual. Se hicieron análisis de las fibras, los resultados de Raman revelaron nuevos enlaces químicos que confirmaron la sustitución de parte de los grupos hidroxilo de la fibra en bruto, lo que dio lugar a la disminución de hidrofiliadad de las fibras tratadas. Los ensayos de absorción de agua y resistencia mecánica de la FSP no tratadas y compuestos de poliéster con FSP modificada demostraron una notable reducción en la absorción de agua y un aumento significativo de la resistencia mecánica de los materiales compuestos. Se identificaron centros de abastecimiento para el transporte y extracción de la fibra aplicado en el municipio de Manizales.

Palabras clave: Biocompuestos, Fibras de plátano, Poliéster, Anhídrido Acético, Epiclorhidrina, Hidofiliadad, Cadena de abastecimiento verde.

Abstract

Banana-plantain fibers (BPFs) were treated with acetic anhydride (AA), epichlorohydrin (EP) and an acetic anhydride-epichlorohydrin blend (AA_EP). Natural fiber-polyester composites (PCs) were fabricated using untreated and treated BPF by the hand lay-up technique. Modified BPF Raman analysis revealed new chemical bonds that confirmed the replacement of part of the raw fiber hydroxyl groups, which gave rise to a decrease of hydrophilicity in the treated fibers. Assays of water absorption and mechanical resistance for untreated BPF and modified BPF polyester composites demonstrated a remarkable reduction in water intake and a significant increase in mechanical strength for the modified BPF polyester composites. Supply centers for transport and fiber extraction applied to the city of Manizales were identified.

Keywords: Biocomposites, Banana/plantain fibers, Polyester, acetic anhydride, epichlorohydrin, Hidrophilicity, Green supply chain.

Contenido

	Pág.
Resumen	IV
Lista de figuras	VIII
Lista de tablas	X
Lista de abreviaturas	XI
Introducción	1
Objetivos y Metodología	3
Antecedentes y Justificación	5
Marco Teórico	
1. Materiales compuestos.	8
2. Fibras Naturales como refuerzo de materiales compuestos: biopolímeros y su modificación superficial.	12
3. Caracterización de los Biopolímeros, fibras naturales y compuestos.	16
4. Planeación del abastecimiento como parte de la cadena de logística.	22
1. Capítulo 1: Modificación superficial de las fibras delseudotallo de plátano con anhídrido acético y epiclohidrina.	
1.1. Materiales y métodos	25
1.1.1. Preparación de las Fibras	25
1.1.2. Reactivos	25
1.1.3. Tratamientos químicos	25
1.1.4. Análisis Raman	25
1.1.5. Isotermas de absorción de agua	26
1.1.6. Hinchamiento en agua	26
1.1.7. Medida de ángulo de contacto	26
1.1.8. Resistencia química	27
1.1.9. Análisis termo gravimétrico (TGA)	27
1.1.10. Prueba mecánica	27
1.1.11. Espectroscopia electrónica de barrido (SEM)	27
1.2 Resultados y discusión	27
1.2.1 Análisis Raman	29
1.2.2 Isotermas de adsorción de agua	30
1.2.3 Hinchamiento en agua	31
1.2.4 Ángulo de contacto	32
1.2.5 Resistencia química	32
1.2.6 Análisis termo gravimétrico	34

1.2.7 Prueba mecánica	35
1.2.8 Morfología SEM	38
1.3 Conclusiones	39
2. Capítulo 2: Elaboración de un material biocompuesto a partir de las fibras de plátano	
2.1 Materiales y métodos	41
2.1.1 Preparación de las fibras	41
2.1.2 Preparación del compuesto	42
2.1.3 Prueba de tensión	51
2.1.4 Prueba de impacto	52
2.1.5 Absorción de agua	53
2.1.6 Resistencia química	53
2.1.7 Microscopía ESEM	53
2.2 Resultados y discusión	53
2.2.1 Prueba de tensión	54
2.2.2 Prueba de impacto	58
2.2.3 Absorción de agua	59
2.2.4 Resistencia química	63
2.2.5 Micrografías ESEM	64
2.3 Conclusiones	66
3. Capítulo 3: Estructura general de la cadena de abastecimiento inversa, para la utilización de la fibra del pseudotallo de plátano/banana en el municipio de Manizales: ubicación de centros de acopio	
3.1 Identificación de la cadena de abastecimiento para la producción y transporte de la fibra de plátano y banano	70
3.1.1 Cadena de abastecimiento directa para la producción de plátano/banano	70
3.1.2 Cadena de abastecimiento inversa para la fibra de plátano y banano	71
3.2 Propuesta para la ubicación de los centros de acopio: municipio de Manizales	74
3.2.1 Potencial de fibra de plátano y banano en el municipio de Manizales	74
3.2.2 Evaluación de los ingresos adicionales de los agricultores	75
3.2.3 Propuesta para la ubicación de los centros de acopio	77
3.3 Conclusiones	79
4. Conclusiones Generales	80
Recomendaciones	83
Producción Bibliográfica	84
Referencias	86

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 Clasificación de las fibras naturales vegetales.	13
Figura 2 Representación esquemática de los componentes químicos de las fibras.	13
Figura 3 Sección transversal y representación esquemática de las fibras celulósicas del tallo.	14
Figura 4 a. Variación del diámetro a lo largo de la longitud de la fibra (50). b. Sección hexagonal (69). c. Defectos (51). d. Lumen (50). e. Porosidad (68).	17
Figura 5 a. Isotermas de absorción de fibras naturales (15) y b. porcentaje de absorción de agua en materiales compuestos (17).	21
Figura 6 Visión esquemática del método de los centro de consumo.	23
Figura 1-1 Reacción de los grupos hidroxilos de la fibra asociado a los tratamientos químicos.	28
Figura 1-2 Estroscopia Raman para las FSP tratadas y sin tratar.	29
Figura 1-3 Isotermas de absorción de agua para las FSP: Sin tratar (■), EP (●), AA_EP (▲) y AA (▼). a. Actividad de agua y b. % de humedad relativa.	31
Figura 1-4 Hinchamiento. Porcentaje de hinchamiento (Ecuación 1.1) de las FSP tratadas y sin tratar justo después de realizar el ensayo (■) y 6 meses después (▼).	31
Figura 1-5 Fotografías de algunos ensayos de ángulos de contacto medios y desviación estándar de las FSP. a. Sin tratamiento 92.21 b. AA c. EP d. AA_EP.	32
Figura 1-6 Resistencia a ambientes a. ácidos y b. alcalinos, expresados en porcentaje de resistencia química (Eq. 2) recién elaborado el compuesto (■) y seis meses después (▼). Condiciones de almacenamiento (20°C, 62 ± 2% HR).	33
Figura 1-7 Curvas típicas de a. TGA y su derivada b. FTG de las FSP.	34
Figura 1-8 Curva representativa de tensión vs. deformación de las FSP tratadas y sin tratar.	36
Figura 1-9 a. Resistencia convencional Mpa b. Resistencia convencional específica Mpa/(g/cm ³). Fibras FSP del presente trabajo y fibras de banano y vidrio reportadas.	37
Figura 1-10 a. Módulo de Young Gpa b. Módulo de Young específico Gpa/(g/cm ³). Fibras FSP del presente trabajo y fibras de banano y vidrio reportadas.	38
Figura 1-11 Micrografías SEM de las FSP. Superficie de a. Sin tratamiento, b. AA, c. EP, d. AA_EP.	39
Figura 1-12 Sección transversal de FSP a. sin tratamiento, b. AA, c. EP y d. AA_EP.	39
Figura 2-1 Prototipos de materiales bio-compuestos a partir de fibras naturales tejidas.	41
Figura 2-2 Fibras tejidas de a. sisal b. lino c. plátano d. fique y e. vidrio.	42
Figura 2-3 Diagrama analítico del proceso moldeo manual.	44

	Pág.
Figura 2-4 Ideograma del proceso de infusión para la elaboración de materiales compuestos.	46
Figura 2-5 Diagrama analítico del proceso infusión.	49
Figura 2-6 Ideograma para el proceso de moldeo manual.	50
Figura 2-7 a. Máquina universal de tensión, b. Probetas de materiales compuestos para la realización de la prueba de tensión.	52
Figura 2-8 a. Máquina prueba de impacto, b. PPB para la realización de la prueba de impacto.	52
Figura 2-9 a. Máquina para prueba de absorción b. Probetas de los diferentes tipos de compuestos.	53
Figura 2-10 Resultados de la prueba de tensión. a. Materiales compuestos de las FSP b. Todos los materiales compuestos.	55
Figura 2-11 a. Módulo de Young Gpa b. Módulo de Young específico Gpa/(g/cm ³). Compuestos FSP, fique y vidrio.	57
Figura 2-12 Resultados de la prueba de impacto a las diferentes clases de materiales compuestos.	58
Figura 2-13 Porcentaje de absorción de agua de los diferentes tipos de compuestos. a. Agua a temperatura ambiente 23°C y b. Agua a en punto de ebullición 93°C. FSP.	60
Sin tratar (■), AA (●), EP (▲), AA_EP (▼), V (□) y F (◄).	
Figura 2-14 Porcentaje de absorción de agua de los diferentes compuestos después de 24 h.	61
Figura 2-15 Diferentes vistas de las probetas de materiales compuestos (FSP, F y V) después de realizada la prueba de absorción de agua.	62
Figura 2-16 Resistencia a ambientes a. Ácidos (HCl) y b. Alcalinos (NaOH), expresados en porcentaje de resistencia química (Eq. 1). FSP Sin tratar (■), AA (●), AA_EP (▲), EP (□), V (◄) y F (►).	63
Figura 2-17 Micrografías ESEM de los diferentes materiales compuestos a. U, b. AA, c. AA_EP y d. EP.	64
Figura 2-18 Micrografías ESEM de los diferentes materiales compuestos a. U, b. AA, c. AA_EP y d. EP.	65
Figura 2-19 Comparación de los compuestos de FSP tratadas y sin tratar con las fibras de fique y vidrio a. FSP sin tratar, b. AA, c. AA_EP, d. EP, e. F y f. V.	66
Figura 3-1 a. Cadena logística directa de la producción y distribución del cultivo de plátano/banano, b. Logística inversa para la producción de fibra del pseudotallo de plátano/banano c. comercialización del plátano/banano.	71
Figura 3-2 Morfología de la planta de plátano/banano. Adaptado de Champion, 1978. Uso integral de la planta.	72
Figura 3-3 Diagrama analítico para la extracción de la fibra por método mecánico.	73
Figura 3-4 Localización geográfica de los cultivos de plátano y banano en el municipio de Manizales (1) Plantas de plátano sembrada (2) Plantas de banano sembradas (3) Hectáreas (4) Producción de kg/año.	75
Figura 3-5 Localización de los centros de acopio por corregimiento: a. La Cristalina, b. Panorama, c. Agroturístico y d. El remanso.	78

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Comparación de algunas propiedades de la resina: poliéster y epóxica.	10
Tabla 2. Ventajas y Desventajas de la resina de poliéster y epóxica.	10
Tabla 3. Porcentaje de componentes de las fibras naturales.	13
Tabla 4. Diámetros de fibra de banano y otras fibras.	18
Tabla 5. Valores de las propiedades de algunas fibras naturales y sintéticas.	18
Tabla 6. Diferentes biocompuestos con fibras naturales y poliéster.	18
Tabla 1-1 Comparación del contenido de humedad de la fibra ($\text{kg}_w/100 \text{ kg}_{\text{fiber}}$) en aire a 85 % HR.	30
Tabla. 1-2 Comparación de la resistencia química de las FSP tratadas y sin tratar. Valores en porcentaje de pérdida de peso (Eq. 2) después del tiempo de ensayo.	33
Tabla 1-3 Datos de las corridas de TGA para las FSP tratadas y sin tratar.	34
Tabla 1-4 Diámetro medio de las fibras tratadas y sin tratar. En comparación con los dos últimos datos de otras publicaciones de las FSP sin tratar.	35
Tabla 1-5 Propiedades mecánicas medias de las FSP tratadas y sin tratar.	36
Tabla 2-1 Resultados de la prueba de tensión de PPB de las FSP tratadas y sin tratar, fique y vidrio.	54
Tabla 2-2 Comparación de diferentes resultados de la prueba de tensión de materiales compuestos.	56
Tabla 2-3 Comparación de diferentes resultados de la prueba de tensión de materiales compuestos.	59
Tabla 2-4 Porcentaje de absorción de agua, después de 24 h de inmersión a temperatura ambiente.	62
Tabla 3-1 Estimación de la producción de fibra en los corregimientos y municipio de Manizales.	75
Tabla 3-2 Enfoque de venta de la fibra y del fruto.	76
Tabla 3-3 Ejemplo de los ingresos para una pequeña finca típica con 50 plantas de banano plátano.	76
Tabla 3-4 Cálculo de la quinta iteración para la ubicación de los centros de almacenamiento por el método de los centros de gravedad.	77

Lista de abreviaturas

Abreviatura	Término
FSP:	Fibras extraídas del pseudotallo de plátano.
PPB:	Placas prototipo de biocompuesto.
AA:	Anhídrido acético.
EP:	Epiclorhidrina.
AA_EP:	Anihídrido acético y epiclorhidrina.
HR:	Humedad relativa .
F:	Fique.
V:	Vidrio.

Introducción

La protección del medio ambiente y el desarrollo sostenible han fomentado las investigaciones en temas como: el reciclaje, la disminución en emisión de gases y el uso de materia prima de origen natural, renovable y biodegradable [1, 2]. Esta tendencia y las regulaciones gubernamentales en muchos países promueven las alternativas industriales basadas en conceptos productivos como: eco-productos, reordenamiento de la cadena logística [3] y sistemas limpios de producción [4], entre otros.

Las fibras naturales, conformadas principalmente por biopolímeros, han sido utilizadas desde hace muchos años especialmente en la industria textil. Su producción es una actividad que ejemplifica el enfoque de economía verde, por ser materiales de origen natural, renovables y al final del ciclo de vida completamente biodegradables [1, 2, 5]. A nivel económico la producción, procesamiento y exportación de fibras naturales, benefician a millones de agricultores y procesadores, principalmente de países en vía de desarrollo [6].

Colombia es uno de los mayores productores en el mundo de banano y plátano, de los cuales más del 85% de su biomasa es dejada en zona de cultivo [7]. La fibra de estos productos es extraída del pseudotallo de la planta -FSP-, la cual tiene características similares a las de fique y el sisal.

El término biocomposito o biocompuesto se refiere a todo material formado por una matriz (resina) y un reforzamiento de fibras naturales (usualmente derivadas de plantas o celulosa). Los biocompuestos, en algunos casos gracias a mejoras tecnológicas que les brindan propiedades específicas, pueden llegar a soportar altas cargas estructurales, haciéndolos útiles en muchas áreas. Dentro de sus variadas aplicaciones se resaltan actualmente las asociadas a las industrias de la construcción y automotriz, sistemas de liberación controlada, ingeniería de tejidos biológicos y en empaques para alimentos.

Para su aplicación óptima en materiales compuestos las fibras naturales habitualmente se modifican química o físicamente. Dos productos químicos que pueden usarse para modificar fibras son la epíclorhidrina y el anhídrido acético. El primero de ellos ha sido utilizado como entrecruzador de los grupos OH de biopolímeros para hacerlos más hidrofóbicos e insolubles en agua [8, 9], de manera semejante al glutaraldehído [10]. Con el anhídrido acético se han acetilado el quitosano y la celulosa [11, 12]. Sin embargo, hasta el momento de escribir este documento no se han reportado tratamientos de modificación de fibras de plátano con alguno de los dos mencionados reactivos.

En el presente trabajo se probarán los efectos de tratamientos superficiales que combinen epiclorhidrina y anhídrido acético para intentar reducir su afinidad por el agua, que es una de las características que hace que la fibra sea fácilmente atacada por agentes químicos y biológicos, con la consecuente reducción de sus propiedades mecánicas y su vida útil.

Las FSP tratadas químicamente se utilizaron para obtener placas prototipo de biocompuestos -PPB-, con matriz de poliéster. Dos procesos de fabricación son descritos: infusión y moldeo manual, este último es caracterizado y los PPB comparados con la fibra de fique y vidrio. Se espera puedan ser competitivas técnicamente con otros materiales similares de muy baja o nula biodegradabilidad que preponderan actualmente en el mercado.

Por último se describe el proceso de extracción de la fibra mediante el uso de una máquina desfibradora para la obtención de FSP de residuos de los cultivos, como el primer paso de la cadena logística verde de cultivos comerciales de banano y plátano [13]. Después de acuerdo con la metodología de centros de gravedad, se evalúa la ubicación de los centros de acopio de fibra para cada uno de los cuatro corregimientos de producción en la que la zona rural de Manizales.

Objetivos y Metodología

Objetivos

General:

Elaborar y caracterizar biocompuestos basados en fibra del pseudotallo de plátano- FSP.

Específicos:

Mejorar y/o estandarizar las propiedades de las FSP.

Fabricar y caracterizar prototipos de biocompuestos basados en FSP modificadas.

Identificar los elementos de la cadena de abastecimiento del producto para su futura industrialización.

Metodología general

En la fase inicial se realizó una fundamentación teórica enfocada a los materiales y procedimientos desarrollados en el presente trabajo, como lo son las fibras naturales vegetales, modificaciones químicas, preparación de compuestos, caracterización mecánica, física y química de esta clase materiales y por último los principales elementos logísticos de abastecimiento.

Para el cumplimiento de los objetivos, primero fueron extraídas las FSP en una máquina desfibradora de acuerdo a la metodología planteada por Rodríguez [14]. Posteriormente fueron realizadas modificaciones químicas, con el objetivo de mejorar o estandarizar las características de FSP. La acetilación con anhídrido acético y epicorhidrina (Instituto de Biotecnología y Agroindustria), fue realizada de acuerdo a los procedimientos propuestos por Bessadok y Singha [15, 16]. Después fue realizada la experimentación pertinente mediante diferentes pruebas de laboratorio: análisis Raman, isotermas de adsorción de agua, hinchamiento en agua, resistencia química, análisis termo gravimétrico, prueba de tensión y morfología SEM, para observar los efectos de los tratamientos.

A partir de estos resultados y con fibras sin modificar, modificadas y otras del mercado, fueron fabricadas a nivel de laboratorio, piezas de materiales compuestos con matriz de poliéster. Estos procesos fueron debidamente descritos para estandarizar la metodología. Fueron caracterizadas las propiedades por prueba de tensión, de impacto, absorción de agua y micrografías ESEM de acuerdo a metodologías como Mysami [17] y fueron comparadas con compuestos sucedáneos de fibra de vidrio y fique encontrados en el

mercado. Con esto se evaluó el potencial de las posibles aplicaciones industriales de la fibra extraída del seudotallo de plátano.

Por último fueron identificados los elementos logísticos, mediante la descripción de la cadena de abastecimiento directa para la producción de plátano y banano. A partir de la cosecha y como parte del proceso de una cadena abastecimiento verde (reciclaje de los residuos generados por el cultivo), fue descrito un planteamiento para la recolección del pseudotallo y producción de fibra. De acuerdo a la cantidad de producto estimado, fueron propuestos centros de acopio con la metodología de centros de gravedad, para usar una máquina desfibradora por corregimiento en el municipio de Manizales.

Antecedentes

Los antecedentes más inmediatos de esta propuesta se encuentran en el trabajo de grado de pregrado “Formular alternativas basadas en tecnología de acumulación para el uso eficiente de la cadena de valor del plátano”, parte de cuyos resultados se publicaron en el libro “Cadena de valor en el sector primario El caso del plátano”. En estos estudios obtuvieron resultados promisorios relativos a la utilización de un recurso que se está perdiendo en zona de cultivo y el potencial como impacto social en su aplicación, al ser los campesinos los más beneficiados con esta clase de investigaciones inicialmente en el municipio de Manizales y posteriormente con una mayor cobertura geográfica [7].

En el grupo de investigación Alimentos-frutales de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales se han desarrollado varias investigaciones en las que se han hecho modificaciones químicas a biopolímeros para utilizarlos como soportes para enzimas y matrices de encapsulación y liberación controlada de bioactivos. Se consideró entonces que, como se mencionó anteriormente, las FSP están constituidas principalmente por biopolímeros, estas técnicas podrían ser útiles para alterarlas favoreciendo su aplicación como relleno de materiales compuestos.

Justificación

Colombia figura como uno de los primeros productores y exportadores a nivel mundial de plátano y banano (*Musa paradisiaca*), según los datos reportados por la FAO año 2011. La zona cafetera es una región productora por excelencia donde se cultiva el 60% del plátano que se produce en el país y el departamento de Caldas ocupa el séptimo puesto a nivel nacional con una producción de 261032.3 toneladas en el año 2010 [18]. Según datos y el estudio realizado por Rodríguez (2010)[7] el 75% de la planta constituyen residuos del pseudotallo, de los cuales el 15% es fibra, con lo que se concluye que hay disponible una gran cantidad de posible materia prima que se está desaprovechando. Por lo tanto son los pequeños agricultores los mayores beneficiarios de un aprovechamiento alternativo de sus recursos.

La fibra vegetal extraída del pseudotallo de plátano -FSP-, es similar a fibras como el sisal y el yute o la cabuya [19, 20], todas ellas son fuente de celulosa y lignina, biopolímeros de alto potencial para ser usados en materiales compuestos de matrices poliméricas y cerámicas, que además pueden ofrecer una posible solución a los problemas de eliminación de residuos asociados con los tradicionales plásticos derivados del petróleo [2]. Estas fibras, además de que tienen características y propiedades específicas importantes, son de costo competitivo, biodegradables y renovables [21]. Por ello son posibles sustituyentes o complementos de los compuestos de relleno no biodegradables como la fibra de vidrio o fibras petroquímicas.

Para la utilización de las fibras naturales en materiales compuestos es necesario estandarizar o mejorar sus propiedades, mecánicas y químicas. Por tal motivo se les puede realizar pre-tratamientos químicos. Estos pre-tratamientos también contribuyen a mejorar su adhesión con la matriz del compuesto o biocompuesto. Posteriormente este material se evalúa técnicamente mediante pruebas mecánicas, resistencia química, absorción de agua, entre otras [22]. La mayor parte de dichas pruebas pueden realizarse en los laboratorios de la Universidad Nacional y, en especial, el Instituto de Biotecnología y Agroindustria de la sede Manizales.

Es así como la mencionada subutilización de una materia prima abundante en Colombia y en el municipio de Manizales, la creciente demanda de materiales biodegradables, los antecedentes en investigaciones de biopolímeros y de otras fibras naturales de origen vegetal, y las crecientes aplicaciones de materiales amigables con el ambiente como los biocompuestos, llevaron a plantear la siguientes pregunta e hipótesis de investigación:

¿Cómo agregarle valor a la fibra extraída del pseudotallo de plátano a partir de diferentes alternativas tecnológicas, para la elaboración de un prototipo de biocompuesto con proyección industrial?

¿Es posible fabricar biocompuestos que tengan un contenido importante de la fibra del pseudotallo de plátano, con características técnicas comparables con compuestos que contienen fibra posicionadas en el mercado como el fique y la fibra de vidrio?

Marco Teórico

1. Materiales Compuestos

Un material compuesto puede ser definido como un sistema de materiales formado por una mezcla o combinación debidamente dispuesta de dos o más micro o macro-constituyentes con una interface que los separa, que difieren en forma y composición química y son esencialmente insolubles entre sí. Estos materiales comprenden una fase continua llamada matriz y una discontinua llamada refuerzo. La matriz es la que contribuye a distribuir y estabilizar los esfuerzos y de proteger. Por otro lado la fase de refuerzo aporta las propiedades mecánicas al material [23]. Los materiales compuestos pueden clasificarse según el tipo de matriz en metálicos, cerámicos y poliméricos. Según el tipo de refuerzo en materiales reforzados con fibras, partículas u hojuelas y estructurales. Las ventajas de esta clase de materiales son la reducción de costos, mayor flexibilidad en nuevos diseños y el cuidado del medio ambiente en los llamados biocompuestos [23].

Los biocompuestos son los materiales compuestos a base de fibra natural/bio y derivados del petróleo: polímeros no biodegradables (PP, PE) o polímeros biodegradables (PLA, PHA). Los compuestos se clasifican en: compuestos verdes, tales como: biofibras-compuestos plásticos, biofibras-compuestos a base de soya y biofibras-compuestos de elastómeros naturales, compuestos híbridos y compuestos de fibras tejidas [24].

Compuestos verdes

Son biocompuestos derivados de fibras vegetales (natural/biofibras) con matrices de biopolímeros o polímeros degradables (biopolímero/bioplástico). Son más ecológicos y también se les denomina materiales verdes [24].

Las principales matrices biodegradables usadas en los compuestos verdes son naturales como polisacáridos (almidón, celulosa y quitina), proteínas (colágeno/gelatina, caseína, albúmina, fibrinógeno y sedas), poliésteres (polihidroxialcanoatos), lignina, lípidos, y gomas. También hay matrices de origen sintético como las poli(amidas), poli(anhídridos), poli(vinil alcohol), poli(vinil acetato), poliésteres (poli(ácido glicólico), poli(ácido láctico), poli(caprolactona) y poli(ortoésteres)) poli(óxido de etileno) y poli(fosfazinas).

Compuestos Híbridos

Este tipo de compuestos se refiere a la incorporación de varios tipos de fibras como refuerzo de una sola matriz. El comportamiento de este compuesto es la suma ponderada de los componentes individuales en el cual hay un balance entre sus inherentes ventajas y desventajas [25].

Se han publicado reportes sobre compuestos híbridos de fibra de plátano y sisal en matriz de poliéster. La resistencia a la tracción de los materiales compuestos se incrementó cuando la fracción de volumen relativo de las dos fibras se varió. Su máxima resistencia a la tracción se encontró para una relación de fibras de plátano y sisal de 4:1[26].

Compuestos tejidos

El desarrollo de tecnologías textiles, tales como tejido, tricotado y trenzado ha dado lugar a la formación de compuestos que tienen propiedades mecánicas superiores, pues la orientación continua de las fibras no se limita en ningún punto. La integridad de este tejido es mantenido por la interconexión de las fibras. Los tipos de tejidos más usados son [24]: plain, sarga, raso, canasta y leno.

Matrices para Biocompuestos

Las matrices poliméricas más usadas como compuestos de fibras son las siguientes [27]: base petroquímica como los termoplásticos (polipropileno (PP), polietileno (PE), poli estireno (PS) y PVC Cloruro de polivinilo) y termo fijos (poliéster, resina epóxica, fenol formaldehído, éster de vinilo). A continuación se describirán los polímeros utilizados en el presente trabajo.

Termofijos

En general las ventajas de este tipo de plásticos tiene que ver con: alta estabilidad térmica, alta rigidez, alta estabilidad dimensional, resistencia a la fluencia y a la deformación bajo carga, peso ligero y propiedades aislantes eléctricas y térmicas altas [28].

Poliéster

Los poliésteres insaturados tienen dobles enlaces covalentes carbono-carbono reactivos que pueden entrecruzarse para formar materiales termofijos, que en combinación con fibras de vidrio, forman materiales compuestos reforzado de alta resistencia [28].

Para este polímero las fibras de plátano fueron estudiadas, se observó que la máxima tensión fue obtenida con una longitud de la fibra de 30 mm, mientras en la prueba de impacto se obtuvo el máximo resultado con una longitud de 40 mm. El tratamiento de las fibras con agente de acoplamiento silano, mejoro la resistencia a la tensión en un 28% y

la resistencia a la flexión en 43%, Ellos mostraron una disminución del 6% en la resistencia a la tracción de las muestras después de envejecimiento térmico y el 9% de disminución de las muestras de mantenerse expuesta al sol y la lluvia durante 6 meses [29].

Resina epóxica:

Presentan buenas propiedades de adhesión a otros materiales, resistencia química y al medio ambiente, resistencia mecánica y de aislante eléctrico. El bajo peso molecular de las resinas epóxicas no curadas en estado líquido, les imparte una movilidad molecular excepcionalmente alta durante el procesado. Esta propiedad permite que la resina epóxica líquida cubra rápida y totalmente superficies húmedas [28]. En las tablas 1 y 2 se muestra una comparación de algunas propiedades de la resina poliéster, epóxica y vinil-éster.

Tabla 1. Comparación de algunas propiedades de la resina: poliéster y epóxica [30].

Propiedades	Resina poliéster	Resina epóxica
Densidad (g/cm ³)	1.2-1.5	1.1-1.4
Módulos de Young (GPa)	2.0-4.5	3.0-6.0
Resistencia a la tensión (MPa)	40.0-90.0	35.0-100.0
Resistencia a la compresión (MPa)	90.0-250.0	100.0-200.0
Elongación (%)	2.0	1.0-6.0
Absorción de agua 24h a 20°C (%)	0.1-0.3	0.1-0.4

Tabla 2. Ventajas y Desventajas de la resina de poliéster y epóxica [30].

Resina	Ventajas	Desventajas
Poliéster	Fácil para usar. La resina disponible con mas bajo costo.	Solo moderadas propiedades mecánicas. Alta concentración de curado Altas emisiones de estireno
Epóxica	Altas propiedades mecánicas y térmicas. Alta resistencia al agua.	Mas alto costo que el poliéster. Su manejo es corrosivo.

Fabricación del Biocompuesto

Un enfoque efectivo para la fabricación de biocompuestos de propiedades superiores, incluye la modificación química eficaz, eficiente y económica de la fibra, la modificación de la matriz de funcionalización y la combinación de técnicas de procesamiento. En cuanto a la fibra se debe tener en cuenta el tipo, las condiciones ambientales de crecimiento, la composición química, los ángulos de las microfibras, los defectos, la estructura, las propiedades físicas y mecánicas y la interacción de la fibra con el polímero, entre otros [24] [27].

Técnicas de procesamiento

Generalmente estos materiales son fabricados con técnicas tradicionales, tales como [27]: moldeo por compresión, extrusión, moldeo por inyección, moldeo manual, moldeo por transferencia de resina RTM, infusión, entre otras. Técnicas que hay sido mejoradas constantemente para producir materiales compuestos con una calidad controlable.

Principales factores que influyen en el procesamiento:

Humedad relativa: este tiene gran efecto sobre el comportamiento biológico de este tipo de compuestos, por lo tanto el secado previo de la fibra es de suma importancia. Los tratamientos realizados deben lograr disminuir el contenido de humedad y la velocidad de absorción. Es de señalar que las matrices mencionadas de biopolímeros pueden ser más sensibles que las fibras naturales. Esta humedad afecta las propiedades finales del material, hoy se ha diseñado un nuevo tornillo extrusor (mayor L/D proporción), lo que permite una mejor desgasificación y en consecuencia menor contenido de humedad [27].

Tipo de fibra y contenido: estos dos indicadores, son esenciales para promover la sostenibilidad del compuesto. Además se ha de tener en cuenta la longitud de las fibras, la razón entre longitud y radio y la composición química. En estudios con fibra de vidrio se comprobó una mayor resistencia cuando las fibras eran ubicadas unidireccionalmente, seguida de una forma tejida, en pequeñas partículas y por último de forma transversal [28].

Moldeo manual

Este es el método más sencillo para producir una pieza reforzada con fibra. Este proceso inicia con la aplicación de una capa de gel en el molde abierto. El refuerzo con fibra normalmente es en forma de tela o colchoneta y se coloca de forma manual en el molde. A continuación se aplica la resina básica mezclada con catalizadores y aceleradores, vertiéndola ya sea con un cepillo o por aspersión. Se usa rodillos o escurridores para empapar perfectamente la resina con el refuerzo y expulsar el aire atrapado. Después del curado, el producto se somete a un tratamiento post-vulcanizado [28].

La cantidad de carga de fibra depende en gran medida del método de procesamiento, la cual es restringida en este método. Esto depende también de las características anatómicas de las fibras naturales, que tienen huecos llamados lumen. Si la fibra tiene lúmenes grandes y paredes de células pequeñas, la carga de fibras se puede aumentar mediante la compresión de los huecos existentes en las fibras. Se encontró que hasta un 10% en peso de fibra de coco/estera, plátano/sisal y 14% en peso de tejido de algodón/plátano podría ser incorporado en la resina de poliéster por esta técnica. Los refuerzos de fibra natural se deben secar adecuadamente en un horno antes de la impregnación de resina, para evitar una pobre humectación y la acumulación de humedad en los materiales compuestos [30].

2. Fibras Naturales como refuerzo de materiales compuestos: Biopolímeros y su modificación superficial.

Una fibra es un filamento de origen natural, artificial o sintético, de sección transversal circular, cuya longitud es varias veces mayor al diámetro (0,0025mm – 0,13mm). Se clasifican según su origen en sintéticas y naturales, las primeras son elaboradas con los materiales básicos y las otras son de origen vegetal, animal o mineral. O según su longitud, cortas o continuas [31].

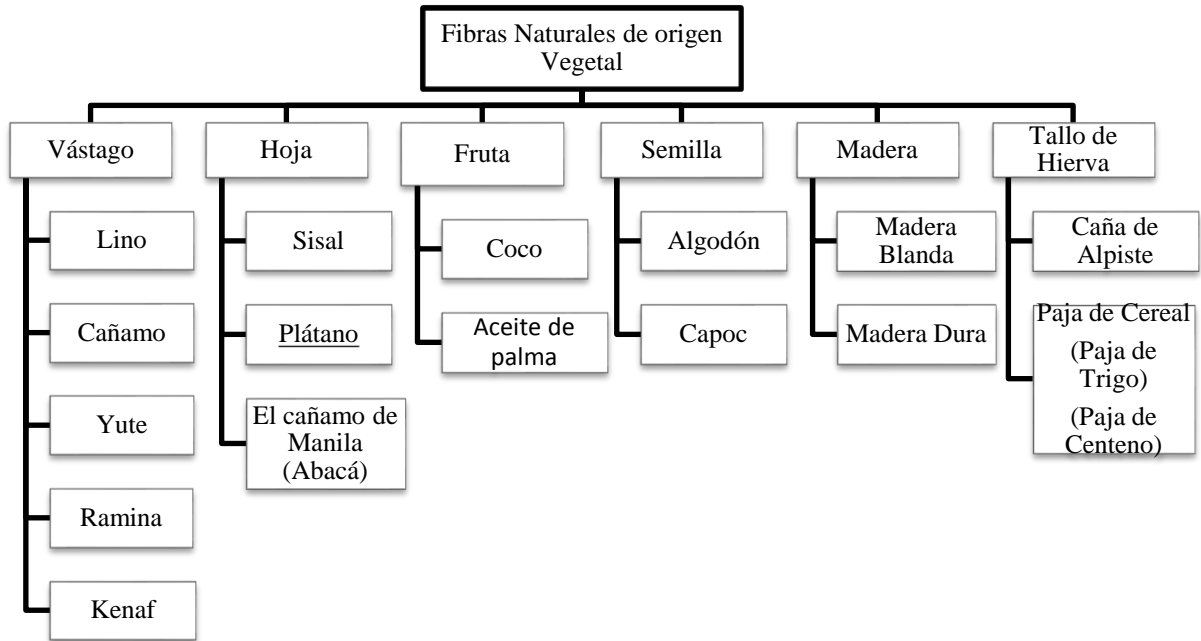
Las fibras naturales son biopolímeros y por su estructura (celulosa, lignina, hemicelulosa, entre otros) considerados como materiales compuestos. Los biopolímeros son definidos como materiales biodegradables, pues pueden sufrir fácil descomposición o degradación [32, 33]. De acuerdo a sus componentes son clasificados en [32] [5]:

1. Agro-polímeros extraídos de biomasa, tales como: almidón, celulosa, proteínas, quitina, etc.
2. Polímeros obtenidos de la producción microbiana, tales como los polihidroxiácidos (PHA).
3. Polímeros convencionales y sintetizados químicamente y cuyos monómeros son obtenidos de recursos agronómicos, tales como el ácido poliláctico (PLA).
4. Polímeros cuyos monómeros son obtenidos de recursos fósiles tales como Policaprolactona (PCL), poliestaramidas (PEA), polibutileno *succinato-co-adipate* (PBSA), poly(butilen adipato-co-tereftalato) (PBAT).

Las fibras naturales tienen diferentes orígenes y pueden ser agrupadas en varias categorías según su procedencia: vástago, hoja, semilla, raíz, tallo, fruto y semilla. En la Figura 1 se muestra esta clasificación.

Las fibras como el sisal, el algodón, el lino, el cáñamo, almidón de coco, yute y banana o plátano son ejemplos importantes de las fibras naturales vegetales que tienen muchas ventajas tales como: disponibilidad en altas cantidades, bajo peso, biodegradabilidad, bajo costo, renovables, baja naturaleza abrasiva, propiedades mecánicas específicas muchas veces superiores a las fibras sintéticas. También algunas desventajas relacionadas con su hidrofiliadad porque son derivados de lignocelulosa, las cuales contienen grupos hidroxilo fuertemente polarizados. Esta característica resulta en baja adhesión con las matrices poliméricas hidrofóbicas, además de propiciar su envejecimiento prematuro, degradación y pérdida de resistencia [15, 34-36]. Adicionalmente la mayoría de las fibras naturales tienen baja estabilidad térmica, pues la temperatura de degradación media es ~200°C, lo cual la hace incompatible con el uso de matrices termo fijas que tienen altas temperaturas de curado. Esto también restringe los compuestos con fibras naturales para aplicaciones de temperatura relativamente baja [37-39].

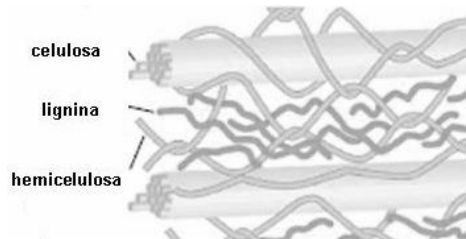
Figura 1 Clasificación de las fibras naturales vegetales [40, 41].



Composición química

Las fibras naturales lignocelulósicas como las FSP están compuestas principalmente de celulosa, hemicelulosa, lignina y pectina con una pequeña cantidad de extractivos (ver Figura 2). La composición típica de las FSP puede ser vista en la tabla 3.

Figura 2 Representación esquemática de los componentes químicos de las fibras [42].



También hacen parte de su composición una pequeña cantidad de materia orgánica (extractivos) y componentes inorgánicos (cenizas) [39].

Tabla 3. Porcentaje de componentes de las fibras naturales.

Fibra	% Celulosa	% Lignina	% Hemicelulosa	Ref.
Banano	60-65	5-19	6-19	[21, 26, 40, 43, 44]

Celulosa

La celulosa es un biopolímero compuesto de moléculas de β -glucosa que es el mayor constituyente de las paredes celulares de las plantas. En la naturaleza, la celulosa es

altamente cristalina y alto peso molecular, responsable de la resistencia mecánica de las fibras [45, 46].

Lignina

La lignina es un polímero complejo de hidrocarburos alifáticos y aromáticos que está asociado con la hemicelulosa y celulosa dentro de las paredes celulares de las plantas [47, 48]. La lignina es totalmente amorfa e hidrofóbica en naturaleza y es considerada como un polímero termoplástico [41]. Constituye el segundo material más abundante en las plantas, es responsable de la resistencia, rigidez y protección de los patógenos microbianos de las paredes de la célula. Las propiedades mecánicas son inferiores a las reportadas por la célula [49].

Hemicelulosa

La hemicelulosa la conforman heteropolisacáridos como la glucosa, la galactosa o fructosa que forman una cadena lineal ramificada. Después de la celulosa, es reportada como el segundo carbohidrato en las paredes celulares de las plantas. Se caracteriza por la alta absorción de agua, como la observada en la fibra de lino [41].

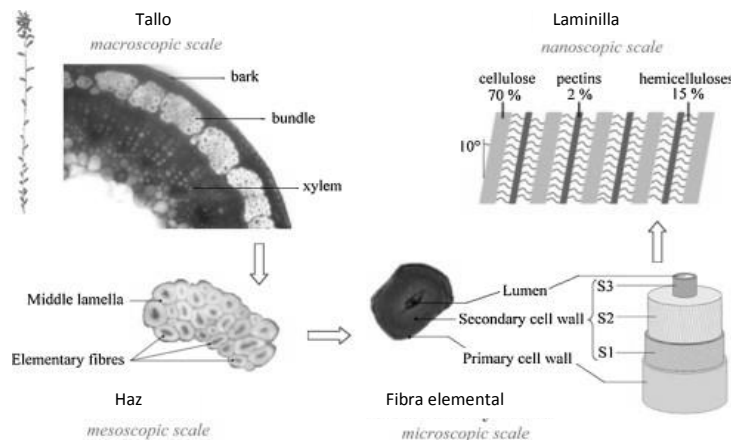
Pectina

Las pectinas son un tipo de heteropolisacáridos entre polímeros ácidos y neutros muy ramificados. La cantidad de pectinas en las fibras naturales es baja, pero están ubicadas estratégicamente en la estructura de la planta. Las pectinas junto con las hemicelulosas se llaman polisacáridos de la matriz en las plantas y mantienen los tejidos unidos.

Estructura física

En la Figura 3 se muestra la representación esquemática de la estructura física de las fibras naturales. Las fibras son básicamente una rígida celulosa cristalina, reforzada con microfibrillas amorfas de lignina y/o matriz de hemicelulosa [2]. Es decir, la hemicelulosa actúa como una matriz de cementación entre las microfibrillas de celulosa, e incrementa la rigidez del compuesto hemicelulosa/celulosa [47].

Figura 3 Sección transversal y representación esquemática de las fibras celulósicas del tallo [50].



Las fibras vegetales son como tubos microscópicos de paredes celulósicas alrededor de una cavidad hueca llamada lumen [47]. El cual influye en el cálculo de diámetro de la fibra y el comportamiento de absorción de agua de las fibras [40] (ver Figura 3).

Las microfibrillas tienen un diámetro aproximado entre 10-30 nm y están formados entre 30-100 moléculas de celulosa. Una sola fibra está compuesta de capas de paredes celulares, una primaria y tres secundarias, conectadas como un compuesto de capas múltiples. La segunda capa es muy importante porque determina las propiedades mecánicas de las fibras. Estas paredes celulares difieren en su composición (relación entre la celulosa, lignina y hemicelulosa), en la orientación de las microfibrillas y valor del diámetro, según se trate de una planta a otra. El ángulo de las microfibrillas y el contenido de celulosa determinan generalmente las propiedades mecánicas de la fibra, que mejoran en proporción directa con el contenido de celulosa e inversa con el ángulo [49, 51].

Modificación superficial de las fibras naturales

Las modificaciones superficiales de las fibras naturales se han utilizado para estandarizar o mejorar sus propiedades, mecánicas ó químicas para mejorar su rendimiento en diferentes materiales compuestos. Diferentes investigaciones han mostrado que tanto tratamientos físicos como químicos a las fibras naturales incrementan su adhesión con la matriz del compuesto o biocompuesto.

Tipos de modificación superficial

La modificación superficial de las fibras celulósicas ha sido reportado por Belgacem y Gandini [52]. De acuerdo a esto, las modificaciones superficiales incluyen: tratamientos físicos, como extracción con disolventes; tratamientos físico-químicos, como el uso de descargas corona y plasma o láser, rayos-γ y el bombardeo UV y las modificaciones químicas.

Modificación química de las fibras naturales

Las fibras son modificadas químicamente, debido principalmente a la presencia de grupos hidroxilo¹. Estos grupos pueden ser activados para introducir nuevas moléculas que forman enlaces eficaces dentro del sistema [53]. Algunas investigaciones han realizado tratamientos químicos a fibras naturales como el yute, sisal y piña para mejorar el comportamiento mecánico [54-57]. La mayoría han reportado que los tratamientos alcalinos pueden mejorar las propiedades superficiales [56, 58]. A continuación se nombran los efectos de los tratamientos que se realizaron en este trabajo.

¹ El grupo **hidroxilo** (también llamado **oxhidrilo**) OH^- es un **grupo funcional** compuesto de 1 átomo de **oxígeno** y también 1 de **hidrógeno**, característico de los **alcoholes**. Tiene una carga formal (**número de oxidación**) de -1 unidad, es sigma-aceptor y pi-dador, y puede eliminarse por ejemplo por sustitución nucleofílica, dando lugar a un anión **hidróxido**.

Tratamiento alcalino (NaOH)

El tratamiento alcalino conduce al aumento de la cantidad de celulosa amorfa, por eliminación de los enlaces de hidrógeno en la estructura de la red celulósica [53]. El efecto del tratamiento alcalino sobre las fibras de cáñamo fue estudiado por Ouajai y Shanks. En dicho estudio se encontró que la pectina y hemicelulosa fueron eliminadas mediante el tratamiento [55]. Los grupos acetil reaccionan con los grupos hidroxilo de la fibra y extrae la existencia de humedades. Como resultado la naturaleza hidrofílica de la fibra disminuye y mejora la estabilidad dimensional [59].

Acetilación (Ac)

Su principal objetivo es la reacción de los grupos hidroxilo (OH) de la fibra con los grupos acetilo (CH_3CO), haciendo que su superficie se torne más hidrofóbica. Los grupos de hidroxilo que reaccionan preferentemente son los que hacen parte de los componentes menores de la fibra (lignina y hemicelulosa) y los de celulosa amorfa [53]. Las fibras de coco, palma de aceite, lino y yute han sido modificadas con este tratamiento, las cuales comparadas con las fibras sin tratar mostraron mejores propiedades en cuanto a la resistencia al ataque microbiológico, aun después de un periodo de 5 meses [60].

La acetilación además de reducir la naturaleza higroscópica de fibras naturales, aumenta la estabilidad dimensional de los materiales compuestos que se fabrican con ellas y les dan mayor estabilidad térmica por la mejora de las interacciones de fibra-matriz. Los materiales compuestos de poliéster reforzados con fibras naturales acetiladas exhibieron mayor resistencia a la tracción y menos pérdida de resistencia en el tiempo en comparación con materiales compuestos hechos con fibra de silano tratados en ensayos biológicos [61].

Esterificación: Epiclorhidrina

La modificación de las fibras celulósicas por esterificación mejora ciertas nuevas gamas de propiedades y hace que sea más útil y aceptable en diversas aplicaciones. La epiclorhidrina ha sido utilizada en biopolímeros como el quitosano como agente entrecruzador y mejora la tenacidad del material [62]. En procesos de esterificación para modificación de fibra naturales se ha reportado que mejora sus características para poder ser utilizadas en procesos de moldeo por presión o extrusión [37].

3. Caracterización de los Biopolímeros, Fibras Naturales (B&FN) y Materiales Compuestos

La caracterización de los materiales, consiste en determinar sus diferentes propiedades químicas, estructurales, físicas ó mecánicas. Para el caso de los B&FN tal caracterización permite entender su comportamiento y así realizar posteriores aplicaciones, como un material biocompuesto. En esta sección se describirán las principales pruebas de B&FN y los materiales compuestos.

Caracterización Mecánica

Prueba de Tensión.

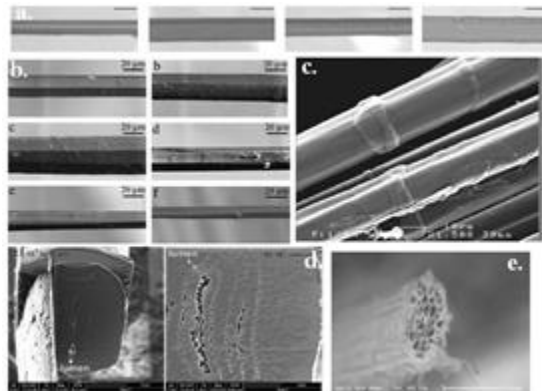
Este ensayo se utiliza para evaluar principalmente la resistencia última a la tensión, la elongación y módulo de Young de un material. En esta prueba, una muestra del material se estira a velocidad constante hasta la fractura, que se produce en un tiempo relativamente corto. La fuerza que actúa sobre la muestra sometida a ensayo se dibuja en el registrador, mientras que la deformación correspondiente se obtiene de la señal generada por un extensómetro, sujeto a la muestra. De los valores obtenidos se pueden convertir a valores de tensión convencional y construir el diagrama de tensión [28].

El ensayo de tensión que se usa para fibras de banano es el descrito en la norma ASTM: C 1557 - 03 Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers [63]. La máquina más usada para esta prueba, según la revisión bibliográfica, es la Instron universal testing machine [15, 64].

Influencia de la longitud de sujeción: la dependencia de la resistencia a la tracción de la longitud de sujeción es debido a las heterogeneidades de la fibra, entre más larga sea la longitud de la sujeción, habrán mas heterogeneidades, debilitando la resistencia de la misma, por lo tanto existe una relación indirecta entre la longitud y la resistencia. Aunque no hay una longitud establecida, los autores han usado medidas como: 10 mm [15, 65], 100 mm [44, 66, 67] y 50 mm [68].

Cálculo de la sección transversal:

Figura 4 a. Variación del diámetro a lo largo de la longitud de la fibra [50]. b. Sección hexagonal [69]. c. Defectos [51]. d. lumen [50]. e. Porosidad [68].



La medición de la sección transversal es difícil ya que la fibra natural no es uniforme a lo largo de su longitud, tiene un espacio vacío o lumen en su interior, su sección transversal no es circular, presenta defectos causados durante el crecimiento de la planta o en el proceso de extracción y es porosa [44] [69] [70] (ver Figura 4).

El diámetro puede ser calculado según Nechwatal [65] de dos maneras: a partir de la densidad y la finura ó a partir de microfotografías. Las microfotografías SEM son un método más exacto, utilizado por Baley [51], Mukhopadhyay [44] y Bessadok [15]. En la tabla 4 se muestra algunos rangos reportados para diámetros de fibras de banano.

Tabla 4. Diámetros de fibra de banano y otras fibras.

Fibra	Diámetro μm	Ref.
Banano	80-320	[44]
	115-150	[21, 26, 43]

Una vez determinado un valor medio de diámetro para una fibra individual, a partir de la prueba de tensión se pueden obtener resultados de tensión de ruptura, módulo de Young y deformación convencional, entre otros. En la tabla 5 se relacionan algunas fibras naturales y sus propiedades de tensión.

Tabla 5. Valores de las propiedades de algunas fibras naturales y sintéticas.

Fibra	Tensión convencional	Módulo de Young	Deformación convencional	Ref.
	$\sigma = F/A$	$E = \sigma/\epsilon$	$\epsilon = \Delta l/l$	
	N/mm^2	N/mm^2	%	
Banana	384-800	20-34	2.0-6.0	[21, 26, 40, 71]
Sisal	347-700	15-38	2.0-7.0	[19, 40, 71]
Yute	450-800	10-30	1.1-1.8	[19, 39, 40]
S-vidrio	4570	86	2.8	[40]
E-vidrio	1800-3500	70-73	2.5	[39, 40, 72]

σ : tensión convencional ϵ : elongación E : módulo de Young F : fuerza A : área Δl : diferencia entre longitud inicial y final l : longitud inicial.

Materiales Compuestos

Tabla 6. Diferentes biocompuestos con fibras naturales y poliéster.

Fibra	Preparación	% de fibra	Tensión convencional	Módulo de young	Ref.
			$\sigma = F/A$	$E = \sigma / \epsilon$	
			N/mm^2	N/mm^2	
Vakka	Moldeo manual con las fibras de forma unidireccional, tiempo de curado 24 h	37.2	66.0	1.8	[73]
Sisal		37.0	50.0	1.6	
Banana		37.4	60.9	1.1	
Poliéster			15.1	0.4	
Jowar	Moldeo manual con las fibras de forma unidireccional	40.0	124.0	2.8	[74]
Sisal		40.0	65.5	1.9	
Poliéster			31.5	0.7	

Para este ensayo, las normas que generalmente se usan son: ASTM D-638-03 e ISO 527-4. La forma de preparación, el porcentaje de fibra utilizado, la matriz de poliéster y algunos resultados de la prueba de tensión para algunos biocompuestos con fibras naturales y poliéster son mostrados en la tabla 6.

Tenacidad: Prueba de impacto

La tenacidad es una medida de la cantidad de energía que un material puede soportar antes de romperse ó su capacidad para soportar un impacto sin que se produzca fractura. Los métodos para determinar esta propiedad es calcular la integral del área de la curva de tensión o la prueba de impacto. Para la prueba de impacto existen dos métodos principales como lo son la prueba charpy (en la cual la probeta es puesta de manera horizontal) y la prueba izod (la probeta se pone de forma vertical). Las probetas con una muesca en forma de V, se ponen en la máquina, se suelta el péndulo desde una altura determinada y con el martillo se fractura la probeta. Conociendo la masa del péndulo y la diferencias de alturas: inicial y final, se determina la energía potencial presente, algunas máquinas digitales realizan este cálculo. Las normas más usadas para la realización de esta prueba son: ASTM D256-10 Determining the Izod Pendulum Impact resistance of plastics y ASTM D6110-10 Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics.

Caracterización química

Técnicas químicas espectroscópicas vibracionales

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 reacciones químicas después de un tratamiento. Estas técnicas han sido extensamente usadas para distinguir categorías de celulosa, fibras naturales regeneradas y sintéticas [75].

Espectroscopia RAMAN

Esta técnica es usada en química y física para estudiar los compuestos moleculares de los materiales. La técnica estudia modos de baja frecuencia como los vibratorios, rotatorios y otros. Es aplicada para la caracterización de materiales, medida de temperatura y encontrar la orientación cristalográfica de una muestra.

Diferentes autores han usado una técnica similar (espectroscopia infrarroja por la transformada de Fourier-FTIR), para identificar el contenido de celulosa y lignina de diferentes clases de fibras vegetales y otros componentes de menor porcentaje de contenido como la hemicelulosa y pectina. Los resultados mostraron que los picos de mayor intensidad ayudan a diferenciar los tipos de fibras y, en general, todas las fibras mostraron rangos característicos como por ejemplo la banda éster C=O en 1735 cm^{-1} , de pectina, el plano vibratorio aromático C=C en $\sim 1595\text{ cm}^{-1}$ y $\sim 1505\text{ cm}^{-1}$ de lignina y el anillo C-C (banda de estiramiento) en $\sim 1155\text{ cm}^{-1}$ y C-O-C de éter glicosídico en $\sim 1105\text{ cm}^{-1}$, de componentes polisacáridos de la celulosa [75].

Los rangos del espectro usados por algunos autores han sido los siguientes: Garcide, entre de $4000 - 750 \text{ cm}^{-1}$ [75], Bessadok, en su estudio con la fibra de Agave, entre $4000 - 700 \text{ cm}^{-1}$ [15], Ibrahim al tratar las FSP con anhídrido maléico, $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ [21, 66] y Merlini al tratar FSP con hidróxido de sodio, $4000 - 750 \text{ cm}^{-1}$ [63].

Análisis Térmico

Bajo la denominación de análisis térmico se encuentran un conjunto de técnicas analíticas que estudian el comportamiento térmico de los materiales como la termogravimetría: la masa, la calorimetría diferencial de barrido, el análisis térmico diferencial, el análisis termo mecánico y la termo magnetometría entre otras. Con análisis térmico se pueden hacer estudios de descomposición, estabilidad térmica, composicionales, de gasificación de muestras carbonosas y cinético; determinaciones de la pureza de un material, sus contenidos de humedad, materia volátil, cenizas y carbono.

Análisis Termogravimétrico TGA

El análisis termogravimétrico está basado en la medida de la variación de la masa de una muestra cuando se la somete a un cambio de temperatura en una atmósfera controlada. Esta variación puede ser una pérdida o una ganancia de masa. El registro de estos cambios brinda información sobre descomposición o reacción de la muestra con otros componentes. Respecto de fibras naturales en esta prueba la hemicelulosa se descompone primero, seguida de la celulosa y la lignina. La cantidad de impurezas presentes en las fibras también acelera el proceso de degradación, adquiridos en los procesos de extracción o pre-tratamientos [76].

Adsorción y absorción de agua

La adsorción es un proceso físico o químico por el cual una sustancia es retenida en la superficie de un material, en la cual la sustancia no se introduce en el volumen del cuerpo. Una fibra adsorbe humedad del aire a la que está expuesta. La absorción, por el contrario, es un fenómeno de volumen, en la cual una sustancia es retenida por las moléculas de otra. Una fibra absorbe agua cuando se sumerge en ella.

Se denomina actividad de agua (a_w) a la relación entre la presión de vapor de agua en equilibrio con la fibra (P) y la presión de vapor de agua del agua pura (P_0) a una misma temperatura (Ecuación 1).

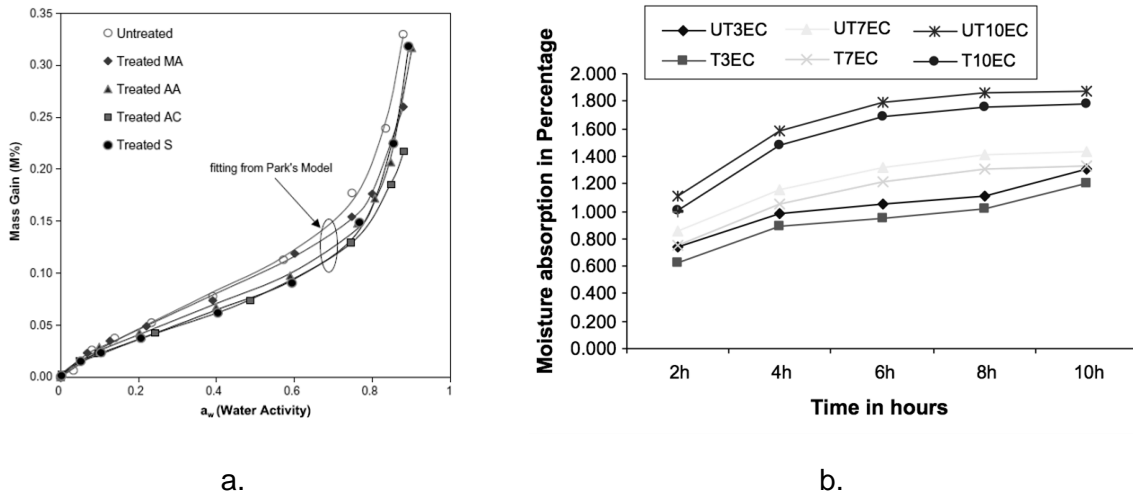
$$a_w = \frac{P}{P_0} \leq 1$$

Ecuación (1)

La gráfica que relaciona, para una temperatura fija, el contenido de humedad adsorbido de un material desde la atmósfera que lo rodea con su actividad de agua se denomina isoterma de sorción.

Cuando una fibra se sumerge en agua o en una solución acuosa sufre un hinchamiento porque el líquido, a medida que pasa el tiempo, llena los poros y espacios de las fibras (lumen). Esta agua puede considerarse como absorbida y es de fácil eliminación mediante el prensado y secado. Las pruebas de absorción de agua vs. tiempo se utilizan en fibras naturales y materiales compuestos para medir su resistencia a la intemperie. A partir de la información de pruebas de adsorción y de absorción se puede saber sobre la interacción entre las moléculas de medir su grado de afinidad por el agua (hidrofilicidad, o afinidad por ella; hidrofobicidad, o grado de rechazo al agua). Es importante que el material de relleno de fibras naturales sea poco hidrofílico para mejorar su compatibilidad en materiales compuestos con matrices poliméricas.

Figura 5 a. Isotermas de absorción de fibras naturales [15] y b. porcentaje de absorción de agua en materiales compuestos [17].



Diferentes autores han realizado este tipo de pruebas para las fibras naturales, con el objetivo de medir su resistencia al ataque bacteriano cuando se le realizan diferentes pre-tratamientos químicos. Estos realizan pruebas de absorción de agua y de vapor, en los cuales 5 gr. de fibras se ponen a secar en un horno eléctrico a una temperatura de 70°C por 2 horas, se pesan y se sumergen en agua destilada a temperatura ambiente. Después de 24 horas el agua es removida, las fibras se pesan periódicamente hasta que no hay ganancia de masa de acuerdo la ecuación 2.

$$\% \text{ de absorción de agua} = \frac{A-B}{B} \quad \text{Ecuación (2)}$$

A es el peso de la muestra humedecida y B es el peso de la muestra seca [64].

En la Figura 5 se muestran dos ejemplos de esta propiedad medidos en fibras naturales y materiales compuestos.

Resistencia Química

La resistencia química de un material o de su superficie puede ser determinada de acuerdo con la norma ISO 2812 pinturas y barnices - Determinación de la resistencia a los líquidos. Con este método, un material o superficie está expuesta a la sustancia

química pertinente, en un período definido de tiempo y en el área pertinente para ser inspeccionado microscópicamente. Los posibles cambios que pueden ocurrir incluyen: decoloramiento, alteración en el grado de brillo, reblandecimiento, hinchazón, el desprendimiento de los recubrimientos, abrasión, entre otros.

Una vez finalizado el período de prueba definido, los residuos de líquido de ensayo se retiran y se evalúa en la superficie del material las alteraciones visibles y la pérdida de peso en determinados intervalos de tiempo.

Caracterización morfológica

Se utiliza para obtener información morfológica de la superficie, microestructura, tamaño y muchas veces composición química de una muestra [41, 77].

Microscopia Electrónica de Barrido: SEM

La microscopia electrónica de barrido es un método exploratorio de microscopia electrónica, utilizado desde 1935 por Max Knoll para la toma de imágenes de alta resolución de diferentes tipos de materiales, utilizando un haz de electrones. Se pueden lograr acercamientos de hasta 1 nm., usando instrumentos de alta resolución y de 3 nm., usando instrumentos convencionales. Sin embargo esta definición depende del tipo de muestra. El volumen de las muestras es muy reducido, como pueden haber heterogeneidades, es aconsejable tomar varias muestras, hasta que haya uniformidad de las mismas y sea representativo. El análisis es convencionalmente usado para visualizar la superficie y las muestras pueden ser fracturadas para analizar su estructura interna. Se pueden obtener imágenes desde diferentes ángulos y en 3D.

4. Planeación del abastecimiento como parte de la cadena de logística

El sistema logístico es fundamental en la producción de bienes y servicios, pues es la combinación de todas las actividades que procuran materiales, desde los proveedores de materia prima, su posterior transformación hasta llegar al cliente final [78, 79]. El diseño de una cadena de abastecimiento esta enfocado a una distribución eficiente de estos productos para disminuir costos como el almacenamiento y transporte [80]. Las estrategias para el inicio de la cadena logística (obtención de materia prima al proceso productivo) están enfocadas a la ubicación, número y tamaño de centros de acopio, inventarios, selección del modo de transporte, desarrollo de relaciones con los proveedores, entre otros [80].

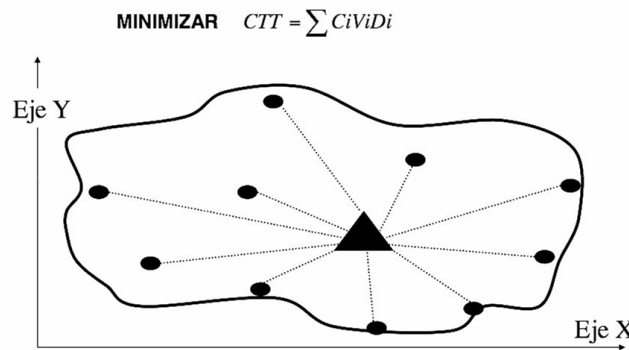
La logística verde inicia al final del ciclo de vida del producto, y puede ser definida como las diferentes actividades realizadas para su recolección, procesamiento, reciclaje, entre otros. En este proceso se establecen los mecanismos para disponer de los productos, con bajo impacto ambiental [81]. Para la implementación de un sistema logístico según Kopicki, nombrado por Díaz [13] se debe tener en cuenta: análisis de las

barreras de entrada (decidir si el producto es apto para retornar al ciclo), gestión de recogida, clasificación (decidir el destino final del producto) y colocación (enviar los productos al destino elegido).

Ubicación de los centros de abastecimiento como parte de la cadena de abastecimiento.

La localización geográfica de los centros de acopio hace parte de la decisión estratégica de la empresa, pues su objetivo debe ser la ubicación de un lugar que favorezca el desarrollo de las operaciones, como parte de la cadena de suministro. Esto establece el número y tamaño de los centros de acopio y determinar las rutas por las cuales se desplazara el producto. El ámbito adecuado para el problema de la ubicación de instalaciones debe incluir todos los movimientos del producto y sus costos asociados a medida que estos se presentan, desde las ubicaciones del proveedor a puntos de acopio, hasta una planta de procesamiento principal. Esto puede asignarse de acuerdo a la asignación de la cantidad de materia prima encontrada en cada uno de los puntos. La metodología de los centros de gravedad (ver Figura 6) es aplicada de acuerdo a los siguientes pasos:

Figura 6 Visión esquemática del método de los centro de consumo [82].



- 1) Determinación del área de influencia,
- 2) Selección de coordenadas,
- 3) Análisis de la demanda,
- 4) Estudio de costos de transporte,
- 5) Selección de la posición inicial.

Las expresiones de cálculos cuantitativos que se usan son:

$$X^* = \frac{\sum C_i V_i X_i}{\sum C_i V_i} \quad Y^* = \frac{\sum C_i V_i Y_i}{\sum C_i V_i}$$

Ecuación (3)

- 6) Optimización de la posición inicial

$$X^* = \frac{\sum C_i V_i X_i / D_i}{\sum C_i V_i / D_i} \quad Y^* = \frac{\sum C_i V_i Y_i / D_i}{\sum C_i V_i / D_i}$$

Ecuación (4)

donde:

C_i Costo unitario de transporte desde el sitio i hasta la nueva localización.

V_i Volumen de carga a transportar desde el sitio i hasta la nueva localización.

D_i Distancia a recorrer desde el sitio i hasta la nueva localización.
 X^* , Y^* abscisa y ordenada de la posición promedio encontrada.

Estrategia del transporte

Incluye la selección del modo, el tamaño de envío y el establecimiento de rutas. Estas decisiones son influenciadas por la proximidad del producto a recolectar, la ubicación de los centros de acopio los niveles de inventario Los niveles de servicio al cliente, la localización de centros de acopio, costos, tipo de carreta, entre otros [80].

1. Capítulo 1

Modificación superficial de las fibras del pseudotallo de plátano con anhídrido acético y epiclorhidrina.

1.1 Materiales y métodos

1.1.1 Preparación de las Fibras

Las fibras crudas fueron obtenidas del pseudotallo de plátano (*musa paradisiaca*), recolectado de los cultivos del municipio de Caicedonia (Valle, Colombia). El pseudotallo es cortado después de la cosecha y mediante un proceso de desfibrado manual o mecánico son extraídas las fibras. Las fibras son cepilladas para remover los residuos, secadas en la sombra o al sol hasta una humedad de $13 \pm 2\%$. Posteriormente son almacenadas a una temperatura de 20°C y humedad de $62 \pm 2\%$ humedad relativa (HR) hasta su uso.

1.1.2 Reactivos

La epiclorhidrina (EP) y el anhídrido acético (AA) fueron comprados de Panreac (España). Todos los otros reactivos fueron a grado analítico.

1.1.3 Tratamientos químicos

Los químicos (AA, EP y AA_EP) fueron disueltos en acetona (proporción de químico acetona, 1:10 y proporción en peso AA en EP 1:1). Las fibras crudas (proporción en peso de fibras crudas en químico, 1:20) fueron inmersas en una solución de químico/acetona durante 24 horas, a 20°C . Después las fibras fueron lavadas varias veces en suficiente acetona y agua destilada, para asegurar la remoción de todos los residuos de los reactivos. Finalmente, las fibras tratadas fueron secadas en un horno a 105°C por 24 h.

1.1.4 Análisis Raman

Las muestras fueron examinadas usando un espectrómetro μ -Raman LabRAM HR (Horiba Jobin Yvon, Francia en el laboratorio de propiedades ópticas de los materiales UNAL- Manizales) en una región entre $700\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$. Fuente de radiación 473 nm , laser

DPSS, potencia < 20 mW spot; la realización se realiza con una sola fibra. Para la observación de una sola fibra en el modo microscópico, fue utilizado un accesorio de microscopio Raman con lentes de objetivo de 50x. La calibración de silicio inicial fue de 519.62 cm^{-1} . Todo los espectros Raman fueron medidos a temperatura ambiente ($20 \text{ }^\circ\text{C}$).

1.1.5 Isotermas de absorción de agua

La medida de absorción de agua de las fibras sin tratar, AA, EP y AA_EP fueron medidas por el método de gravimetría estática [83] (IBA-Manizales). Se usaron ocho frascos herméticos de vidrio con diferentes soluciones salinas saturadas en su base (LiCl , CH_3COOK , MgCl_2 , K_2CO_3 , NaBr , NaCl , KCl and BaCl_2) las cuales permiten controlar el rango de humedad relativa de 5% a 90%. En la parte superior de cada frasco, y sobre una malla se colocaron 0.2 g de fibra seca, obtenida después de tres días de deshidratación en un horno de convección forzada a una temperatura de $60 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ PJTECH Thermolab Kryoven (Medellín, Col).

Las fibras de plátano y las soluciones selladas en los frascos, fueron secadas bajo un ambiente de humedad controlada ($20.0 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$). El peso final de las muestras fue medido con una balanza Ohaus Adventurer (Pine Brook, NJ, USA, 65–310 g, $\pm 0.1 \text{ mg}$). Cuando el peso de la fibra se mantuvo constante durante 3 días consecutivos, se consideró que se alcanzó el equilibrio de las muestras con la atmósfera de humedad controlada que brindan las soluciones salinas. Este equilibrio fue alcanzado entre 3 y 15 días [84].

1.1.6 Hinchamiento en agua

El hinchamiento por absorción de agua de las fibras, modificadas y sin tratamiento, fue determinado por la medida del peso ganado después de su inmersión en agua destilada ($\text{pH} = 5\text{-}6$) a 20°C en diferentes intervalos de tiempo (12, 20, 48, 65, and 89 h) (IBA-Manizales). Los ensayos fueron realizados justo después de ser modificadas las fibras y posteriormente después de ser almacenadas por seis meses (20°C , $62 \pm 2\%$ Humedad Relativa, HR). Una cantidad conocida en peso (W_1) de cada fibra es inmersa en 100 ml de agua durante el tiempo de los intervalos mencionados anteriormente. Después de extraer las muestras, el exceso de agua es removido con papel de filtro y el peso final de la fibra (W_2) es obtenido. El porcentaje de hinchamiento fue calculado de la siguiente manera [16]:

$$\text{Porcentaje de hinchamiento (P}_s\text{)} = 100 \times (W_2 - W_1) / W_1 \quad \text{Ecuación (1.1)}$$

1.1.7 Medida del ángulo de contacto

La medida del ángulo de contacto es una medida del grado de hidrofiliidad (humectabilidad) o hidrofobicidad de las FSP. Se midió el promedio ($n=7$) del ángulo de contacto entre fibras y gotas de agua destilada de $5 \mu\text{l}$ (25°C) usando un equipo Dataphysics, con software OCA20 (Filderstadt, Alemania), con sistema de video para capturar imágenes estáticas y dinámicas [85].

1.1.8 Resistencia química

La resistencia química a ambientes alcalinos y ácidos fue medida por la pérdida de peso de las fibras en diferentes intervalos de tiempo (12, 20, 48, 65, y 89 h), después de haber sido inmersas en las soluciones acuosas NaOH 1N y HCl 1N a 20°C (IBA-Manizales). Los ensayos fueron realizados a fibras de plátano tratadas y sin tratar, tanto recién modificadas como después de ser almacenadas durante seis meses (20°C, 62 ± 2% HR). Una cantidad conocida ($W_1 = 100$ mg) de cada muestra de fibra fue inmersa en 100 ml. Las muestras fueron secadas hasta llegar a un peso constante (W_2) a una temperatura de 105°C. El porcentaje de resistencia química (P_{cr}) fue calculado de acuerdo a la siguiente ecuación [16]:

$$\text{Porcentaje de resistencia química } (P_{cr}) = 100 \times (W_1 - W_2) / W_1 \quad \text{Ecuación. (1.2)}$$

1.1.9 Análisis termo gravimétrico (TGA)

El análisis termo gravimétrico de las fibras tratadas y sin tratar fueron realizados en una máquina de análisis termo gravimétrico TA Q500 (TA Instruments, New Castle, DE, USA. laboratorio de magnetismo y materiales avanzados UNAL- Manizales). El peso de las muestras fue entre 5.0 a 8.0 mg. Cada muestra fue llevada desde temperatura ambiente hasta 500°C a una tasa de calor de 10°C/min, bajo una atmosfera de nitrógeno (grado 5.0 analítico) con un flujo de calor de 50 ml/min. Los valores obtenidos fueron el porcentaje de humedad, pérdida de peso y la temperatura de descomposición a partir de la derivada de la curva TGA.

1.1.10 Prueba mecánica

La prueba mecánica de las FSP individuales fueron realizadas de acuerdo a la norma ASTM: C 1557 – 03, con el uso de una maquina universal de tensión marca Shimadzu modelo AG-X (capacidad 50 kN) a una velocidad en una de sus mordazas de 4.0 mm/min, bajo aire de humedad relativa de 65 ± 5% y a temperatura ambiente 23 ± 1°C (Laboratorio de polímeros UNAL- Manizales). La longitud calibrada para 10 muestras de cada tipo fue de 10 mm. Antes de cada ensayo, el diámetro medio fue calculado después de tomar cinco medidas diferentes a través de la longitud de la fibra. Las fibras escogidas fueron aquellas con la menor variabilidad en su diámetro.

1.1.11 Espectroscopia electrónica de barrido (SEM)

El análisis morfológico de las fibras de plátano fue realizado en una máquina Ultra-high de resolución Field Emission Gun Scanning Electron Microscopy (FEG-SEM), NOVA 200 Nano SEM, FEI Company (Universidade do Minho- Portugal). Las muestras fueron cubiertas de una capa de oro paladio, para evitar la acumulación de carga eléctrica durante el ensayo. Las fibras fueron cortadas a una longitud de 1 cm y puestas sobre una cinta de carbón. Las imágenes fueron comparadas a unas magnificaciones de 1000 y 5000x.

1.2 Resultados y discusión

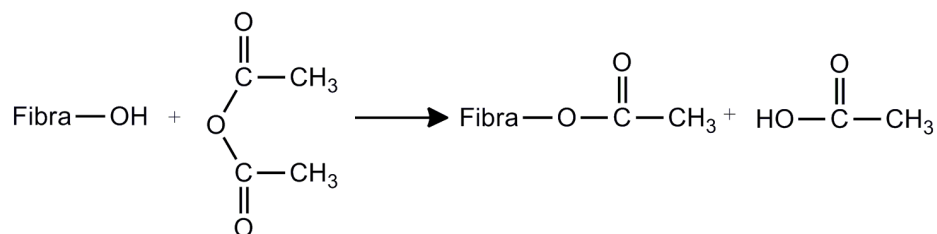
Las fibras naturales son de alta hidrofiliidad debido a la atracción o interacción con los grupos hidroxilos de los componentes de la fibra y las moléculas de agua. Las modificaciones químicas con anhídrido acético y epíclorhidrina reemplazaron parte de los

grupos OH de las fibras. En la Figura 1-1 se muestran las reacciones químicas propuestas al exponer las fibras a estos reactivos.

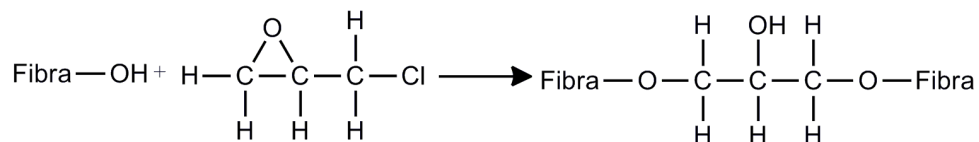
Los materiales lignocelulósicos pueden ser modificados químicamente con reacciones que convierten los grupos hidrofílicos de hidroxilo de las paredes celulósicas y regiones intercelulares en grupos hidrofóbicos. En este trabajo, cuando los químicos reaccionaron con las fibras FSP, los grupos acetilo y epóxido del anhídrido acético y la epiclohidrina respectivamente, supuestamente reemplazan parte de los grupos hidroxilo de las paredes celulares de FSP con fracciones hidrofóbicas y/o promueve la inter o intra reticulación de la fibra.

Figura 1-1 Reacción de los grupos hidroxilos de la fibra asociado a los tratamientos químicos

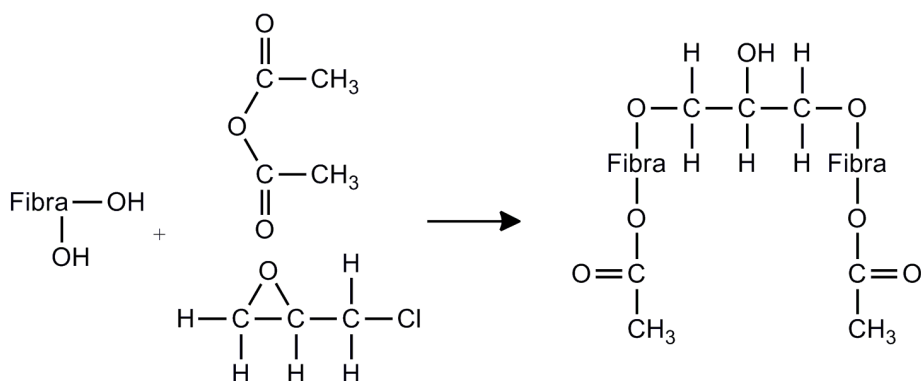
Tratamiento con Anhídrido Acético



Tratamiento con Epiclohidrina



Tratamiento con Anhídrido acético + Epiclohidrina

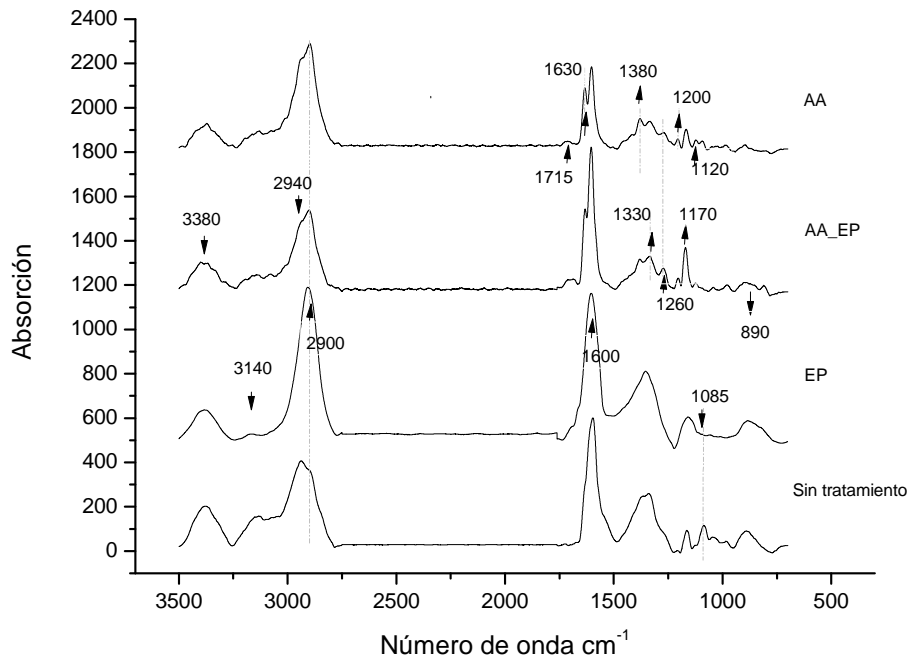


La acetilación es conocida como un método de esterificación en la cual los grupos hidroxilo son reemplazados con grupos acetil haciendo que la fibra sea más hidrofóbica y estable respecto a la humedad.

1.2.1 Análisis Raman

La Figura 1-2 resume la información del espectro Raman de las FSP antes y después de los tratamientos químicos. Un filtro suavizante Savitzky–Golay del programa OriginPro 7.5 (OriginLab Corporation, Northampton) fue usado para reducir el ruido en los espectros. Las FSP están compuestas principalmente de celulosa (60-65%), hemicelulosa (6-19%) y lignina (5-19%) [86]. La hemicelulosa en las paredes de la planta incluye xiloglucanos, xilanos, mananos, glucomananos, y beta-glucanos. Todos estos polisacáridos se asocian a bandas fuertes para los estiramientos de C-H y HCC y flexión de HCO en C-6, cercanos al centro de las bandas 2895 y 890 cm^{-1} . La señal más intensa en 890 cm^{-1} de los polisacáridos de hemicelulosa puede ser debida al ordenamiento o cristalinidad débil de esta clase de polímeros [87]. Esta banda también desaparece después de las modificaciones químicas que incluyen AA, indicando la lixiviación de hemicelulosas de la fibra.

Figura 1-2 Estroscopia Raman para las FSP tratadas y sin tratar.



La presencia de lignina fue evidente en todos los espectros de Raman en las longitudes 1170, 1260 y 1600 cm^{-1} [88]. La intensidad en 1600 cm^{-1} corresponde a los modos vibracionales de C=C de las estructuras de anillos de la lignina [89]. Con respecto a las fibras sin tratar, la intensidad de esta señal se incrementó en los tratamientos con EP y AA_EP y disminuyó en el tratamiento con AA implicando algún grado de deslignificación de la fibra.

La presencia de celulosa, que está principalmente formada por enlaces de glicosídicos y grupos hidroxilo, es evidente en la región de estiramiento $\gamma(\text{COC})$ con puntos en 1085-1096 y 1120 cm^{-1} [87] y la región de estiramiento $\gamma(-\text{OH})$ entre (3000-3300 cm^{-1}). Las bandas 1085-1096 cm^{-1} (COC, en modo de estiramiento simétrico), casi han desaparecido después de los tratamientos químicos, implicando alguna degradación de la celulosa, como consecuencia de la fisión de los enlaces glicosídicos $\gamma(\text{COC})$. Otra evidencia de este cambio podría ser encontrada por la intensidad del pico en el modo $\gamma(\text{CH})$ a los 2900 cm^{-1} [90]. La banda 1120 cm^{-1} (COC modo de estiramiento asimétrico) fue influenciada por los grupos no-celulósicos de hidrógeno-carbono de la lignina, detectada sólo en el tratamiento con AA, probablemente porque se superponía con banda de lignina en 1170 cm^{-1} .

Los efectos de los tratamientos químicos se comprobaron por los ésteres de carbonilo asociados con la esterificación de los grupos hidroxilo de las fibras en 1260 [91], 1630 cm^{-1} , y 1715 cm^{-1} en los tratamientos con AA [92]. Además, el pico centrado en ≈ 2900 cm^{-1} , más alto en el tratamiento con EP, es atribuido a la formación en la superficie de nuevos grupos como $\gamma(\text{CH})$ y $\gamma(\text{CH}_2)$ (ver Figura 1-2). También se observó un incremento en la vibración de los picos en 1330 y 1380 cm^{-1} de AA_EP y AA respectivamente que puede ser debido a los nuevos enlaces de carbono-hidrogeno luego de la modificación [93].

1.2.2 Isotermas de adsorción de agua

Las isotermas de absorción de agua de la Figura 1-3 muestran la dependencia entre el equilibrio del contenido de humedad y la actividad de agua de las fibras a los 20°C. La actividad de agua puede ser entendida como humedad relativa en la cual la fibra es puesta. Es evidente de la Figura 1-3a que, a las mismas condiciones de humedad del aire, las fibras tratadas absorben menos agua que las fibras sin tratamiento. Las fibras tratadas con AA fueron las que exhibieron la menor afinidad por la humedad del ambiente ya que ellas muestran el contenido de humedad de equilibrio más bajo.

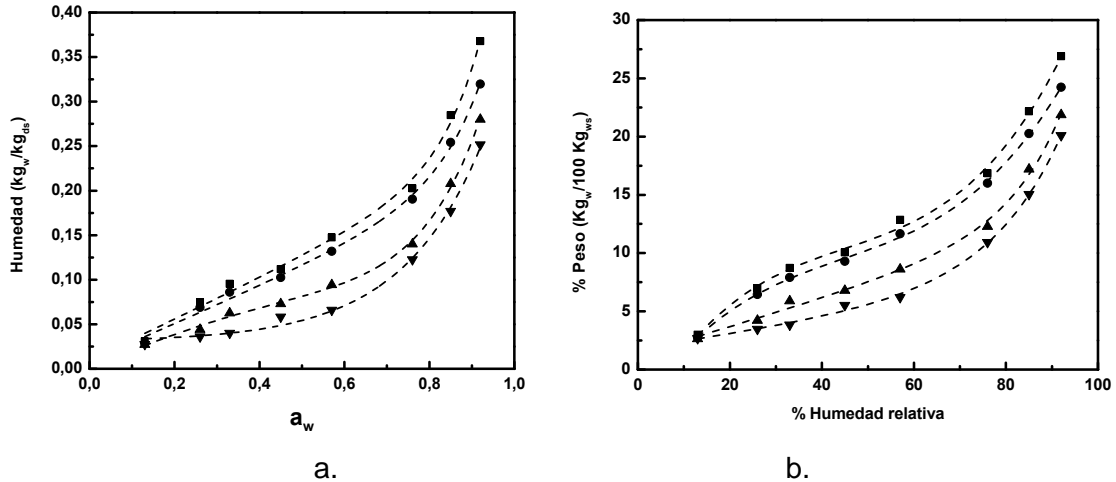
Tabla 1-1 Comparación del contenido de humedad de la fibra ($\text{kg}_w/100 \text{ kg}_{\text{fiber}}$) en aire a 85 % HR

FSP	AA	EP	AA_EP	Yute	Cáñamo	Lino
22.2	15.0	20.3	17.2	15.5 ^(b)	15.0 ^(b)	12.5 ^(b)
20.0 ^(a)	18.0			15.0 ^(c)	14.5 ^(c)	13.0 ^(c)

(a) Ref. [94] (b) Ref. [95] (c) Ref. [96]

Al comparar algunos datos publicados sobre el equilibrio de sorción de humedad de las fibras naturales mostrados en la tabla 1-1, se destaca el alto valor alcanzado por las FSP en 85% con una humedad relativa de 22.2%, lo que sugiere su baja estabilidad en condiciones de ambientes tropicales. Este contenido de agua fue reducido a 15.0%, 20.3% y 17.2% para las fibras tratadas de AA, EP y AA_EP, respectivamente. Tales reducciones son importantes para el uso de las fibras naturales en materiales compuestos. Así, en los compuestos fabricados con matriz de poliéster y fibras de lino, los tratamientos químicos redujeron la captación total de agua de las fibras y por consiguiente mejoraron la adhesión entre la fibra y la resina [97].

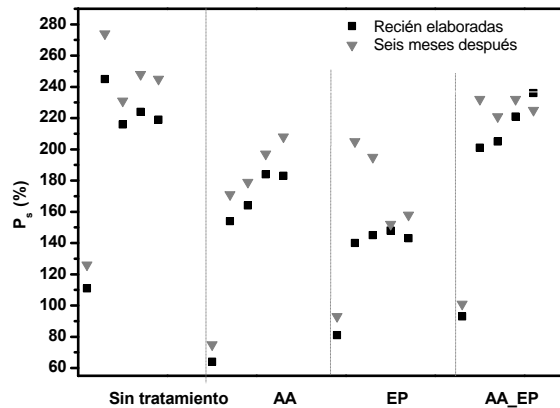
Figura 1-3 Isotermas de absorción de agua para las FSP: Sin tratar (■), EP (●), AA_EP (▲) y AA (▼). a. Actividad de agua y b. % de humedad relativa.



1.2.3 Hinchamiento en agua

El comportamiento de las fibras después de sumergirse en agua destilada, es mostrado en la Figura 1-4. Las fibras crudas evidencian un mayor hinchamiento comparado con el de las fibras tratadas. Como en los ensayos de las isotermas de sorción de agua, las FSP tratadas mostraron más baja afinidad por la absorción de agua que las fibras crudas. Esta diferencia se mantuvo después de seis meses de almacenamiento. Las fibras naturales en contacto con agua líquida reemplazan parte de los enlaces de hidrógeno entre las macromoléculas de las paredes de la célula de la planta, construido por los grupos hidroxilo (-OH) en la celulosa, hemicelulosa y lignina, lo que contribuye al fenómeno de hinchamiento [98].

Figura 1-4 Hinchamiento. Porcentaje de hinchamiento (Ecuación 1.1) de las FSP tratadas y sin tratar justo después de realizar el ensayo (■) y 6 meses después (▼).



1.2.4 Ángulo de contacto

La Figura 1-5 muestra la forma de la gota y el ángulo de contacto medio de las diferentes superficies de las FSP tratadas y sin tratar, las cuales presentan una superficie de carácter hidrofóbico ($>90^\circ$) [99, 100]. Las FSP sin tratamiento presentan un ángulo de contacto medio (92.2°) similar a otras fibras naturales como el lino, cáñamo y la banana (92.3° , 92.4° y 94.4°) [85, 101] y superior a las fibras de bambú (87.7°) [102]. La aplicación de químicos muestra una superficie más hidrofóbica que los tratamientos con plasma, resultados coherentes con los resultados mostrados en la espectroscopia FT-IR que indica la reducción de los grupos OH.

Figura 1-5 Fotografías de algunos ensayos de ángulos de contacto medios y desviación estándar de las FSP. a. Sin tratamiento 92.21° , b. AA, c. EP y d. AA_EP.



Las FSP con AA_EP presentaron el mayor ángulo de contacto (133.14°), por lo tanto muestra mejores propiedades de hidrofobicidad superficial. Los grupos OH libres característicos de las fibras naturales pueden haber formado nuevos enlaces o entrecruzamientos en la superficie de la fibra. Esto aumenta su probabilidad de adhesión con matrices de carácter hidrofóbico. Estos resultados fueron observados en el análisis Raman, donde se muestra una posible disminución en la cantidad de celulosa de carácter hidrofílico [2] y de lignina como responsable de las propiedades de humectabilidad de la superficie [102].

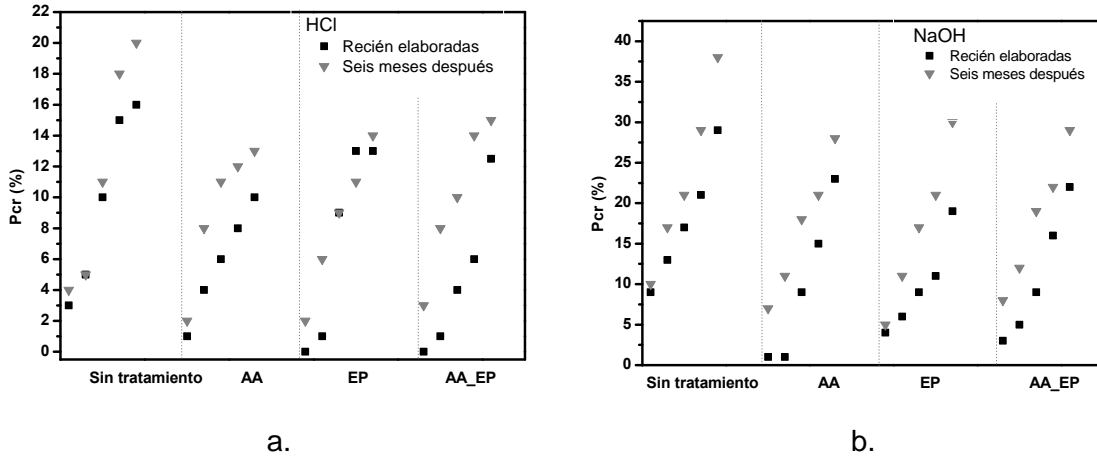
1.2.5 Resistencia química

En la Figura 1-6a se muestra el porcentaje de reducción de peso después de la inmersión en un ambiente ácido (HCl 1N, 20°C) durante cinco periodos de tiempo (12h, 20h, 48h, 65h y 89h) de las fibras tratadas y sin tratamiento. Este ensayo fue realizado para las fibras luego del momento de su modificación y seis meses después (almacenamiento a 20°C , $62 \pm 2\%$ HR).

Las fibras sin tratamiento después de seis meses mostraron más baja resistencia, pues se observa que tuvieron una pérdida de peso del 19.9% de acuerdo a su peso inicial. En contraste, las fibras tratadas con AA mostraron mejor comportamiento en esta prueba, con una pérdida de peso de 9.0% y 13.1% (en 0 y 6 meses después respectivamente). En general, todos los tratamientos químicos mejoraron la resistencia de las FSP a ambientes ácidos. En el ensayo de resistencia alcalina (Figura 1-6b) el comportamiento de las fibras tratadas fue inferior. La pérdida de peso fue alrededor de 200% más alta que la detectada en la prueba a ambientes ácidos. La mayor resistencia la ofrecieron las

fibras con tratamiento con AA (pérdida de peso de 21.9% y 27.2% a los 0 y 6 meses después, respectivamente).

Figura 1-6 Resistencia a ambientes a. ácidos y b. alcalinos, expresados en porcentaje de resistencia química (Eq. 2) recién elaborado el compuesto (■) y seis meses después (▼). Condiciones de almacenamiento (20°C, 62 ± 2% HR).



El tratamiento de las fibras naturales con NaOH (Figura 1-6b) cambia la orientación de la celulosa cristalina altamente empaquetada y forma regiones amorfas por el hinchamiento de las paredes celulares. El tratamiento alcalino y la acetilación cambian la estructura supramolecular y la morfología de las fibras, mientras la estructura química no tiene mucho cambio. Debido al hinchamiento intra e interfibril, la accesibilidad de las fibras cambia drásticamente. La reacción química propuesta entre la solución alcalina y el OH de la fibra es [103]:

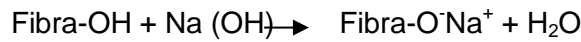


Tabla. 1-2 Comparación de la resistencia química de las FSP tratadas y sin tratar. Valores en porcentaje de pérdida de peso (Eq. 2) después del tiempo de ensayo.

Fibra	HCl (1N)		NaOH (1N)		Duración de ensayo (h)
	Cruda	Modificada	Cruda	Modificada	
Agave ^(a)	19.0 %	8.0%	25.0%	7.8%	24
Grewia ^(b)	20.3%	17.5%	24.7%	19.2%	24
FSP ^(este trabajo)	5.0%	1.0%	12.9%	6.1%	20
FSP ^(este trabajo)	16.0%	13.0%	29.0%	19.0%	89

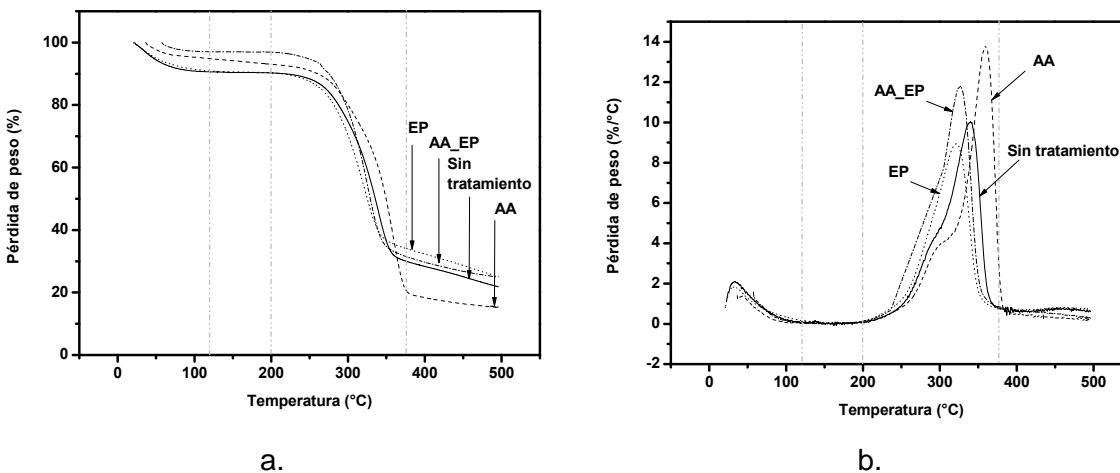
(a) [104] (b) [16]

De la comparación de datos mostrados en la tabla 1-2, la resistencia química evaluada en las fibras tratadas en este trabajo fue más alta que las observadas para las fibras de agave y grewia con similares modificaciones químicas superficiales [16, 104].

1.2.6 Análisis termogravimétrico (TGA)

Las muestras de FSP fueron analizadas termo gravimétricamente en una atmosfera de nitrógeno, en un intervalo de temperatura entre 20 y 500°C, para comparar la característica de degradación de las fibras tratadas y sin tratar.

Figura 1-7 Curvas típicas de a. TGA y su derivada b. FTG de las FSP.



Todas las muestras presentan cuatro principales regiones de pérdida de peso (Figura 1-7a y b). En la primera región (20-120°C) [105], ocurrió la deshidratación de 5.67 a 8.12 % - de agua absorbida. Sobre los 120°C la estabilidad térmica disminuye gradualmente y la descomposición de la fibra empieza a ocurrir. Los extractivos (ceras residuales, grasa, reinas, gomas, azúcares, almidones, clorofila y muchos otros no eliminados en el proceso de extracción de la fibra) y la hemicelulosa son los que se descomponen al inicio, seguidos de la celulosa y la lignina. Los extractivos se descomponen entre 120 y 200°C y las hemicelulosas en el rango entre 200 - 380°C. La celulosa, un largo polímero de glucosa sin ramas, con estructura ordenada y fuerte, piroliza en un rango de más alta temperatura (380 - 400°C). Ya que la degradación de la lignina sucede durante todo el rango de temperatura de 100° a 900°C [86, 106], y tomando en cuenta la temperatura máxima alcanzada durante el ensayo (500°C), es muy probable que el residuo final encontrado sea principalmente lignina.

Tabla 1-3 Datos de las corridas de TGA para las FSP tratadas y sin tratar.

Fibra	% Humedad	Temperatura de degradación (°C)	% de degradación
FSP crudas	8.1 ± 1.6	336.3 ± 2.5	77.6 ± 0.7
AA	6.7 ± 0.5	359.3 ± 0.6	84.7 ± 0.1
EP_AA	5.7 ± 1.7	328.7 ± 1.7	76.2 ± 1.6
EP	7.8 ± 0.3	329.5 ± 2.3	74.9 ± 0.0

Media ± de, n=2

En la tabla 1-3 se puede observar la reducción del contenido de humedad final en las fibras tratadas de AA. Teniendo en cuenta las condiciones idénticas de almacenamiento de las fibras antes del ensayo, este resultado podría mostrar la característica hidrofóbica

derivada de este tratamiento. El pico de descomposición no fue influenciado por los tratamientos con EP y AA_EP.

En contraste con las fibras tratadas con AA, donde el pico de la temperatura de descomposición ha cambiado a uno de mayor temperatura de 336.3 a 359.3 °C (. 1.6b), lo que puede significar que las fibras con anhídrido acético tienen mayor proporción de celulosa/hemicelulosa, hecho que puede ser atribuido a la lixiviación de la hemicelulosa de la fibra debida a este tratamiento, tal como fue detectado en los resultados de Raman. Como la medida del porcentaje de degradación fue tomado a los 400°C, y residuo final tiene abundante lignina, la disminución de este material, de baja concentración en las fibras tratadas con AA, podría explicar el aumento observado en la degradación alcanzada en esta temperatura para esta fibra (84.7%).

1.2.7 Prueba mecánica

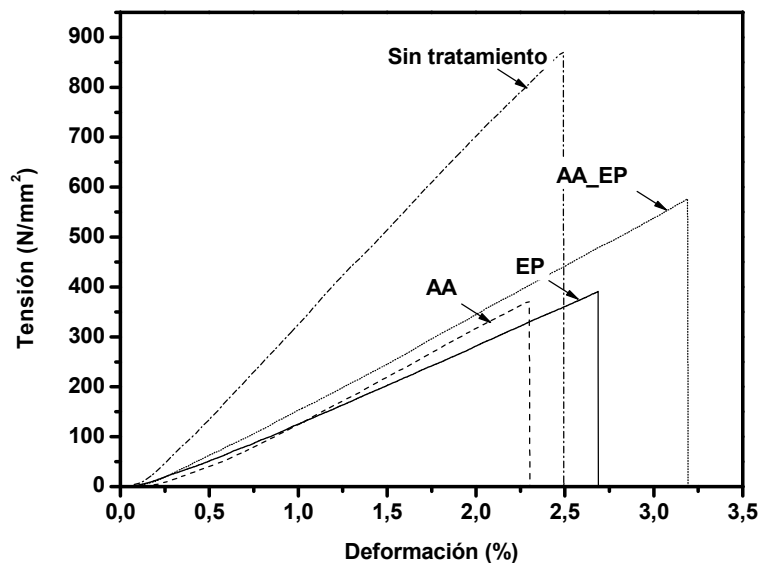
Debido a la alta variabilidad de las propiedades de las fibras naturales, la medición del diámetro medio de las mismas fue tomada con el uso de un microscopio, tomando cinco mediciones a través de la longitud de cada fibra. Fueron escogidas las diez fibras con la menor variabilidad en su diámetro. Los resultados de estas medidas son mostrados en la tabla 1-4.

Tabla 1-4 Diámetro medio de las fibras tratadas y sin tratar. En comparación con los dos últimos datos de otras publicaciones de las FSP sin tratar.

Fibra	Diámetro medio (μm)	Densidad (gr/cm^3)	Referencia
FSP Sin tratamiento	121 ± 22	1.202	Este trabajo
FSP tratadas AA	168 ± 6	0.929	
FSP tratadas AA_EP	128 ± 38	1.259	
FSP tratadas EP	143 ± 48	0.812	
Banana (pseudotallo, <i>musa sapientum</i>)	165 ± 85	1.350	[107]
Fibra de vidrio	0.55-0.77	2.5	[107]

Cuando se hincha una fibra, sus paredes celulares se tensionan, después al secarse, estas sufren una deformación por esta causa (hinchamiento causado después del tratamiento). Adicionalmente, y como ya se mencionó, los tratamientos químicos reemplazaron parte de los grupos libres de hidroxilo para introducir nuevos grupos hidrofóbicos, que formaron enlaces dentro del sistema expandiendo las dimensiones de las moléculas. La suma de estos factores puede explicar el incremento del diámetro medio de las FSP secas tratadas con respecto al diámetro medio observado de las FSP secas sin tratar.

La Figura 1-8 muestra la curva de tensión media representativa de las FSP. De la tabla 1-5 y la Figura 1-8 y tomando en cuenta los datos de dispersión para la determinación de estos parámetros, hay una ligera disminución de los valores de la tensión de ruptura de las fibras después de aplicados los tratamientos químicos.

Figura 1-8 Curva representativa de tensión vs. deformación de las FSP tratadas y sin tratar.**Tabla 1-5.** Propiedades mecánicas medias de las FSP tratadas y sin tratar.
Valores medios \pm s.d

Tensión convencional (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Elongación (%)	Referencia
700-800	27-32	2.5-3.7	[21]*
102.7	3.3	2.5	[108]*
355	33.8	5.3	[40]*
812 ± 204.9	28.2 ± 5.9	2.9 ± 0.6	Este trabajo*
418 ± 120.8	15.0 ± 4.3	2.6 ± 0.3	Este trabajo, EP
554 ± 222.5	18.1 ± 6.9	3.0 ± 0.4	Este trabajo, AA_EP
336 ± 83.5	12.6 ± 2.9	2.4 ± 0.3	Este trabajo, AA

* FSP sin tratamiento.

Las altas variaciones en los datos de las propiedades mecánicas de las FSP crudas en la tabla 1-5, pueden ser explicadas por las diferencias entre variedades de las plantas, ambientes agro-ecológicos de los cultivos y los procedimientos de extracción de la fibra. Las FSP con tratamientos químicos redujeron la resistencia a la tensión y el módulo de Young con respecto a las FSP crudas. A pesar de la reducción de la tensión de ruptura de las fibras tratadas en este estudio, sus características mecánicas fueron semejantes a las reportadas para otras FSP sin tratar en la tabla 1-5.

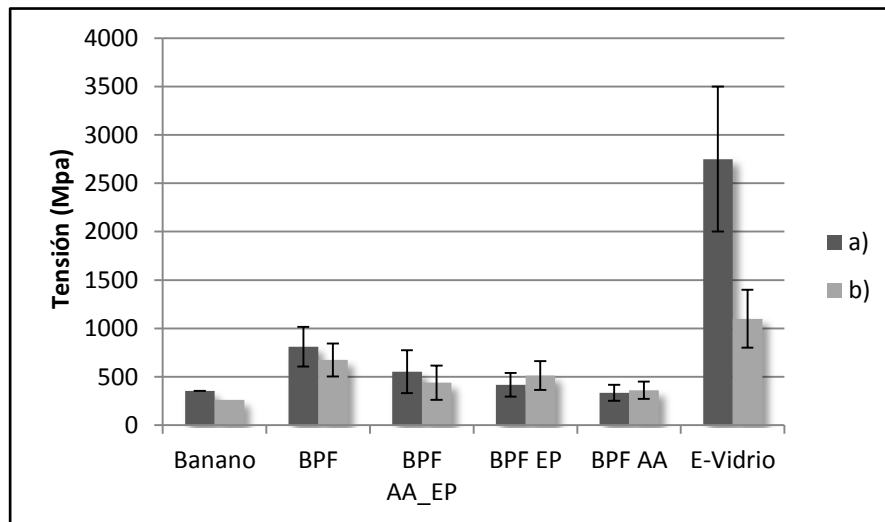
Tomando en cuenta que el contenido de humedad de las FSP tratadas, fue casi el mismo (ver tabla 1-3), se considera que no hubo efecto del contenido de agua en el comportamiento mecánico. Entonces, las diferencias de los parámetros mecánicos pueden ser explicadas como consecuencia de las reacciones en la superficie o cambios

físicos en la fibra, derivados de la pérdida de material cementiceo causado por la lixiviación de la lignina, gomas, ceras y hemicelulosas. De acuerdo con los resultados Raman, los dos tratamientos con anhídrido acético lixiviaron un alto contenido de material cementicio, por lo tanto esto puede explicar al menos parcialmente la reducción en la rigidez. Estos efectos y el bajo incremento en su diámetro medio, podrían justificar el que, de todos los tratamientos químicos la fibra con mejores propiedades mecánicas fue la FSP modificada con AA_EP.

Propiedades mecánicas específicas

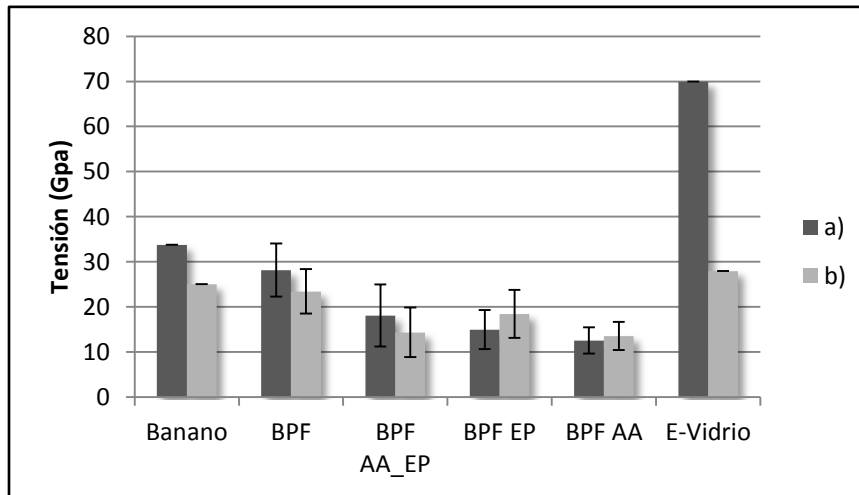
La utilización de materiales livianos es un factor muy importante para en el desarrollo de nuevos materiales. Esta característica es especial de las fibras naturales debido a su baja densidad en comparación a las fibras sintéticas como la fibra de vidrio (ver tabla 1-4). En la tabla 1-4 se observa como la densidad de FSP tanto tratadas como sin tratar es aproximadamente la mitad del valor del de la fibra de vidrio, lo que puede influir significativamente en sus propiedades mecánicas específicas.

Figura 1-9 a. Resistencia convencional Mpa b. Resistencia convencional específica Mpa/(g/cm³). Fibras FSP del presente trabajo y fibras de banano y vidrio reportadas [107].



La resistencia convencional y el módulo de Young específicos se obtienen al dividir su valor medido por la densidad, valores tomados de las tablas 1-4 y 1-5. En la Figura 1-9 se muestra una comparación entre la resistencia convencional y específica de las fibras de banano, vidrio y FSP. Las fibras de vidrio tienen un valor mayor que oscila entre 70 y 87 % respecto de las otras. Cuando se compara la tensión específica esta diferencia se reduce casi a la mitad.

Figura 1-10 a. Módulo de Young Gpa b. Módulo de Young específico Gpa/(g/cm³). Fibras FSP del presente trabajo y fibras de banano y vidrio reportadas [107].



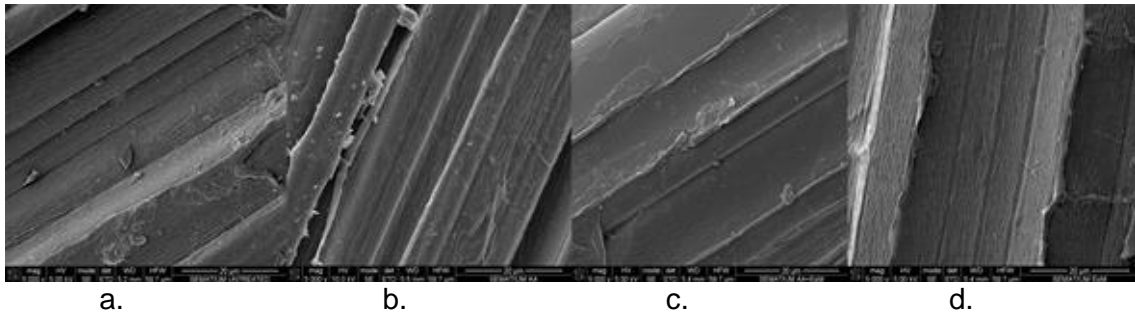
En la Figura 1-10 se comparan el modulo de Young y el específico de las fibras de banano- FSP y vidrio. Cuando se compara el módulo de Young se puede observar grandes diferencias las cuales varían entre los 51 y 82% de las fibras naturales respecto a la fibra de vidrio, pero cuando se observa el módulo de Young específico las diferencias se reducen significativamente y en algunos casos llegando a ser casi iguales. Considerando estas propiedades específicas, la densidad menor de las fibras naturales y en este caso la FSP aumentan su potencial aplicación comparado con fibras sintéticas como las de vidrio.

1.2.8 Morfología SEM

La microestructura y la morfología superficial de las FSP antes y después del tratamiento fueron estudiadas usando microscopia electrónica de barrido (SEM). Las estructuras superficial e interna cambiaron después de todos los tratamientos químicos. En la superficie de las FSP sin tratar (Figura 1-11a) pueden ser observadas algunas impurezas, posiblemente ceras y grasas. Estas impurezas fueron reducidas o completamente removidas en las FSP tratadas con AA, EP y AA_EP (Figuras. 1-11 b, c y d). Las superficies mas lisas en las FSP tratadas puede ser explicada también por la remoción parcial de lignina y hemicelulosa [109].

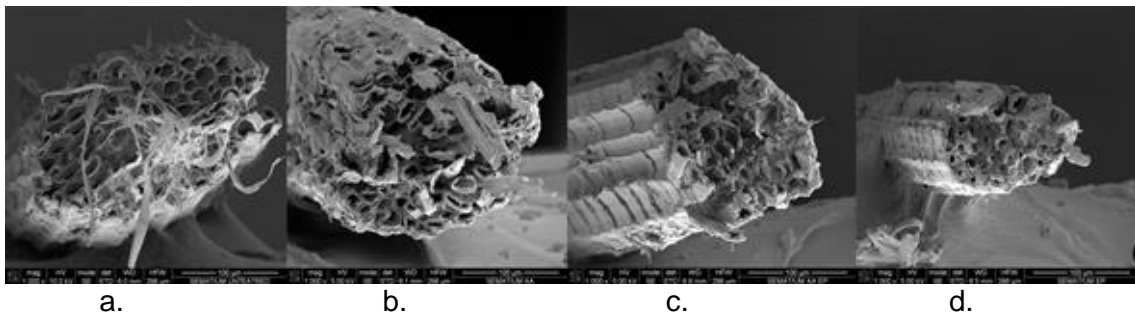
De las figuras 1-12 a-d se muestra el área de la sección transversal de las fibras, después de la prueba de tensión. Todas las microfotografías muestran una estructura de microfibrillas o haces de fibras huecas. Esta es la configuración general de todas las fibras naturales, donde las fibras son unidas por un material intercelular cementicio como la lignina y hemicelulosa [110].

Figura 1-11 Micrografías SEM de las FSP. Superficie de a. Sin tratamiento, b. AA, c. EP, d. AA_EP.



Las microfibrillas de las fibras sin tratamientos presentan un corte uniforme, en contraste con las fibras tratadas, donde el corte es irregular. Esto puede ser otra evidencia de la remoción parcial de material cementicio que une las microfibrillas.

Figura 1-12 Sección transversal de FSP a. sin tratamiento, b. AA, c. EP y d. AA_EP.



1.3 Conclusiones

Las fibras extraídas del pseudotallo de plátano (*Musa paradisiaca*) fueron tratadas con soluciones en acetona de anhídrido acético, epiclorhidrina y su mezcla. Como se esperaba después de los tratamientos las fibras perdieron parte de su hidrofiliidad y resistencia a la tensión, pero incrementaron su resistencia química a las soluciones alcalinas y ácidas. Estos cambios pueden ser explicados principalmente por el reemplazo de fracciones de OH por grupos éster e hidrógenos de carbono que impartieron a la fibra algún grado de hidrofobicidad la cual la hace más compatible con matrices poliméricas.

A partir de los ensayos de las isotermas de absorción y de hinchamiento en agua que la afinidad por la humedad de las FSP puede ser reducida por las modificaciones químicas derivadas de los tratamientos con anhídrido acético y epiclorhidrina. Se estudió también la reducción del peso de las fibras como una medida de su resistencia química a soluciones alcalinas y ácidas. En general, todos los tratamientos químicos mejoraron la resistencia a estos ambientes, pero en la resistencia a ambientes alcalinos fue menor comparada con la resistencia a ambientes ácidos.

La espectroscopia Raman confirmó diferentes grados de remoción de ceras, hemicelulosa y lignina y algunas modificaciones químicas ocurridas en las fibras tratadas. Cuando las FSP reaccionaron con los químicos, los grupos acetil y epóxido del anhídrido acético y la epiclorhidrina respectivamente, reemplazaron parte de los grupos hidroxilo de las paredes de las FSP con fracciones hidrofóbicas y/o promovieron el inter e intra entrecruzamiento en la fibra.

Las propiedades mecánicas de las FSP crudas y tratadas fueron investigadas mediante ensayos de tensión para una sola fibra. Los diámetros medios de las FSP secas tratadas respecto a las FSP sin tratar fueron mayores, mientras que la resistencia media a la tensión de las fibras tratadas se redujo ligeramente comparada con la de las fibras sin tratar. Sin embargo, en comparación con otros datos publicados para las FSP, en todos los casos, las fibras tratadas de este trabajo mostraron mejores características mecánicas comparadas con las de otras variedades de fibras de este tipo de plantas.

2. Capítulo 2

Elaboración de un material biocompuesto a partir de las fibras de plátano

Para la elaboración de un prototipo de material biocompuesto (PPB) (ver Figura 2-1) se realizaron dos procedimientos: el primero fue mediante un proceso de infusión, que utilizó fibras de jute y sisal tejidas y pre-tratadas con anhídrido acético y epiclohidrina (durante una pasantía de la autora en la Universidad de Minho, Portugal). El segundo utilizó un proceso de moldeo manual para las fibras de fique, vidrio y plátano (sin tratar y tratadas). A los PPB del segundo procedimiento les fueron evaluadas sus propiedades mecánicas, de absorción de agua y de morfología superficial.

Figura 2-1 Prototipos de materiales bio-compuestos a partir de fibras naturales tejidas.



A continuación se describe el proceso de elaboración de cada una de las técnicas.

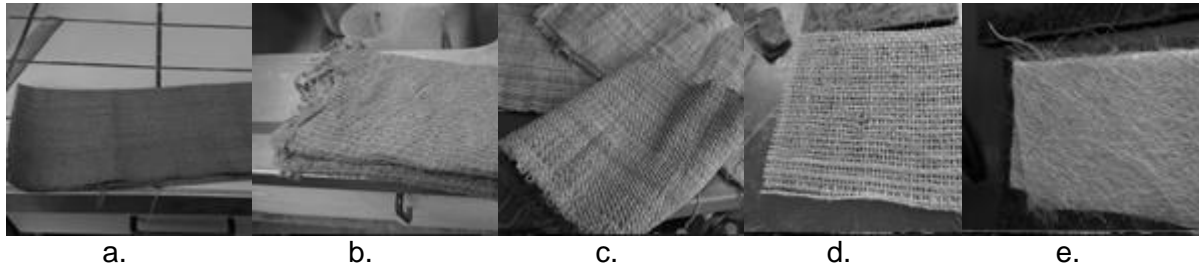
2.1 Materiales y Métodos

2.1.1 Preparación de las Fibras:

Las fibras utilizadas para fabricar los PPB fueron sisal, lino, plátano (FSP), fique (F) y fibra de vidrio (V). Las fibras de sisal y lino se adquirieron en una empresa

manufacturera, previamente tejidas, como se puede ver en la Figura 2-2 a y b. Posterior a esto fueron pre-tratadas con anhídrido acético y su combinación con epiclorhidrina, de acuerdo al procedimiento descrito en el capítulo 1. Las FSP fueron extraídas, hiladas y posteriormente tejidas en una tejedora manual. Las fibras de fique tejidas y las de vidrio fueron compradas en el mercado.

Figura 2-2 Fibras tejidas de a. sisal b. lino c. plátano d. fique y e. vidrio



2.1.2 Preparación del compuesto

Método de infusión para la elaboración de prototipos de materiales compuestos:

Entradas y Salidas del proceso

Entradas:

Información: pesos de la fibra, resina y catalizador.

Materia: Materiales: molde, cinta, tela de poliéster, malla, plástico, desmoldante, resina epóxica, catalizador y bomba de vacío.

Energía: eléctrica.

Salidas:

Información: tiempo de infusión de la fibra, tiempo de secado, cantidad de resina y catalizador final usado.

Material: prototipo de material compuesto, residuos de resina, vasija y telas .

Descripción del proceso

Esta es una técnica que utiliza el vacío para impregnar las fibras de un laminado con resina. El proceso inicia con la limpieza y preparación del molde, así se asegura una superficie uniforme y limpia de cualquier tipo de residuo. El molde debe ser al menos 15 cm más amplio que las dimensiones de la pieza de compuesto requerido, pues debe haber espacio para colocar la cinta y los tubos por donde entra la resina y se hace el vacío. Consecutivamente se aplica una capa uniforme de desmoldante, para evitar la adhesión entre el molde y la resina. El producto Mold Release fue utilizado en este caso pues además reduce las imperfecciones en la superficie del compuesto. Se pega la cinta doble faz (sealant tape AT 200) alrededor de la fibra a una distancia de 15 cm, asegurando los bordes y que no queden espacios entre la cinta y el molde.

Después de preparado el molde se ponen las telas y las fibras tejidas. Generalmente se utilizan de manera tejidas pues facilitan su manipulación y la uniformidad de la superficie,

pues no se forman arrugas. Se colocan tantas capas de fibra tejida como espesor se requiera. Luego se cubren con la tela "peel ply", que debe sobrepasar 10cm de la fibra tejida. Sobre esta se coloca la malla "flow", que será la encargada de darle espacio a la resina para hacer el recorrido convenido.

A continuación se realiza la preparación de las líneas de vacío y de alimentación de resina que se ubican en el extremo más cercano a la bomba de vacío y los/el tubo se adhiere con cinta. En la parte opuesta se colocan los tubos de alimentación (spiral wrap) de la resina, por donde esta ingresa y se empieza a impregnar la fibra, dentro del área de la cinta. En la parte externa de la cinta se coloca un tubo que une el spiral wrap hasta donde se almacena la resina preparada.

La bolsa de vacío adherida a la cinta, no debe quedar precisa, ni muy suelta. Se debe garantizar que no haya fugas, ya que si hay una filtración de aire, se daña el proceso porque se forman burbujas en la resina. Antes de activar la bomba de vacío se debe cerrar la entrada de resina, generalmente con alicates o pinzas. Por último asegurar muy bien que todos los componentes estén en su lugar antes de iniciar a generar el vacío.

La bomba de vacío, debe ser de una potencia y caudal adecuados según la cantidad de aire que desea extraerse. Esta bomba debe conectarse a una trampa de resina para no dejarla pasar, en caso de que fuera absorbida por la bomba. Así puede empezar a generarse el vacío y se empieza a observar detenidamente si hay pérdidas de aire. Al garantizar el sellado perfecto, el vacío compacta la bolsa y se pega contra el laminado.

La cantidad de resina utilizada se establece de acuerdo al peso de la fibra. Generalmente se parte de un compuesto de 50% de fibra y 50% de resina. La resina preparada consta de la resina con el catalizador o endurecedor que debe ser alrededor del 40% de acuerdo a la resina. Los dos componentes fueron adquiridos en *Entropy Resins EU*, elaboradas con polímeros naturales y bio-renovables, debidamente mezclados.

Al preparar la impregnación, se recomienda que el tubo alimentador de la resina sea cortado en diagonal para evitar que se pegue en el fondo de la resina por efecto de la succión. Se abre la entrada que había sido cerrada con la pinza para que la resina ingrese a la matriz. El tiempo de impregnación varía de acuerdo al tipo de fibra y se debe tener la precaución que no se acabe la resina preparada. Una vez impregnada toda la pieza se cierra nuevamente la entrada de resina antes de que esta se acabe, para evitar la entrada de aire. El vacío se continúa realizando, hasta que la resina se polimerice por aproximadamente 12 horas.





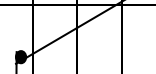


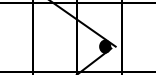

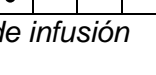

Una vez la resina polimerice se apaga la bomba de vacío y se retira la bolsa, la malla y la tela y el compuesto puede ser retirado del molde.

Diagramación:

Figura 2-3 Diagrama analítico del proceso moldeo manual.

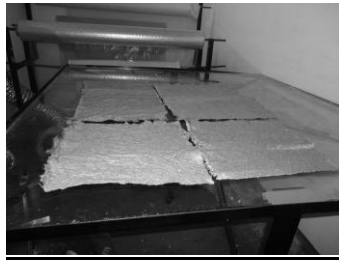
Proceso: Elaboración de un material biocompuesto, proceso de INFUSIÓN			
Material:	Actividad	Actual	Tiempo: 35 h. 30: min
Fecha:	Operación ○	23	Costo:
Operador:	Transporte ⇨		
Comentario:	Espera D	2	
	Inspección □	4	
	Almacenaje ▽		
Descripción de la actividad	Símbolo	Tiempo (min.)	Observación:
	○ ⇨ D □ ▽		
1. Limpiar	●	30	Molde
2. Engrasar	●	10	Molde con desmoldante
3. Colocar	●	10	Cinta
4. Pesar y anotar	●	1	La fibra
5. Colocar	●	1	Fibras tejidas y secas
6. Colocar	●	1	Tela de poliéster peel ply
7. Colocar	●	1	Malla Flow media
8. Colocar	●	3	Tubos distribuidores de vacío spiral Wrap en forma periférica.
9. Recubrir	●	3	Tubos anteriores con la tela de poliéster
10. Colocar	●	3	Tubos alimentadores de la resina, en el sitio específico y cerrados con pinzas
11. Sellar	●	1	Con la bolsa plástica y la cinta
12. Hermetizar	●	5	Asegurar que esté completamente sellado
13. Prender	●	0.2	La bomba de vacío
14. Hacer vacío	●	2	Asegurar que no haya escape de aire en el sellado y como la bolsa compacta el laminado.
15. Revisar	●	5	Que no hayan fugas de vacío y que todos los componentes estén debidamente colocados
16. Pesar la resina	●	0.5	Generalmente se parte de igual peso calculado por la fibra
17. Pesar el endurecedor	●	0.5	Es el 40% del peso de la resina
18. Mezclar	●	1	La resina y el endurecedor en un recipiente de plástico (luego será botado)

Figura 2-3 (Continuación)

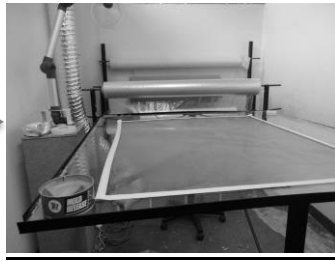
PREPARAR RESINA			
Descripción de la actividad	Símbolo	Tiempo (min.)	Observación:
19. Colocar		0.5	La mezcla de la resina preparada en extremo del tubo alimentador
20. Ingresar la resina		0.5	La succión producida por la diferencia de presiones, hace que la resina ingrese en forma rápida y pareja
21. Observar		2	Que no hayan inconvenientes
22. Esperar		60	Que la resina impregne completamente la fibra
23. Controlar			Que la resina no se acabe e ingrese aire
24. Cerrar		0.5	El tubo de alimentación, cuando la resina haya impregnado completamente la fibra.
25. Continuar con el vacío		24 h	Hasta que la resina gelifique
26. Apagar la bomba		0.5	Cuando la resina gelifique se apaga la bomba, nunca antes
27. Esperar		10 h	Que la matriz este completamente seca
28. Retirar		5	El plástico, la malla y la tela de poliéster
29. Despegar		5	El material compuesto del molde

Ideograma proceso de infusión

Figura 2-4 Ideograma del proceso de infusión para la elaboración de materiales compuestos.



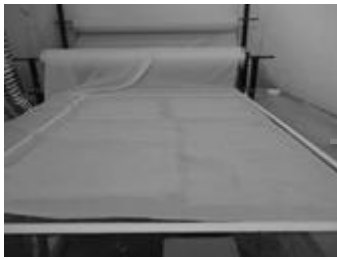
Preparar y limpiar molde.



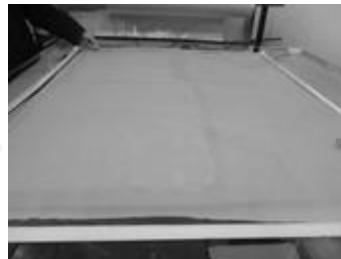
Cubrir con el desmoldante.



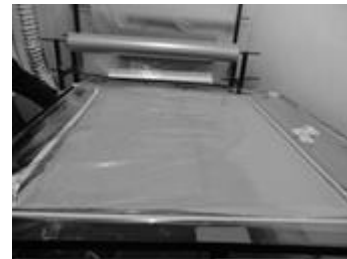
Colocar la fibra.



Colocar tela de poliéster.



Colocar malla.



Pegar el plástico con la cinta.



Colocar tubos distribuidores de vacío.



Colocar tubos alimentadores.



Prender la bomba de vacío.



Hermetizar la matriz y revisar que no haya escape de vacío.



Preparar la resina y mezclarla con el endurecedor.

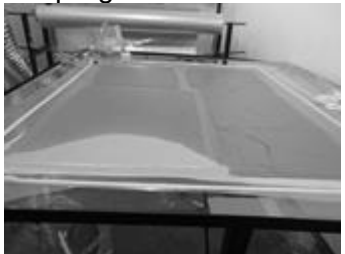


Colocar la resina preparada en el tubo alimentador y abrirlo.

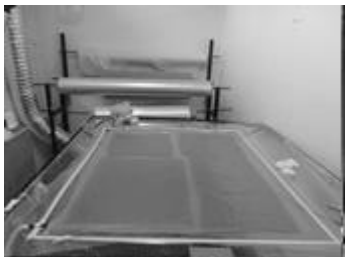
Figura 2-4 (Continuación)



Inicia el proceso de impregnación de la resina.



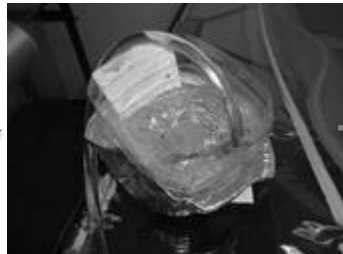
Esperar que la fibra este completamente impregnada, revisando la cantidad de resina.



La fibra está completamente impregnada, la bomba se deja prendida hasta que la resina este completamente seca



Impregnación de la resina en la fibra.



Se observa como la resina se empieza a gelatinizar.



Se retiran la tela de poliéster, la malla y el plástico



Vista posterior del proceso de impregnación.



Se cierra el tubo de entrada de la resina cuando la fibra esta completamente impregnada.



Se observa como el material compuesto se ha secado.

Método de molde manual para la elaboración de prototipos de materiales compuestos:

Entradas y Salidas del proceso

Entradas:

Información: peso de la fibra, resina y catalizador.

Materia: Materiales: molde, fibra tejida, resina poliéster (poliéster insaturado ortoftálico (semi-elaborado), catalizador peróxido de Meck oxidol BP-500-benzoilo fueron suministrados por Industrias MACAR SA (Palmira, Colombia), brocha, mezcladores, vasijas y prensa.

Energía: mecánica

Salidas:

Información: Cantidad de resina poliéster preparada utilizada por gramo de fibra, tiempo de secado del compuesto, grosor de las placas por cada capa de fibra tejida puesta.

Material: prototipo de material compuesto, residuos de resina, vasijas.

Descripción del proceso:

El proceso descrito a continuación es el realizado en diferentes talleres de la ciudad de Manizales para la reparación de partes de autos fabricados con fibra de vidrio. Es una técnica sencilla que permitió evaluar la fibra de plátano tratada y sin tratar y compararla con las fibras de fique y vidrio, al fabricar todos los compuestos bajo las mismas condiciones.

Primero se preparan los diferentes materiales a ser utilizados durante el proceso:

Se alistan las dos placas metálicas las cuales se limpian y engrasan con el desmoldante (SIMONIZ), para evitar que se pegue el compuesto y al retirar las placas después de secado, no haya inconvenientes. Previamente, la fibra es cortada a la medida de las placas, el grosor de la placa de material compuesto depende de la cantidad de capas de fibra tejida. Para este caso del espesor de cada placa de plátano sin tratar, tratada, fique y vidrio fueron de 2, 2.5, 1.5 y 1 mm respectivamente.

La relación de resina:catalizador fue 30:1; estos materiales fueron mezclados en un beaker con una espátula. La cantidad de resina preparada por cada gramo de fibra de plátano, fique y vidrio es de 5, 5 y 3 ml respectivamente.

Al colocar la fibra en la placa se aplica sobre ella la resina con una brocha asegurando la impregnación de la fibra. Después se coloca la otra placa encima y se trasladan a la prensa, donde se presiona de manera uniforme y se asegura que las dos caras del material queden lisas y se impregne debidamente la fibra. Después de ejercer presión, la resina sobrante sale por los bordes de la placa. Después se espera el tiempo de secado inicial de la resina de 45 minutos, donde el material puede ser retirado y se esperan 4 horas para que esté completamente curado.

Diagramación:

Figura 2-5 Diagrama analítico del proceso infusión.

Diagrama analítico del proceso

Proceso: Elaboración de compuesto con el proceso de MOLDEO MANUAL			
Material:	Actividad	Actual	Tiempo: 1: 30 Seg. 2: 601.5min
Fecha:	Operación ○	12	Costo:
Operador:	Transporte ⇨	2	
Comentario:	Espera D	1	
	Inspección □	1	
	Almacenaje ▽		
Descripción de la actividad	Símbolo	Tiempo (min.)	Observación:
	○ ⇨ D □ ▽		
1. Limpiar	●	1	Molde
2. Engrasar	●	2	Molde con desmoldante
3. Pesar y anotar	●	1	La fibra y su peso
4. Colocar	●	0.2	Fibras tejidas y secas en el molde
PREPARAR RESINA			
5. Medir la resina	●	3	Aproximadamente por cada gramo de fibra 5 ml de resina
6. Medir el catalizador	●	3	Por cada 30 de resina 1 ml de catalizador
7. Mezclar	●	0.5	Con una espátula
COMPUESTO			
8. Cubrir	●	5	Con una brocha la fibra hasta que quede completamente impregnada
9. Asegurar	●	1	Que toda la fibra este impregnada de la resina
10. Colocar	●	0.2	El molde superior
11. Colocar la matriz en la prensa	●	0.2	Presionar para garantizar la uniformidad de la matriz
12. Prensar	●	0.2	Hacer presión
13. Esperar que la resina seque	●	45	Aproximadamente 30 min bajo presión
14. Retirar la presión y extraer la matriz	●	0.5	Extraer el material compuesto del molde
15. Esperar	●	30	para completar el secado bajo presión.
16. Esperar	●	480	Proceso de secado final, para que el compuesto este completamente seco.

Ideograma de moldeo manual

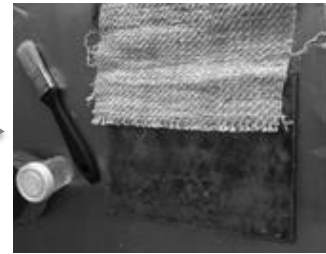
Figura 2-6 Ideograma para el proceso de moldeo manual.



Alistar los materiales.



Limpiar y engrasar el molde con el desmoldante.



Colocar la fibra.



Preparar resina.



Medir la resina y el catalizador.



Mezclar la resina.



Echar la resina a la fibra con una brocha.



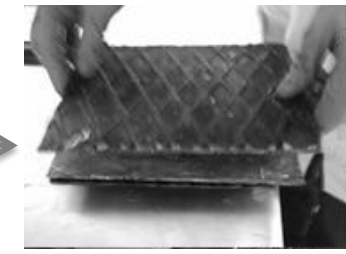
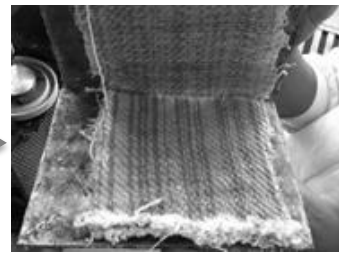
Entrapar la fibra.



Colocar las capas de fibra necesarias.



Asegurar que la resina haya entrapado las fibras.

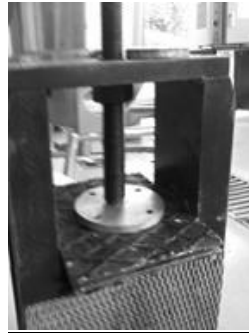


Colocar el molde superior.

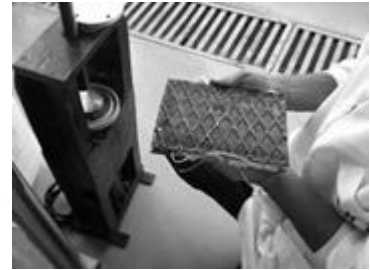
Figure 2-6 (Continuación)



Colocar en la prensa.



Esperar que la resina seque.



Retirar el molde de la prensa.



Abrir el molde.



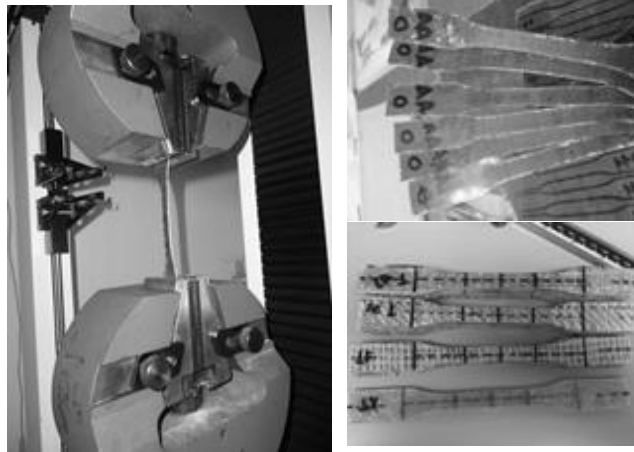
Obtener el prototipo de material compuesto.

Las probetas para los diferentes ensayos fueron cortadas después de realizar los compuestos de acuerdo a las especificaciones de la norma.

2.1.3 Prueba de tensión

La prueba de tensión fue realizada en una máquina universal de tensión AG-X marca Shimazu. Cinco muestras de cada tipo fueron preparadas de acuerdo con la norma internacional ISO 527-4: velocidad de 20 mm/min, rango de carga de 1500 N, pre-carga de 5 N, extensión de 25 mm, longitud calibrada de 50 mm y longitud entre mordazas de 120 mm (ver Figura 2-7). Los resultados medios obtenidos fueron el esfuerzo máximo de tracción, deformación y módulo de Young (Laboratorio de polímeros UNAL-Manizales).

Figura 2-7 a. Máquina universal de tensión, b. Probetas de materiales compuestos para la realización de la prueba de tensión.



a.

b.

2.1.4 Prueba de impacto

La prueba de impacto fue realizada en una máquina Ceast Ce-man 022 (Turín-Italia UDEA) con una potencia máxima de 11 J y sensibilidad de 0.02. Cinco muestras de cada tipo fueron preparadas de acuerdo con la norma internacional ASTM-D256-10 (ver Figura 2-8). Las probetas fueron cortadas con las siguientes dimensiones 64 mm x 13 mm x 5 mm con muesca, para determinar la resistencia al impacto. La probeta de ensayo fue apoyada por una viga en voladizo vertical con la muesca de frente al péndulo y fueron rotas por una única oscilación del mismo. La resistencia al impacto o tenacidad del poliéster forzado con FSP, fique y vidrio, a temperatura ambiente fueron obtenidos.

Figura 2-8 a. Máquina prueba de impacto, b. PPB para la realización de la prueba de impacto.



a.

b.

2.1.5 Absorción de agua

La prueba de absorción de agua de los PPB de FSP tratadas, sin tratar, de fique y vidrio fueron medidas de acuerdo a la norma ASTM D 570-90 (2010) (IBA-Manizales). Cinco muestras fueron cortadas a una medida aproximada de 76.2 mm x 25.4 mm x 5 mm. Las probetas fueron sumergidas en agua destilada a temperatura ambiente (23°C) y agua hirviendo (93°C), en diferentes intervalos de tiempo. Para controlar la temperatura se utilizó un baño termostático Reciprocal Shaking Bath modelo 250 (Thermo electron Corporation, USA) (ver Figura 2-9). Luego de las pruebas a las probetas se les removió el exceso de agua superficial con papel antes de ser pesadas. A partir de estos datos fue obtenido el porcentaje de absorción de agua.

Figura 2-9 a. Máquina para prueba de absorción b. Probetas de los diferentes tipos de compuestos.



a.



b.

2.1.6 Resistencia química

Para la prueba de resistencia química en ambientes alcalinos y ácidos, las muestras secas fueron inmersas en 100 ml de NaOH 1N y HCl 1N a 20°C durante diferentes intervalos de tiempo (24, 48, 72, 96, 120 y 168 h). Después de cada intervalo a las muestras se les retiró la humedad superficial con una servilleta y fueron pesadas. El porcentaje de resistencia química (Prq) fue calculado en términos de peso ganado, como se describió en la ecuación (1.2) [16]:

2.1.7 Microscopia ESEM

Las micrografías fueron realizadas en un equipo Enviromental scanning electron microscopic XL 30 ESEM marca Philips (Eindhoven, Holanda. Laboratorio física del plasma UNAL-Manizales)). La máquina tiene un detector de electrones secundarios gaseosos en una atmosfera de agua. Los resultados son mostrados a magnificaciones de 250X, 500X y 1000X.

2.2 Resultados y Discusiones

Las propiedades físicas de los compuestos dependen de muchos factores como la resistencia y orientación del material de relleno en el compuesto, los tratamientos

superficiales de las fibras, procedimiento de fabricación del compuesto, el tipo de matriz, entre otros [111].

2.2.1 Prueba de tensión

El efecto de los tratamientos químicos en las propiedades mecánicas de los PPB hechos con las FSP, fue estudiado mediante la medida del módulo de Young, la resistencia última a la tracción y la elongación en el momento del rompimiento. En la tabla 2-1 se muestran los resultados medios obtenidos y su desviación estándar. En todos los casos puede verse un aumento en los promedios de las propiedades citadas, por lo que puede inferirse que la modificación química influye en las propiedades de los PPB. El tratamiento con AA_EP aumentó considerablemente la resistencia media a la tracción seguido de EP y AA. El incremento del tratamiento de AA_EP en el módulo de Young fue de 18.27%, mientras las fibras con AA aumentaron en 10.43% el porcentaje de elongación.

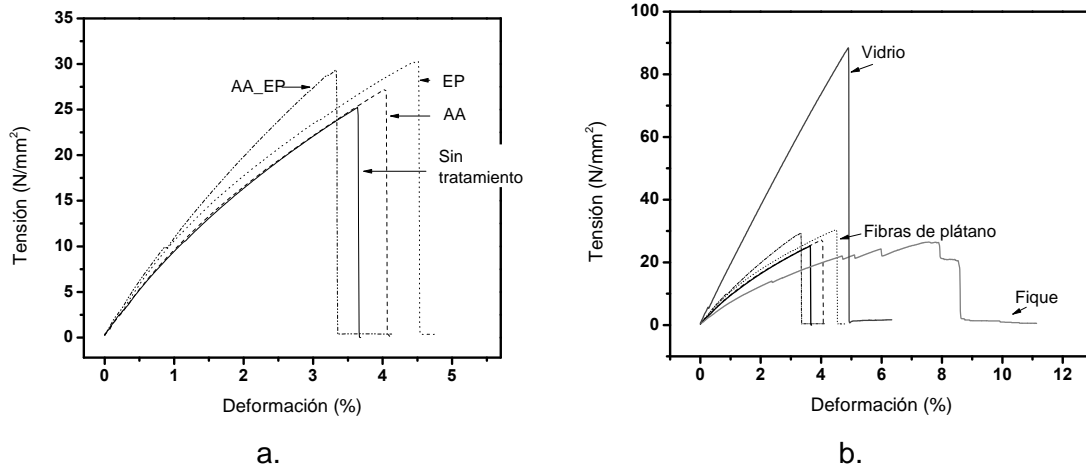
Como se describió en el capítulo 1 los tratamientos promueven la remoción de ceras, hemicelulosas y pectinas de la superficie de la fibra, así como los posibles enlaces con los grupos OH, lo que conlleva a generar algunos cambios en su morfología y composición química. En los resultados SEM (capítulo 1) se pudo observar una superficie más lisa de las fibras individuales tratadas, lo que incrementó la homogeneidad de las FSP y la hidrofobicidad de la superficie de la fibra. Estos cambios pueden por lo tanto conllevar a una mejor adhesión inter-facial entre la fibra y la matriz y con ello un aumento en sus propiedades [112] [113].

Tabla 2-1 Resultados de la prueba de tensión de PPB de las FSP tratadas y sin tratar, fique y vidrio.

	Resistencia a la tracción Mpa	Porcentaje de elongación %	Módulo de Young Gpa
Sin-tratamiento	27.67 ± 2.89	3.64 ± 0.25	1.04 ± 0.0019
AA	28.88 ± 3.97	4.02 ± 0.72	1.04 ± 0.0021
EP	29.88 ± 4.1	3.90 ± 0.37	1.13 ± 0.0015
AA_EP	30.71 ± 6.2	3.82 ± 0.79	1.23 ± 0.0011

En la Figura 2-10 a. se observa la curva de tensión vs. deformación de los compuestos de FSP tratadas y sin tratar. El tratamiento con AA_EP muestra una mayor rigidez (superior módulo de Young), mientras los otros dos tratamientos, además de aumentar la resistencia última a la tensión de los compuestos, incrementaron su deformación última o elongación al momento del rompimiento. En la Figura 2-10 b. se muestra una comparación entre los resultados de las pruebas mecánicas de los compuestos de FSP, de fibra de V y de F. Es notoria la alta resistencia mostrada por las fibras de vidrio (aprox. 400% mayor que las de las fibras naturales). Las muestras elaboradas con fibras de fique presentaron un rompimiento irregular y alcanzaron más de 2 veces la elongación que los PPB hechos con FSP.

Figura 2-10 Resultados de la prueba de tensión. a. Materiales compuestos de las FSP b. Todos los materiales compuestos.



En la tabla 2-2 se comparan los valores medios obtenidos resistencia a la tracción, el módulo de Young y elongación, entre el mayor valor obtenido de los compuestos de FSP tratadas, fique y vidrio fabricadas en las mismas condiciones y fibras de banana con diferentes tratamientos, porcentajes y longitudes; en matriz de poliéster (reportados en la literatura). Como era de esperarse las medidas para los especímenes fabricados en poliéster sin relleno muestran algunos valores menores para estas propiedades. La fibra de fique muestra propiedades mecánicas más pobres con alto porcentaje de elongación a diferencia de la fibra de vidrio, la cual si presenta propiedades superiores. La adición de fibra aumentó las propiedades mecánicas del compuesto, pues mostró mejor resistencia que la resina poliéster.

Entre los compuestos elaborados con fibras bajo la misma metodología, al comparar las modificaciones químicas (ver tabla 2-2 a y b), hay un incremento de la resistencia última a la tensión entre 2 y 11 % comparado con los materiales hechos con fibras sin tratar. Los compuestos con fibras tratadas con EP y AA_EP BPF mostraron 7.9 y 10.8% de aumento en esta propiedad relativamente similar a los tratamientos con silano. Los compuestos con EP y AA_EP también mostraron un incremento de 8.7 y 18.3 % en el módulo de Young respectivamente, comparados a las fibras sin tratar. Los tratamientos con silano aumentaron estas propiedades, pero en menor medida.

Otro aspecto a resaltar es que usualmente las bajas proporciones de fibra en el PPB están asociadas a un pobre comportamiento mecánico [29]. Sin embargo, y pesar de que en este trabajo fue utilizado el modo de fabricación por moldeo manual, que no permite contenidos de fibra por encima del 14-15% [114], se lograron mejoras sensibles en las propiedades mecánicas de los PPB respecto de las que se observaron en los especímenes sin tratar. Ya que con el incremento en el porcentaje de fibra se mejora la unión con la matriz y las cargas de tensión pueden ser mejor distribuidas [111], sería de esperar que, usando otra técnica de fabricación que permita incrementar el porcentaje de

fibra, los PPB fabricados con FSP modificadas lograrían desempeños mecánicos superiores.

Tabla 2-2 Comparación de diferentes resultados de la prueba de tensión de materiales compuestos.

Fibra	% de fibra en el compuesto	Resistencia a la tracción MPa	Elongación %	Módulo de Young GPa	Ref.
Poliéster	0.0	15.1-33		0.44-0.63	[26, 73, 74]
Plátano	14.9	30.17	3.82	1.23	Este trabajo
Fique	14.9	18.30	7.54	0.95	
Vidrio	23.2	95.41	5.50	1.94	
a. Fibra sin tratar	20.0	32.9	--	0.68	[29]
a. Fibra 0.3% silano		35.5		0.79	
a. Fibra 1% silano		37.1		0.52	
b. Sin tratar	40.0	57.0	3.2	1.10	[115]
b. 0.6% A151 (silano)		61.0	3.7	1.80	
b. 0.6% A1100 (silano)		58.0	2.4	0.20	
b. 0.6% A174 (silano)		60.0	3.6	1.40	
c. Banana	0.0	45		0.21	[29, 111]
	10.0	22	6.90	0.07	
	20.0	30	2.70	0.68	
	30.0	48	5.60	0.53	
	40.0	52-59	6.90	0.59	
d. Banana/poliéster 30 mm long. fibra	20.0	41	3	1.49	[116]
	30.0	55	6	1.73	
	40.0	68	6	1.87	
	50.0	48	7	1.53	
e. Banana/poliéster 30% de carga de fibra	Long.				[116]
	10.0	36	3	0.99	
	20.0	40	4	1.46	
	30.0	55	6	1.73	
e. Banana/polipropileno NaOH (10%)		31	6	1.52	[117]
		40	3.4	1.66	

Tal como fue mostrado en estudios similares con fibra de banana y matriz de poliéster, en el cual después de un 10% de peso de fibra, hubo un incremento proporcional hasta un máximo del 40%. (ver tabla 2-2 c y d.) Las bajas proporciones de fibra no son suficiente para impartir la tensión al polímero [29]. Con el incremento en el porcentaje de fibra las cargas de tensión pueden ser mejor distribuidas, se mejora la unión con la

matriz, resultando en mejor resistencia a la tensión [111]. Es posible que al aumentar el porcentaje del contenido de las FSP usadas para los compuestos fabricados en el presente trabajo, aumente así mismo las propiedades de tensión del material compuesto.

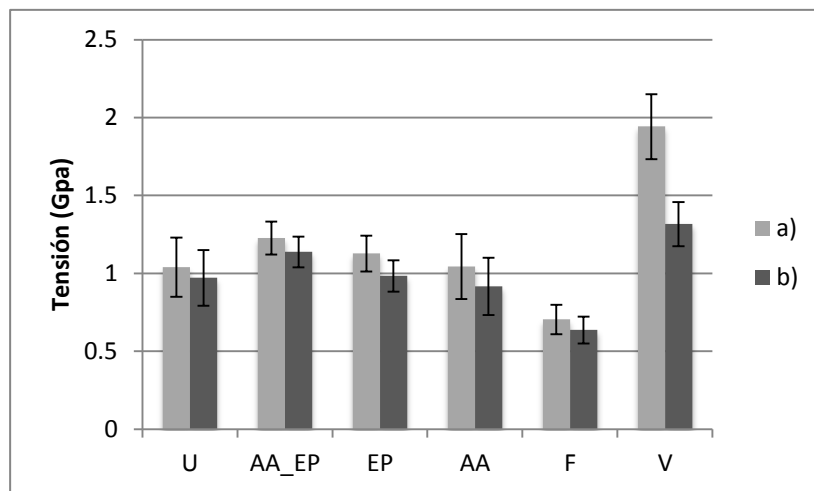
La longitud de la fibra también ha mostrado influencia en las propiedades mecánicas (ver tabla 2-2 e.). En el trabajo citado, los materiales compuestos con un 30% de carga fueron evaluados a diferentes longitudes. Las fibras cortadas a 30 mm presentaron la mayor resistencia, la cual disminuyó cuando fueron cortadas a 40 mm. En otro trabajo se evaluó el efecto de la longitud de la fibra entre 5 mm y 25 mm, y se encontró una mejor respuesta a la tensión en los compuestos con fibras de 15 mm de longitud. Este comportamiento puede atribuirse a la inadecuada y baja humectación de la resina a través de la longitud de la fibra, cuando esta aumenta, en este caso hay un mayor efecto por estar tejidas [118].

El tratamiento con NaOH de las fibras de banano en matriz de polipropileno, aumentaron las propiedades del compuesto elaborado (ver tabla 2-2 e.). Pero al comparar la resistencia alcanzada respecto a las propiedades del polipropileno (28.4 Mpa y 1.2 Gpa [119]) el tratamiento no tiene la misma influencia que el realizado en el presente trabajo. Por ejemplo la rigidez al incorporar FSP AA_EP incrementó aproximadamente 132% la rigidez del poliéster, mientras el tratamiento con NaOH de las fibras, en la resina de polipropileno aumento su rigidez en aproximadamente 38%. Esto puede confirmar la buena adhesión alcanzada entre las FSP tratadas, en la matriz polimérica.

Propiedades mecánicas específicas

Como se mencionó anteriormente las materias primas livianas son de interés en la fabricación de materiales.

Figura 2-11 a. Módulo de Young Gpa b. Módulo de Young específico Gpa/(g/cm³). Compuestos FSP, fique y vidrio.

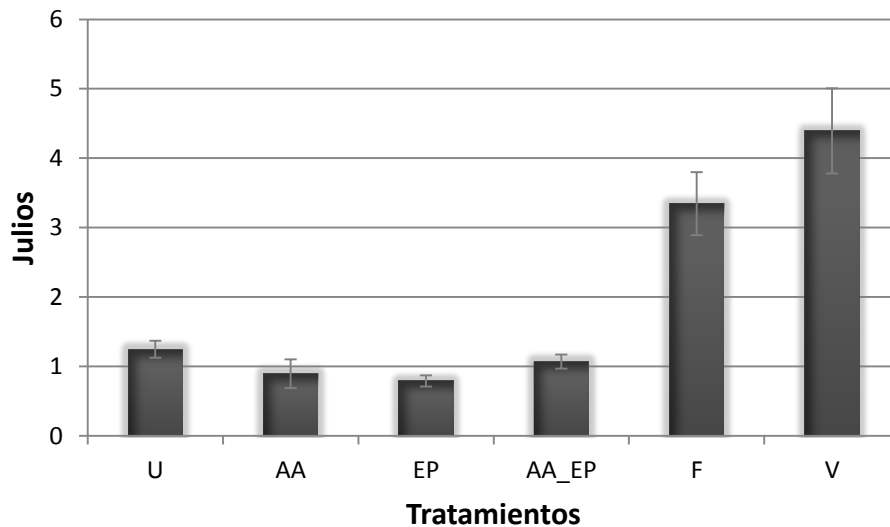


La baja densidad de las fibras naturales las hace competitivas frente a fibras sintéticas de características mecánicas superiores para su uso en compuestos. En la Figura 2-11 se observan el módulo de Young y el específico de los diferentes compuestos. Como era de esperarse la baja densidad de las FSP influyen en el su comportamiento. El módulo de Young específico disminuye significativamente en los compuestos con refuerzo de fibra de vidrio alcanzando a ser similar a los biocompuestos de FSP tratadas con AA_EP con una diferencia de 13.6%. De este resultado se puede concluir que las FSP puede llegar a ser utilizadas en materiales biocompuestos en aplicaciones muy similares a las que se realizan hoy en día con las fibras de vidrio.

2.2.2 Prueba de impacto

La Figura 2-12 muestra los resultados obtenidos para los diferentes tipos de compuestos, después de realizada la prueba de impacto. Los compuestos hechos con las FSP tratadas muestran una disminución de la resistencia al impacto respecto a los elaborados con FSP sin tratar. Los PPB de fibras de fique y vidrio, presentan propiedades de resistencia al impacto superiores comparadas con las FSP tratadas y sin tratar.

Figura 2-12 Resultados de la prueba de impacto a las diferentes clases de materiales compuestos.



La disminución de la tenacidad de las FSP tratadas es consecuente con el aumento de la interacción y adhesión obtenidas entre la fibra y la matriz. Pues al incrementar la interacción entre la fibra y la matriz, hay mejor enlace entre las dos fases, y por lo tanto la falla de los compuestos ocurre a mas bajo impacto. La deformación plástica de la matriz es el principal proceso de absorción de energía en el impacto, lo que disminuye con el aumento de la adhesión [112]. Este resultado concuerda igualmente con el alto valor de impacto obtenido por las fibras de fique, las cuales mostraban alta deformación a la elongación. Es decir, en algunos casos de materiales compuestos, al aumentar la tensión del compuesto, la tenacidad disminuye.

En la tabla 2-3 se comparan los valores obtenidos del presente trabajo con fibras de banana reportadas por otros autores. Se observa que al incrementar el porcentaje de fibra, la resistencia al impacto aumenta también, donde el valor encontrado de las FSP sin tratar, depende del porcentaje de carga puesto en la matriz. Por lo tanto puede ser que al utilizar una técnica que lo permita, al incrementar la fibra en la matriz, se incremente asimismo la tenacidad del PPB.

Tabla 2-3 Comparación de diferentes resultados de la prueba de tensión de materiales compuestos.

Tratamiento a la fibra/ % de carga en la matriz	Impacto kJ/m ²	Referencia
Sin tratamiento 15%	21.1	Este trabajo
AA 15%	12.5	
AA_EP 15%	16.5	
EP 15%	12.5	
10 %	16.1	[29] ¹
20 %	23.2	
30 %	30.9	
40 %	35.8	
5%	27.3	[120] ¹
10%	37.0	
15%	54.2	
20%	43.4	
Sin tratamiento	36.9	[112]
0.5% NaOH	13.9	
1% NaOH	6.1	
Silano	28.1	
Acetilación	23.9	

¹ sin tratamiento.

Los compuestos de fibras tratadas químicamente con NaOH y por acetilación, evaluadas por otro autor, mostraron igualmente disminución en la resistencia al impacto respecto a las fibras sin tratar. Esta disminución obtenida es aún mayor a la que se detectó en este trabajo con los tratamientos con AA, AA_EP y AA_EP. Es decir, los tratamientos evaluados en el presente trabajo aparentemente causan menos daño en la estructura de la fibra, conservando en mayor porcentaje la capacidad de absorción de energía del material antes de sufrir una fractura.

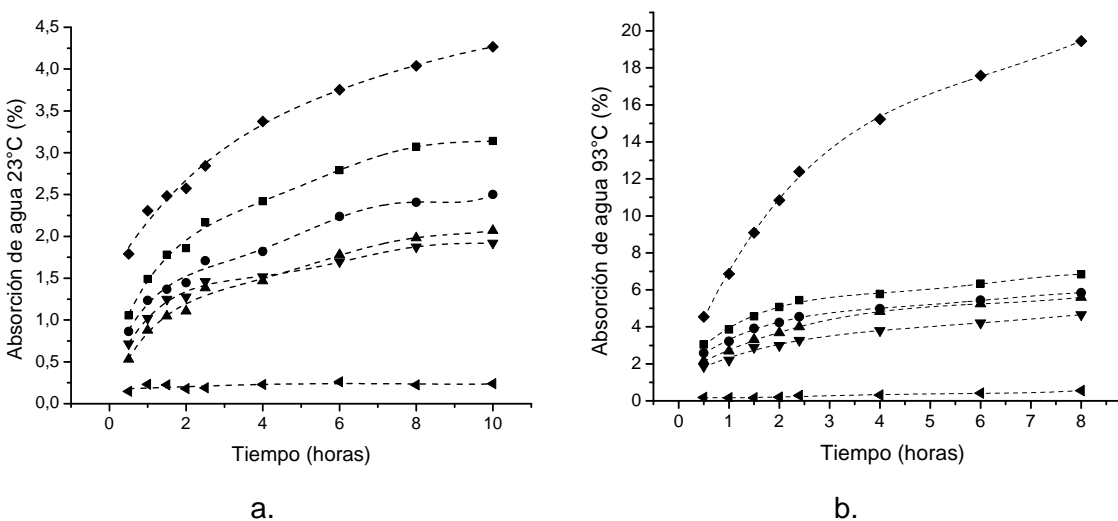
2.2.3 Absorción de agua

La reducción de absorción de agua de los materiales biocompuestos aumenta su resistencia a la degradación cuando son expuestos a condiciones ambientales como humedad, luz solar, cambios de temperatura o microorganismos. Esto previene efectos en la disminución de las propiedades mecánicas y estabilidad dimensional de los compuestos y por lo tanto amplía su campo de aplicación [121].

La cantidad de absorción de agua de los compuestos depende del contenido de fibra, la temperatura, la orientación de las fibras, la permeabilidad, área expuesta de la superficie, porosidad e hidrofobicidad de cada uno de los componentes, entre otros factores [116]. Para un mismo tipo de fibra esta característica puede variar de acuerdo a su longitud y entramado dentro de la matriz, siendo mayor la absorción de humedad para rellenos con fibras largas o con fibras tejidas, arreglos que facilitan la difusión del agua dentro del PPB [118].

Las Figuras 2-13 a. y b. muestran el porcentaje de ganancia de peso en función del tiempo, después de sumergir los diferentes compuestos (U, AA, AA_EP, EP, F y V) en agua a temperatura ambiente (23°C) durante 10 horas y después de 24 horas y con agua hirviendo (93°C) durante 8 horas. La cantidad de absorción de agua de los compuestos depende del contenido de fibra, la temperatura, la orientación de las fibras, la permeabilidad, área expuesta de la superficie, porosidad e hidrofobicidad de cada uno de los componentes, entre otros factores [116].

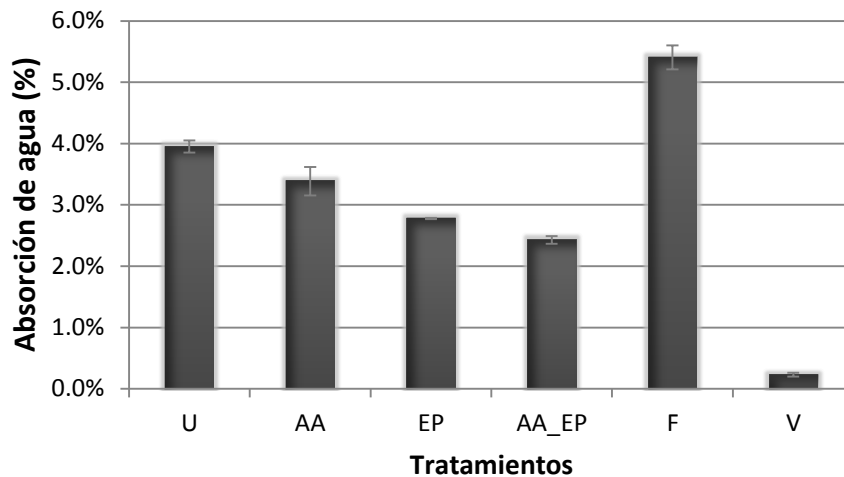
Figura 2-13 Porcentaje de absorción de agua de los diferentes tipos de compuestos. a. Agua a temperatura ambiente 23°C y b. Agua a en punto de ebullición 93°C. FSP Sin tratar (■), AA (●), EP (▲), AA_EP (▼), V (□) y F (◄).



El máximo porcentaje de peso ganado fue observado para compuestos de fibras de figue de FSP sin tratar en ambos periodos de observación. Los PPB hechos con fibra de vidrio, que es un material altamente hidrofóbico, son los que presentan la menor absorción de agua (menor al 0.5%). El uso de las FSP tratadas disminuyó el porcentaje de absorción de agua, lo que se interpreta efecto de su hidrofobicidad y, consecuentemente, como resultado de la buena adhesión inter-facial y transferencia de tensiones entre el poliéster y la fibra. Su mejora induce al aumento de resistencia a la humedad ó degradación del material.

La Figura 2-13 b. muestra la absorción de agua por parte de los compuestos en agua hirviendo, como era de esperarse, el tiempo de saturación disminuye, cuando la temperatura del agua aumenta, puede verse como el porcentaje de peso ganado en este caso, es mayor que a temperatura ambiente. Cada tipo de compuesto aumentó aproximadamente el doble, excepto para los de fibras de fique, que aumentaron casi cuatro veces. Ambos comportamientos se explican por el aumento de la difusividad de agua en el material por efecto del ascenso de temperatura, y porque además se produce un efecto sinérgico de incremento de fisuras como resultado de la degradación de la interface fibra-matriz [122]. Este fenómeno es también evidente en la Figura 2-14, pues después de 24 horas de contacto a temperatura ambiente absorbido es mucho menor que el mostrado a 93°C a las 8 horas.

Figura 2-14 Porcentaje de absorción de agua de los diferentes compuestos después de 24 h.



En cuanto a las FSP, el tipo de tratamiento químico aplicado influyó en la absorción de agua. El comportamiento de los compuestos con las fibras AA_EP y EP es similar y disminuyeron la absorción de agua en 38.5% y 29.7% respectivamente, después de 24h (ver Figura 2-14). Por lo tanto los PPB con FSP tratadas, al mejorar su unión covalente interfacial y ganar menor peso, un menor número de moléculas de agua entrar en la interfaz del compuesto, retrasando su vulnerabilidad a la degradación.

Las FSP naturales son hidrofílicas, se hinchan en contacto con el agua y por lo tanto producir micro-grietas en el compuesto [113]. Los resultados obtenidos muestran que las fibras efectivamente disminuyeron su hidrofiliidad (Capítulo 1) hecho que influye positivamente en las características de los PPB.

En la tabla 2-4 son comparados los valores del porcentaje de absorción de agua después de 24 horas, para los compuestos hechos en este trabajo y los resultados reportados en otras investigaciones para la fibra de plátano/banano en matriz de poliéster. Es interesante mostrar que el agua absorbida del poliéster (sin relleno) fue reportada oscilar entre 0.5 y 1.0 [123]. Al comparar los compuestos con fibra sin tratar y tratada, todos los

materiales con fibra modificada tienen mas baja absorción de agua. Como se menciona antes esto puede ser debido a la característica hidrofóbica alcanzada por las fibras. La reducción para los compuestos con fibras con AA-EP, EP y AA fue de 61.4%, 70.0%, mientras la reducción alcanzada por uso de fibras tratadas con AA, ácido acrílico e hidróxido de sodio estuvo entre 71.0 y 92.0%.

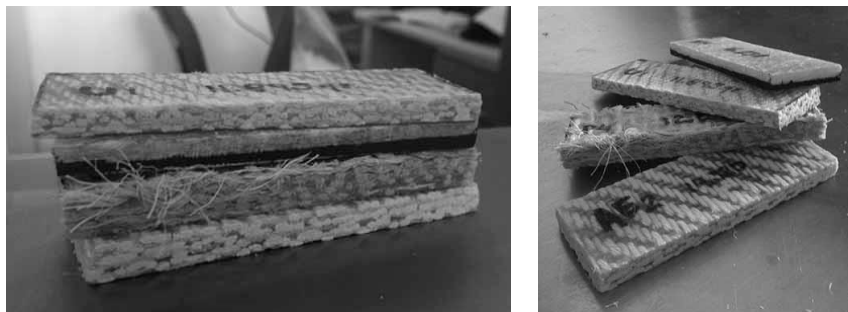
Se puede observar como la variación de carga de fibra en el compuesto tiene influencia significativa en esta característica. La absorción de agua aumentó, cuando el porcentaje fibra vario de 10 a 20%, independientemente de que estuviera tratada o no. Este evento puede confirmar la característica hidrofílica. inherente a las fibras naturales y su alta influencia en el material compuesto. Por lo tanto es importante disminuir su afinidad por el agua cuando se quiere aplicar en matrices hidrofóbicas.

Tabla 2-4 Porcentaje de absorción de agua, después de 24 h de inmersión a temperatura ambiente.

Fibra/matriz	Técnica	Condiciones de la fibra	Fibra (%)	Absorción de agua (%)	Ref.
Fibra tejida/poliéster	Moldeo manual	Sin tratar tejida	15	3.95	Este trabajo
		AA tejida		3.38	
		AA_EP tejida		2.43	
		EP tejida		2.78	
Fibra tejida/poliéster	Apilado por bolsa de vacío	Sin tratar	10	2.50	[120]
		Acido acrílico	10	2.00	
		Hidróxido de sodio	10	2.30	
		Sin tratar	20	4.25	
		Acido acrílico	20	3.20	
		Hidróxido de sodio	20	3.50	

En la Figura 2-15 se muestran dos fotografías de las probetas de compuestos luego de las pruebas de inmersión en agua.

Figura 2-15 Diferentes vistas de las probetas de materiales compuestos (FSP, F y V) después de realizada la prueba de absorción de agua.



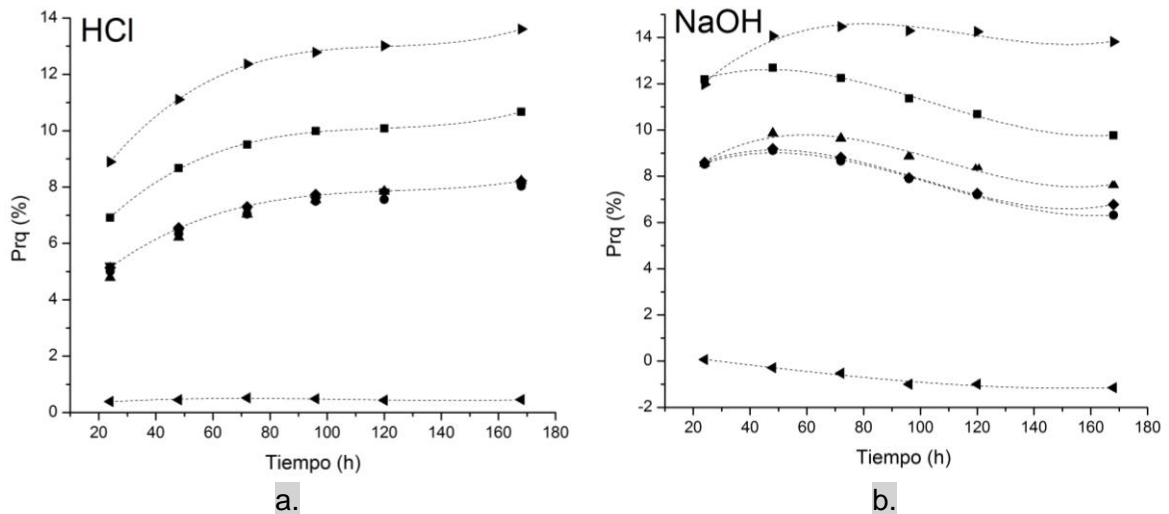
Los compuestos elaborados con fibras de fique han cambiado físicamente, se han hinchado, causando una evidente pérdida en la estabilidad dimensional del compuesto, efecto que se acentúa después de ser sumergidas en agua hirviendo. Esto puede ser debido a la alta hidrofiliidad de la fibra y su baja adhesión con la matriz. Este resultado no se observó en los compuestos de FSP tratadas debido a que como se ha mencionado, son mas hidrofóbicas, lo que aumenta su potencial para ser usadas en aplicaciones de tipo industrial, donde este tipo de propiedades sean requeridas.

2.2.4 Resistencia química

Los compuestos fabricados con fibras naturales como refuerzo son sensibles a diferentes condiciones ambientales, porque sus propiedades están influenciadas por el alto contenido de humedad de las fibras [16]. Para verificar si los compuestos hechos con fibras tratadas mejoraron su resistencia a condiciones ambientales se les hicieron pruebas de química alcalina y ácida.

En la Figura 2-16 a y b se muestra el porcentaje de peso ganado después de la inmersión de los compuestos en un ambiente ácido (HCl 1N, 20°C) y otro alcalino (NaOH 1N, 20°C) en función del tiempo (28h, 48h, 72h, 96h, 120h y 168h). El menor grado de hinchamiento o ganancia de peso se considera indicativo de la mayor resistencia química. Se observa que la resistencia química de los compuestos con fibras tratadas es mayor a ambientes ácidos que a alcalinos, pues en la segunda solución las muestras empezaron a perder peso después de las 72 horas, mientras que en ambiente ácido no perdieron peso.

Figura 2-16 Resistencia a ambientes a. Ácidos (HCl) y b. Alcalinos (NaOH), expresados en porcentaje de resistencia química (Eq. 1). FSP Sin tratar (■), AA (●), AA_EP (▲), EP (□), V (◄) y F (►).



Finalizado el tiempo de inmersión los compuestos reforzados con FSP modificadas con AA, proporcionaron el mayor aumento de resistencia química a ambos ambientes respecto de los otros tratamientos y de las FSP sin tratar. Este comportamiento puede

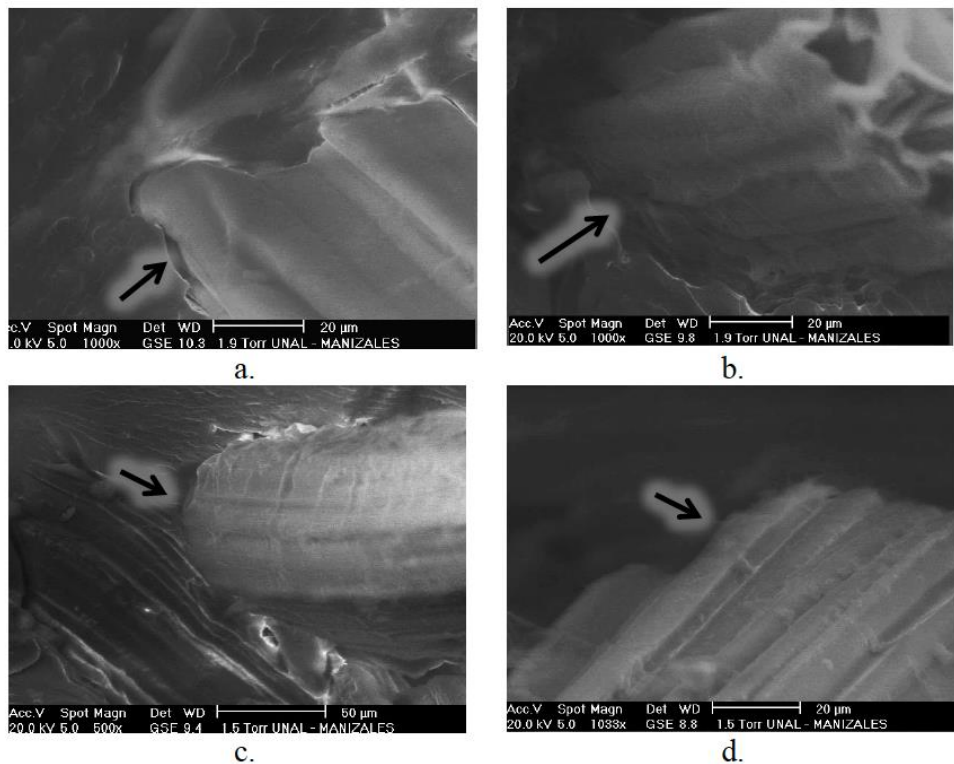
ser debido a la mejora de la interacción fibra-matriz por una mayor afinidad de la fibra tratada con la matriz de poliéster de carácter hidrofóbico.

Al comparar el comportamiento entre los compuestos reforzados con las FSP respecto de los reforzados con fibras de fique y vidrio, los compuestos reforzados con fibras de fique son de mínima resistencia mientras que los hechos con fibra de vidrio son superiores a los elaborados con todas las demás fibras naturales, como era lo esperado.

2.2.5 Microscopia ESEM

Las micrografías ESEM de la superficie fracturada de los compuestos después de realizada la prueba de tensión pueden ser vistas en la Figura 2-17.

Figura 2-17 Micrografías ESEM de los diferentes materiales compuestos a. U, b. AA, c. AA_EP y d. EP.

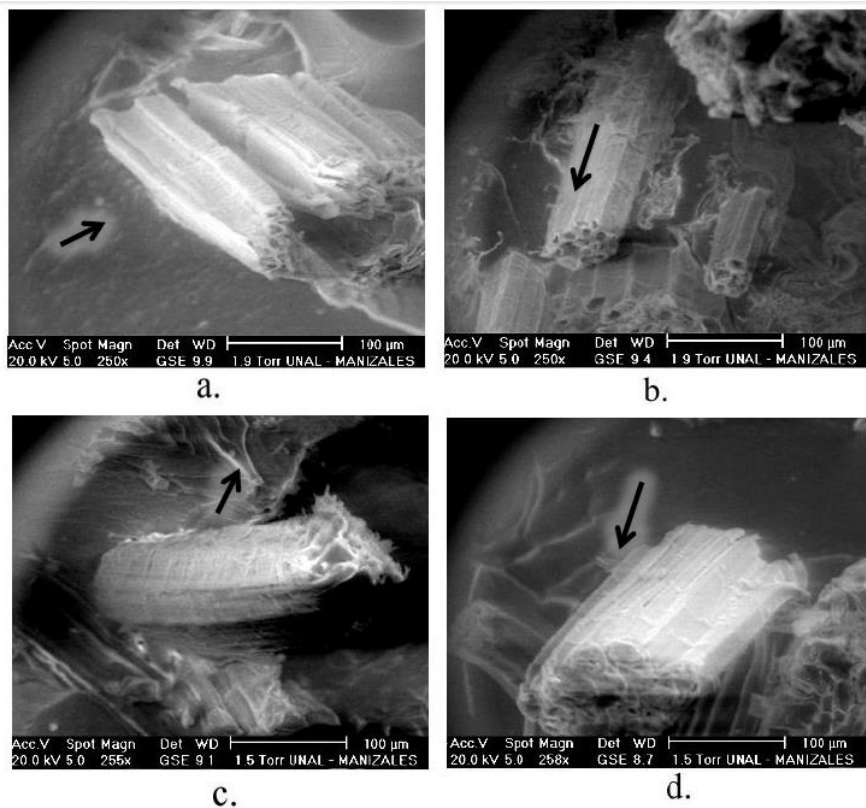


En general se puede observar que, como efecto de las pruebas de tensión las fibras del compuesto pueden desplazarse de su posición original, en menor o mayor medida, según su grado de adhesión con la matriz polimérica. La Figura 2-17 a. muestra la ruptura de los compuestos con FSP sin tratamiento, en las cuales puede verse una ranura entre esta y la matriz, consecuente de una baja adhesión entre la resina y la FSP. Esto puede explicar también los bajos resultados detectados para los compuestos de estas fibras al realizar las pruebas de tensión. Las Figura 2-17 b-d muestran la morfología de los compuestos con FSP tratadas. Claramente se ve la diferencia respecto

de los compuestos con FSP sin tratar, pues se muestra una mejor adhesión entre la resina y la fibra, lo que condujo también al aumento en las propiedades mecánicas. La aplicación de los tratamientos influye en el comportamiento de los compuesto, tal como se notó en otros estudios con fibra de yute en resina poliéster [124].

En la Figura 2-18 a, se observa el PPB con FSP no tratadas, en la cual, la matriz se mantuvo suave después de la prueba de tensión, esto puede atribuirse al fácil deslizamiento interfacial causado por la baja adherencia entre la fibra sin tratar y la matriz de poliéster. En contraste, las micrografías de PPB de FSP tratadas, que mostraron fallas de fisuras y grietas en la matriz, después de la prueba de tensión, esto indica interfaces molecularmente fuertes, fibra-matriz y, en consecuencia, una mejor adhesión entre la resina y la fibra, que a su vez explica también los mejores resultados obtenidos en la prueba mecánica de estos especímenes.

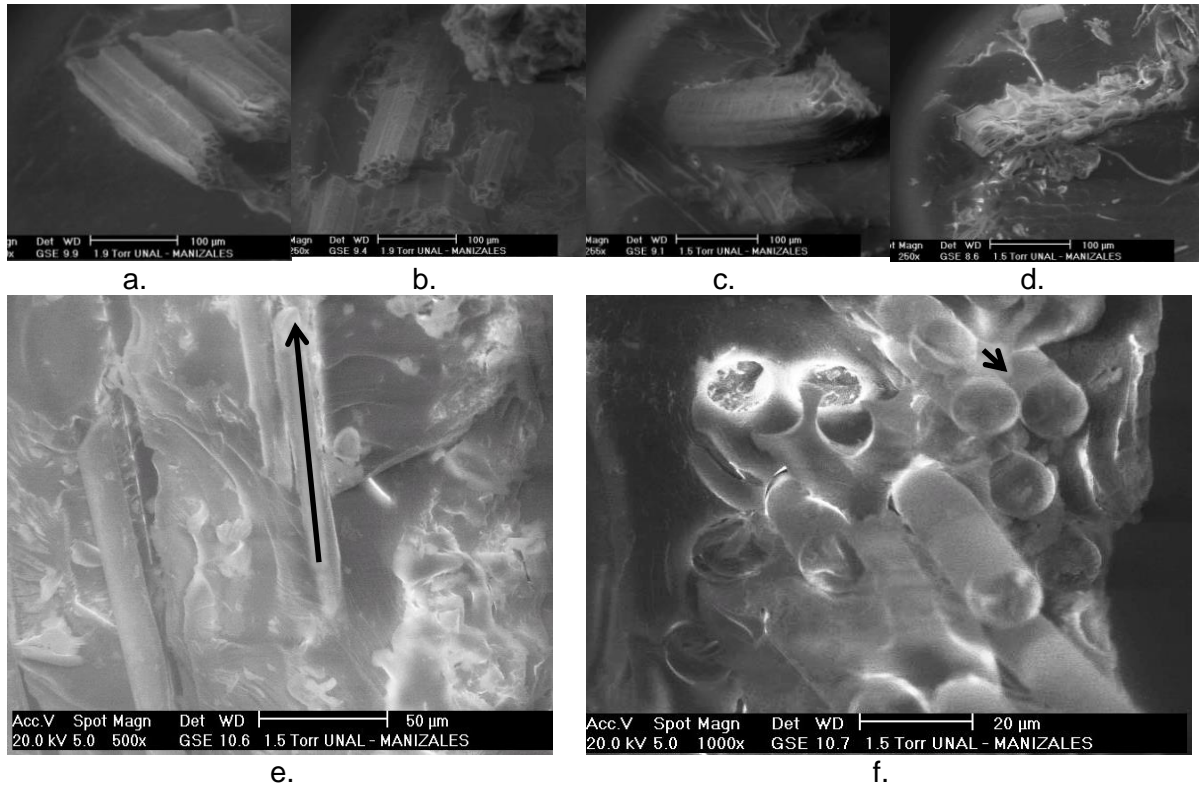
Figura 2-18 Micrografías ESEM de los diferentes materiales compuestos a. U, b. AA, c. AA_EP y d. EP.



La comparación de las micrografías de los compuestos de las FSP tratadas y sin tratar con los fabricados de fique y vidrio puede verse en la Figura 2-19. Las diferencias identificadas entre los tipos de fibras se relaciona con la adhesión a la matriz. La fibra de fique muestra un mayor desplazamiento de las fibras, después de realizada la prueba de tensión, por lo tanto existe una baja adhesión con la matriz, seguida de las FSP y finalmente los compuestos de fibra de vidrio. En estos últimos se evidencia un bajo

deslizamiento de las fibras en la matriz, lo cual puede correlacionarse con el alto valor alcanzado en la prueba de tensión al igual que la baja absorción de agua.

Figura 2-19 Comparación de los compuestos de FSP tratadas y sin tratar con las fibras de fique y vidrio a. FSP sin tratar, b. AA, c. AA_EP, d. EP, e. F y f. V.



2.3 Conclusiones

Se fabricaron y caracterizaron prototipos de material biocompuesto (PPB) con refuerzo de fibras naturales mediante dos técnicas, cada una con características y objetivos diferentes. Mediante la técnica de infusión se alcanzó una buena relación fibra: resina, hubo menos desperdicio de resina, las telas pudieron ser acomodadas debidamente con baja emisión de olores lo que se tradujo en un mejor ambiente de trabajo que facilitó la obtención de piezas de mayores dimensiones. El proceso de moldeo manual requirió de menor tiempo durante el procedimiento y el secado y menor cantidad de herramientas. Esta técnica fue utilizada para elaborar piezas de materiales compuestos con fibras de seudo tallo de plátano (FSP) tratadas, sin tratar, fique y vidrio. A las piezas obtenidas les fueron realizadas las pruebas de tensión, impacto, absorción de agua a dos temperaturas y micrografías para observar sus características morfológicas.

Los PPB con FSP modificadas mostraron reducción en la absorción de agua, respecto de los fabricados con FSP sin tratar, probablemente como consecuencia directa de la misma característica alcanzada por fibras tratadas. Por otro lado, la reducción de las propiedades mecánicas reportadas en el capítulo anterior para las FSP tratadas, no afectó las propiedades mecánicas del compuesto, pues, por el contrario, estas aumentaron.

Aunque la presencia de un mayor contenido de fibra en los PPB puede mejorar su comportamiento mecánico, aumentar simultáneamente todas sus propiedades no es siempre factible, tal como se mostró entre la resistencia a la tensión y la rigidez con PPB de fibras naturales.

Se compararon además los PPB elaborados bajo las mismas condiciones usando como rellenos FSP tratadas y sin tratar, fique y vidrio. Los PPB hechos con FSP sin tratar mostraron mejores propiedades que los hechos con las fibras de fique, material más utilizado y reconocido en el mercado nacional e internacional, lo que evidencia el potencial de las FSP. A pesar de esto se debe reconocer que los compuestos elaborados con fibra de vidrio tienen propiedades superiores.

Con los resultados encontrados se contribuye a aumentar la probabilidad de usar las FSP y PPB con propósitos estructurales, de empaques, en la industria automotriz, entre otras.

3. Capítulo 3

Estructura general de la cadena de abastecimiento inversa, para la utilización de la fibra del pseudotallo de plátano/banana en el municipio de Manizales: ubicación de centros de acopio

Caracterización de la cadena de valor del cultivo de plátano y banano en el municipio de Manizales

En un trabajo realizado anteriormente sobre el cultivo de plátano y banano en el municipio de Manizales, se evidenció que la mayoría de las fincas, son pequeñas parcelas (el 68.2% de estas fincas no exceden las 8.31 hectáreas), no son tecnificadas y están asociadas a otros cultivos. Estos factores estaban asociados a una baja productividad en la cosecha, falta de capacidad económica de los agricultores y dependencia económica de la comercialización del producto, pues el 68.1% de ellos lo tenía como producto principal y con un precio de venta medio de \$27.500/racimo. Los encuestados señalaron que el mercado de Manizales es el centro de distribución en el que se realiza la principal comercialización del plátano (60%), seguido de los canales corredores (14%), ciudades como Medellín y Cali (13%), entre otros. Las vías utilizadas para el transporte estaban en buen estado de acuerdo con el 82% de los agricultores encuestados².

En cuanto a los residuos del cultivo como: el pseudotallo, hojas, tallos, raíces y yemas florales, se utilizan principalmente para la fertilización orgánica y alimento para animales. Una pequeña fracción de estos materiales están dispuestos y otros, como la raíz se quedan en la superficie cultivada. Ninguno de los agricultores encuestados ha vendido (ni planea) cualquiera de estos materiales.

² Evaluación, análisis y formulación de alternativas para la cadena de valor del plátano en Manizales destinadas a la producción de envases de fibra de plátano. Encuesta realizada por el semillero de investigación en bioremediación DIMA 2011.

3.1 Identificación de la cadena de abastecimiento para la producción y transporte de la fibra de plátano y banano

La cadena de abastecimiento directa del plátano y banano, incluye las operaciones de adquisición de racimos, transformación intermedia y distribución, hasta llegar al consumidor final (ver Figura 3-1 a). Por otro lado la logística inversa se refiere al manejo eficiente del flujo de productos para reprocesar, reusar, reciclar o desechar, usando los recursos eficientemente, es decir el aprovechamiento de los residuos pos cosecha, como potencial para producir productos de mayor nivel agregado (ver Figura 3-1 b). Estos procesos genera beneficios sociales y ambientales, debido a la creación de recursos económicos alternativos para los agricultores y por el uso de residuos como potencial de materias primas naturales y renovables [13].

A continuación se describirá la producción y distribución de los frutos del plátano/banano en el municipio de Manizales. También se muestran algunas maneras de aprovechamiento de los residuos después de la cosecha. El enfoque para la descripción de la logística inversa en el presente trabajo, es el aprovechamiento del pseudotallo como recurso para la extracción de fibra natural. Para esto fue sugerida la localización de cuatro centros de acopio, para la producción estimada de fibra. Finalmente se muestra una aproximación de los ingresos alternativos de los agricultores, con el aprovechamiento de tales fibras, en la zona rural de Manizales.

3.1.1 Cadena de abastecimiento directa para la producción de plátano/banano

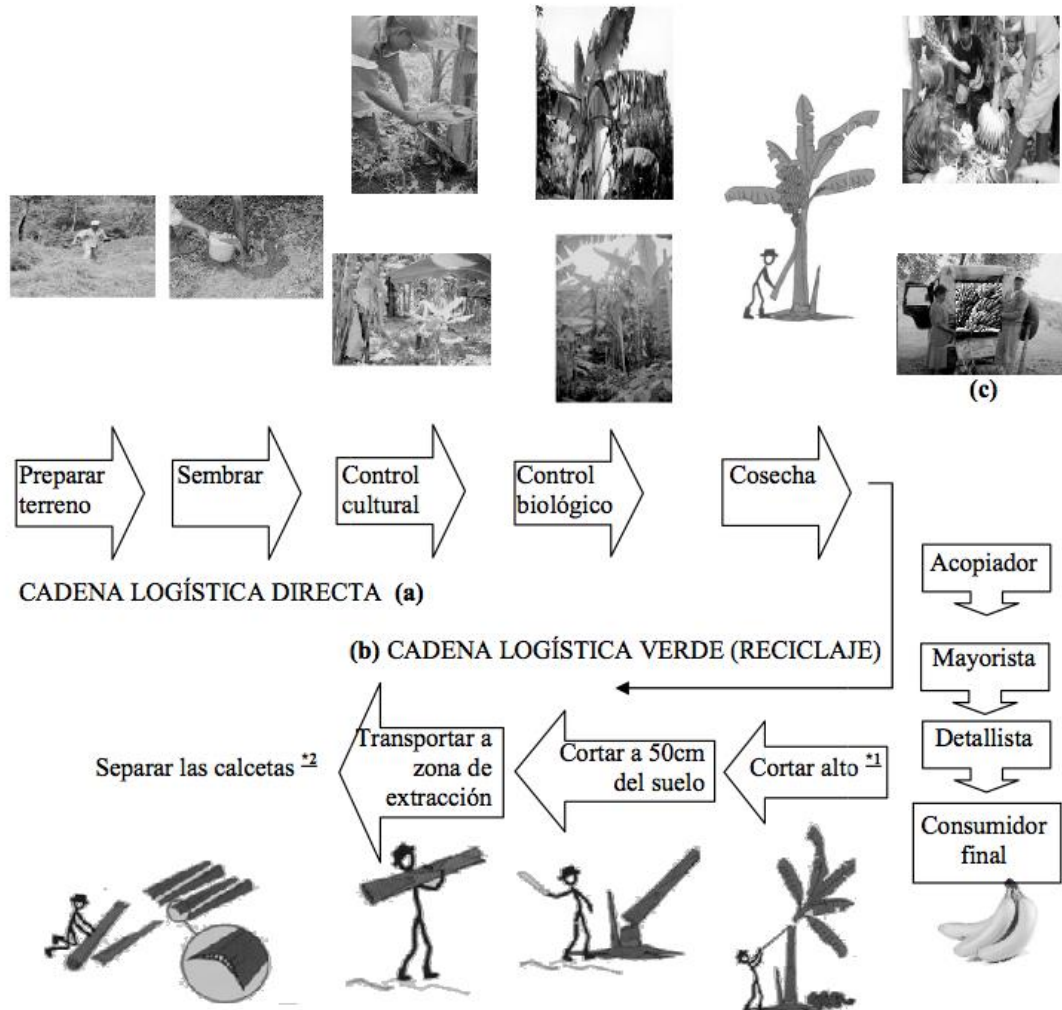
Hay cuatro operaciones principales para la producción y distribución del plátano/banano: siembra y cosecha por parte de los productores primarios, abastecimiento del mercado local (de manera directa, de los productores al consumidor o indirecta, de los productores a los comerciantes o intermediarios), exportación y procesos de valor agregado. El ciclo de producción del plátano/banano en la región de Manizales esta entre 10-12 meses, incluidas las operaciones de preparación del terreno, siembra, cultivo, mantenimiento, control de plagas y enfermedades y cosecha [125].

En el mercado los agricultores venden el producto a un intermediario en la misma finca o en la plaza de mercado. El precio inicial depende de la calidad del producto, con un costo/unidad de la siguiente manera: si es de buena calidad y empacado para mercados como Bogotá y Medellín es comprado a un precio de \$ 700/u, si el plátano es de calidad media, es vendido en la plaza de mercado a un mayorista entre \$ 450 y \$ 700/u, sin empacar (datos correspondientes agosto de 2013, datos de campo). Si la calidad es muy baja, los agricultores prefieren dejarlo para consumo su propio o para los animales. Los mayoristas distribuyen el producto a tiendas minoristas y después al consumidor final Figura 3-1c. Algunos frutos son procesados en la industria para la producción de plátano/banano congelado o deshidratado, snacks, concentrados o harina para animales [126].

3.1.2 Cadena de abastecimiento inversa para la fibra de plátano y banano

Existen diferentes alternativas para el aprovechamiento de los recursos de una explotación agrícola, a saber: la reparación/renovación, el reciclaje/reprocesamiento, canibalización y la reutilización directa. De acuerdo a las definiciones de cada una, el aprovechamiento de los residuos del plátano/banano, constituye en el reciclaje del material para ser utilizados como materia prima en posteriores productos. Después de la cosecha las actividades que agregan valor son el desmontaje, la clasificación y el procesamiento de materias primas. Para tal caso, las actividades de la logística inversa del plátano y el banano pueden discriminarse así [13]:

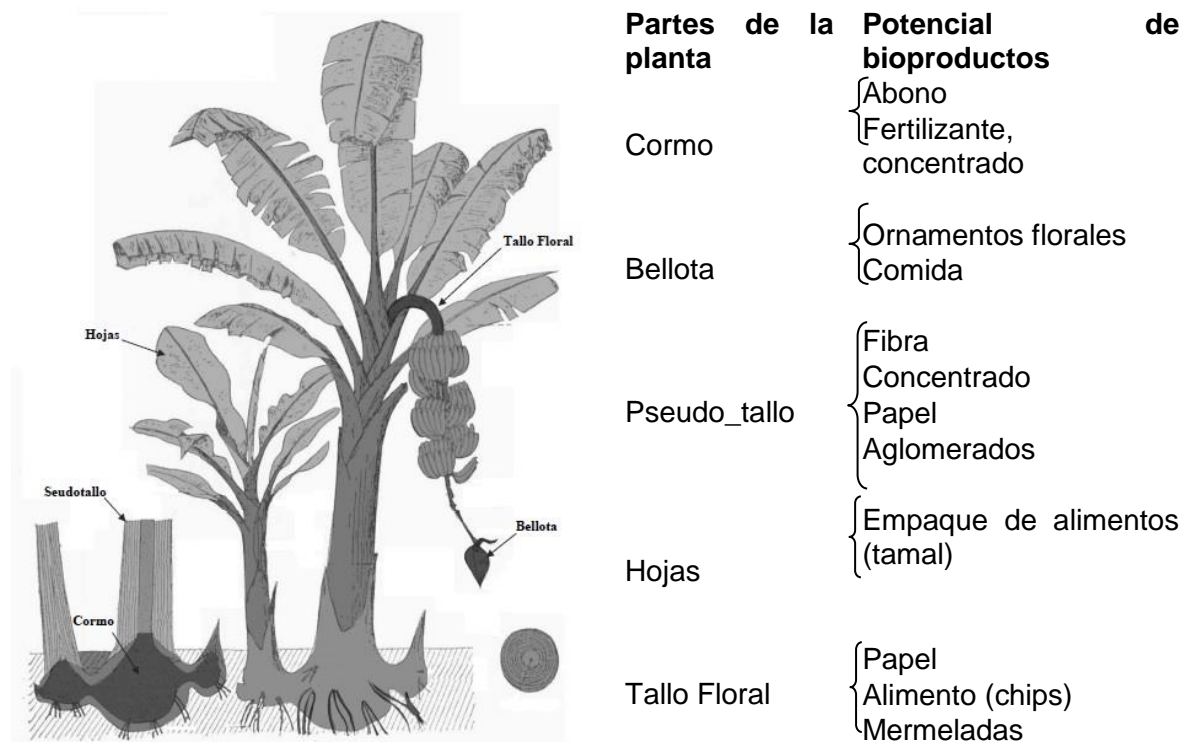
Figura 3-1 a. Cadena logística directa de la producción y distribución del cultivo de plátano/banano, b. Logística inversa para la producción de fibra del pseudotallo de plátano/banano c. comercialización del plátano/banano.



1. Separación de la planta en sus diferentes partes.
2. Clasificación y agrupación de los residuos para su respectivo transporte.
3. Transporte a operaciones intermedias
4. Tratamientos intermedios: Actividades de preparación de materiales para su reprocesamiento. En el caso de la planta de plátano/banano, se refiere a la operación de extracción de la fibra del pseudotallo.
5. Reprocesamiento: Artesanías, manufactura en fábrica, compuestos y otros productos de mayor valor agregado, tales como los tratamientos o modificaciones superficiales de las fibras.

La biomasa producida en un cultivo de plátano genera aproximadamente el 75% de residuos. Generalmente, este material es dejado en zona de cultivo. La cadena logística inversa inicia en el momento de la cosecha con el uso potencial de esta biomasa. La planta es separada en hojas, tallo, pseudotallo, cormo y capullos. En la Figura 3-2 se muestra esquemáticamente los residuos pos cosecha de la planta y el potencial uso en subproductos, como el pseudotallo para la extracción de fibra [127, 128].

Figura 3-2 Morfología de la planta de plátano/banano. Adaptado de Champion, 1978. Uso integral de la planta.



El objetivo de la cadena logística inversa es el uso de recursos naturales renovables con bajo consumo de energía y la reducción de la huella de carbono. La producción de las fibras naturales vegetales depende principalmente de la luz solar a la que se exponen las plantas y, para su extracción se demanda muy baja cantidad de energía no renovable. Al

compararla con la producción de la fibra de vidrio, esta última requiere entre 5-10 más consumo de energía no renovable [129].

Figura 3-3 Diagrama analítico para la extracción de la fibra por método mecánico.

Diagrama de flujo del proceso para la extracción de la fibra de plátano/banano.

Proceso: extracción de la fibra por método mecánico					
Material:	Actividad	Actual	Tiempo: 1: 30 Seg. 2: 601.5min		
Fecha:	Operación ○	14	Costo:		
Operador:	Transporte ⇨	2			
Comentario: tiempo/calceta	Espera D	1			
	Inspección □				
	Almacenaje ∇				
Descripción de la actividad	Símbolo	Tiempo (Sec.)	Observación:		
	○ ⇨ D □ ∇				
1. Recoger	●	1			Calcetas del pseudotallo
2. Introducción	●	2			En la maquina desfibradora
3. Sostener	●	7			Las calcetas del pseudotallo
4. Extraer	●	7			Las calcetas del pseudotallo deben ser rotadas para continuar con el proceso.
5. Rotar	●	3			Hacia el otro lado
6. Introducir	●	3			Para finalizar completamente
7. Sostener	●	3			Las calcetas del pseudotallo
8. Extraer	●	3			Las calcetas del pseudotallo de la máquina
9. Colgar	●	1			Continuar con otra calceta
10. Recoger	●				Fibras y residuos
11. Transporte	●	1(min)			Al área de remojo
12. Remojar	●	600(min)			Dejar en remojo durante la noche, para eliminar residuos
13. Transportar	●	2 (min)			Al lugar de secado
14. Colgar	●	1(min)			En una cuerda al aire libre
15. Esperar	●	18(hr)			Alrededor de un día, hasta que se seque
16. Peinar	●	15 (min)			Peinar después de secado
17. Recoger	●	1 (min)			Residuos

[7] Se estima una producción de 30kg/h

Para la extracción de la fibra, el pseudotallo es cortado a 5 cm de altura del nivel del suelo y después es transportado a un área para ser separado en calcetas (ver Figura 3-1b). La fibra puede ser extraída por métodos manuales, mecánicos o químicos. Cuando se usa el procedimiento de extracción manual, la tasa de producción es de 1kg/h (o 1 hora 40 por planta). Este procedimiento puede ser considerado para la producción de

pequeñas cantidades [7]. En general el proceso tiene 4 operaciones principales: extracción de la fibra, lavado (24 horas), secado al aire libre y peinado (ver tabla 3-1).

En el diagrama analítico se describe la extracción mecánica de la fibra por alimentación manual. Se estima una tasa de producción de 30kg/h y requiere de 11 operaciones. El costo de la maquina desfibadora es de alrededor de \$ 7'500.000 , esto representa un alto costo para los pequeños productores del cultivo. Por lo tanto se recomienda la ubicación de estas máquinas en centros de acopio ubicados estratégicamente en cada uno de los corregimientos productores. Así pues los agricultores pueden transportar el pseudotallo o las calcetas al centro de acopio correspondiente, para la posterior extracción de la fibra. Alternativamente es posible usar otra máquina de mayor capacidad de producción, llamada decortificador. Esta opción es reportada con un costo de operación de US\$ 0.89/kg de fibra extraída [130].

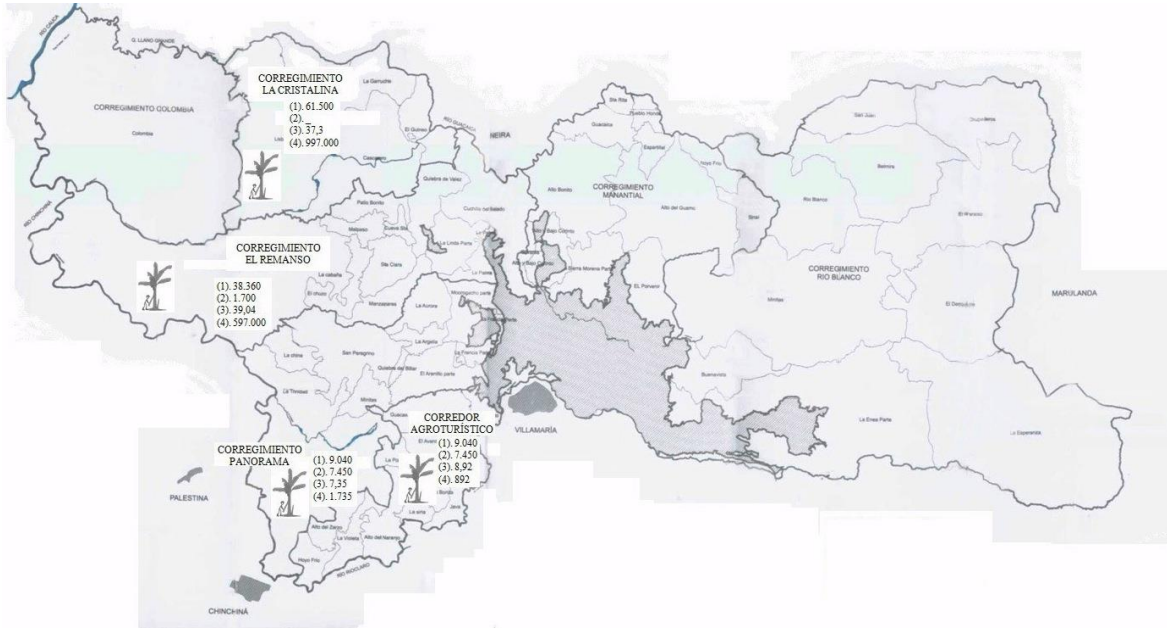
3.2 Propuesta para la ubicación de los centros de acopio: Municipio de Manizales

La decisión para ubicar centros de acopio, hace parte de la producción de un nuevo producto en la región, como lo es la fibra de plátano. De acuerdo a las características inherentes de la material prima, en la cual, el mayor porcentaje del pseudotallo contiene agua, causa que largos períodos de almacenamiento y transporte empiece a causar daño a la estructura celular. Además algunas de estas carreteras no cuentan con los requerimientos básicos para un fácil transporte, por lo que los tiempos tienen a variar muy fácilmente. Por tal motivo también se ratifica la ubicación de los centros de acopio cerca de cada finca por ende en cada corregimiento. Esta decisión corresponde a la localización de múltiples instalaciones, orientada al proceso de desfibración y secado de la fibra a partir de este momento, puede ser almacenada y transportada por periodos de tiempo mas largos mas fácilmente.

3.2.1 Potencial de Fibra de Plátano y Banano en el Municipio de Manizales

En el municipio de Manizales (capital del departamento de Caldas) la producción de banano y plátano se encuentra en 4 corregimientos: La cristalina, El remanso, Panorama y Corredor agro turístico. La Figura 3-4 muestra la localización del cultivo de plátano y banano en el mapa de Manizales, con el número de plantas y hectáreas sembradas y su producción anual (datos suministrados por el área de desarrollo rural de la alcaldía de Manizales en el 2009).

Figura 3-4 Localización geográfica de los cultivos de plátano y banano en el municipio de Manizales (1) Plantas de plátano sembrada (2) Plantas de banano sembradas (3) Hectáreas (4) Producción de kg/año.



La Tabla 3-1 muestra el potencial estimado de producción de fibra por corregimiento y en el municipio. El área rural del municipio de Manizales tiene un potencial de 209 toneladas/año. En contraste con la producción anual de 204 toneladas de fique en el departamento de Caldas [131].

Tabla 3-1 Estimación de la producción de fibra en los corregimientos y municipio de Manizales.

CORREGIMIENTO	PLANTAS SEMBRADAS		HECTÁREAS	PRODUCCIÓN Kg/año	POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE FIBRA Kg
	PLÁTANO	BANANO			
La Cristalina	61 500		37.3	997 000	103 781
El Remanso	38 360	1 700	38.14	597 000	67 601
Panorama	9 040	7 450	17.35	1 735	27 836
Corredor Agroturístico	1 480	4 510	8.92	1 209	10 108
TOTAL					209 326

La cantidad de fibra seca por planta es aproximadamente 1.69 Kg

3.2.2 Evaluación de los ingresos adicionales de los agricultores

En esta sección se estima el ingreso adicional asociado con la potencial extracción y comercialización de la fibra de plátano y banano en el municipio de Manizales. El precio de venta calculado, fue analizado en dos escenarios diferentes: la primera opción considera la comercialización de la fibra manufacturada artesanalmente y la segunda con un precio similar al comercializado actualmente en la industria textil (Colombia).

Actualmente, los artesanos de Caicedonia (Valle) ofrecen la fibra de plátano a un precio de \$ 15.000/Kg, mientras el fique es comercializado a nivel industrial a un precio entre \$ 1.500/Kg (alta calidad) y \$ 1.250/Kg (calidad media)(datos año 2013).

Para estimar el precio de la producción de plátano y banano en Manizales, se tiene en cuenta, el precio del fruto entre \$ 450 y \$ 700 por unidad, dependiendo de su calidad (datos reportados en la plaza de mercado de la ciudad de Manizales). Un racimo de plátano tiene entre 40 y 60 unidades. Por lo tanto estimado una media de 50 unidades por \$ 575 es igual a \$28.750/racimo. Todos los precios mencionados corresponden a información consignada en Marzo de 2013. Para mostrar la estabilidad del precio, en el mercado de corabastos (Bogotá) el precio del fruto disminuyó 3.69% en 2012 [132].

La información incluida en la tabla 3-2, estima como el valor del fruto y la fibra son similares cuando se considera el precio de venta de la fibra en el escenario 1 (valorada aproximadamente en \$2.5 millones). Si la fibra va a ser comercializada con las industrias de fibra exclusivamente, el precio estimado comercializado estaría entre 7.28% y 8.77% del valor comercializado del plátano.

Tabla 3-2 Enfoque de venta de la fibra y del fruto.

CORREGIMIENTO	Valor comercial del fruto*		Valor comercial de la fibra*			
	Plantas de plátano cosechada	\$ (millones de pesos)	Kg de fibra	Escenario 1 \$(millones de pesos)	Escenario 2 \$(millones de pesos)	
La Cristalina	61 500	1591.31*	103 781	1401.05*	116.75*	140.10*
El Remanso	38 360	992.56*	64 733	873.90*	72.83*	87.39*
Panorama	9 040	233.91*	15 255	205.95*	17.16*	20.60*
Corredor Agroturístico	1 480	38.30*	2 498	33.74*	2.81*	3.37*
TOTAL	110 380	2 854*	186 266	2514.64*	209.55*	251.46*

* Pérdida pos cosecha del 10% incluida.

Escenario 1: Precio de venta de la fibra: \$ 15.000/Kg. Escenario 2: Precio de venta de la fibra: \$ 1.250/Kg (calidad media) y \$ 1.500/Kg (calidad alta)

Tabla 3-3 Ejemplo de los ingresos para una pequeña finca típica con 50 plantas de banano plátano.

Ingreso del fruto		Ingreso de la fibra	
Racimos	50	Fibra	84.38 Kg
Valor	\$ 1293750*	Valor de la fibra (por artesanos)	\$ 1139130*
Valor de fibra (para industria):			
		Alta calidad	\$ 113913*
		Calidad regular	\$ 94927*

*Valores estimados con una pérdida del 10%

Como se describió anteriormente, la mayoría de los pequeños agricultores dependen en gran parte de la venta del fruto. Considerando una superficie media cultivada de 0.05 hectáreas, 50 plantas/Ha, la tabla 3-3 muestra el ingreso anual estimado por agricultor, considerando una pérdida del 10% después de la cosecha. En el escenario 1 la fibra

alcanza un precio comparable con el precio de venta del fruto. Esta es una situación ideal porque solo una pequeña parte producida puede ser vendida a este precio. Sin embargo, si la fibra puede ser vendida en un mercado similar al del fique, los agricultores pueden aumentar sus ingresos entre 7 y 9 % sobre sus ingresos actuales.

3.2.3 Propuesta para la ubicación de los centros de acopio

En cada corregimiento, y basado en la producción por vereda, fueron estimados centros de almacenamiento, de acuerdo con el metodología de centros de gravedad con 5 iteraciones. Las coordenadas de los resultados fueron ajustadas considerando la proximidad a una carretera. En la tabla 3-4 es mostrada los detalles de la 5ª iteración.

Tabla 3-4 Cálculo de la quinta iteración para la ubicación de los centros de almacenamiento por el método de los centros de gravedad.

LA CRISTALINA					EL REMANSO				
Vereda		Locación		Cantidad de producción (Kg)	Vereda		Locación		Cantidad de producción (Kg)
		x	y				x	y	
El Guineo	1	7.2	3.1	2278	La Cabaña	1	3.9	4.5	18225
Lisboa	2	2.5	4.5	30375		2	6.1	4.8	3796
La Arabia	3	3.8	5.7	60750		3	8.3	4.4	1518
					El Chuzo	4	10.3	5.6	16341
					Santa Clara	5	12.0	4.2	2733
					Quiebra de Vélez	6	13.0	2.4	18225
X* Y*		8.35	12.29		X* Y*		9.91	4.86	
PANORAMA					CORREDOR AGROTURÍSTICO				
		Locación		Cantidad de producción (Kg)			Locación		Cantidad de producción (Kg)
		x	y				x	y	
El Rosario	1	2.0	6.9	4556	El Aventino	1	4.81	2.7	6364
La Aurora	2	6.3	1.4	14246	Bajo Tablazo	2	5.51	3.3	2202
Los Días	3	4.1	2.7	5756					
X* Y*		5.9	1.7		X* Y*		4.81	2.7	

Coordenadas en Km.

Los centros de almacenamiento de las fibras son requeridos para la extracción de la fibra en altos volúmenes, con el uso de una máquina desfibradora. Además estas máquinas están en la capacidad de procesar el potencial de calcetas de cada corregimiento, pues no es recomendada hasta el momento, tal inversión para cada uno de los agricultores. Los centros de acopio ubicados en puntos estratégicos ayudan también al rápido transporte del material, evitando el daño del pseudotallo o de las calcetas por microorganismos, debido al su alto porcentaje de humedad. Los centros de acopio tendrán la máquina desfibradora y posiblemente máquinas de hilado para aumentar el valor agregado de la fibra.

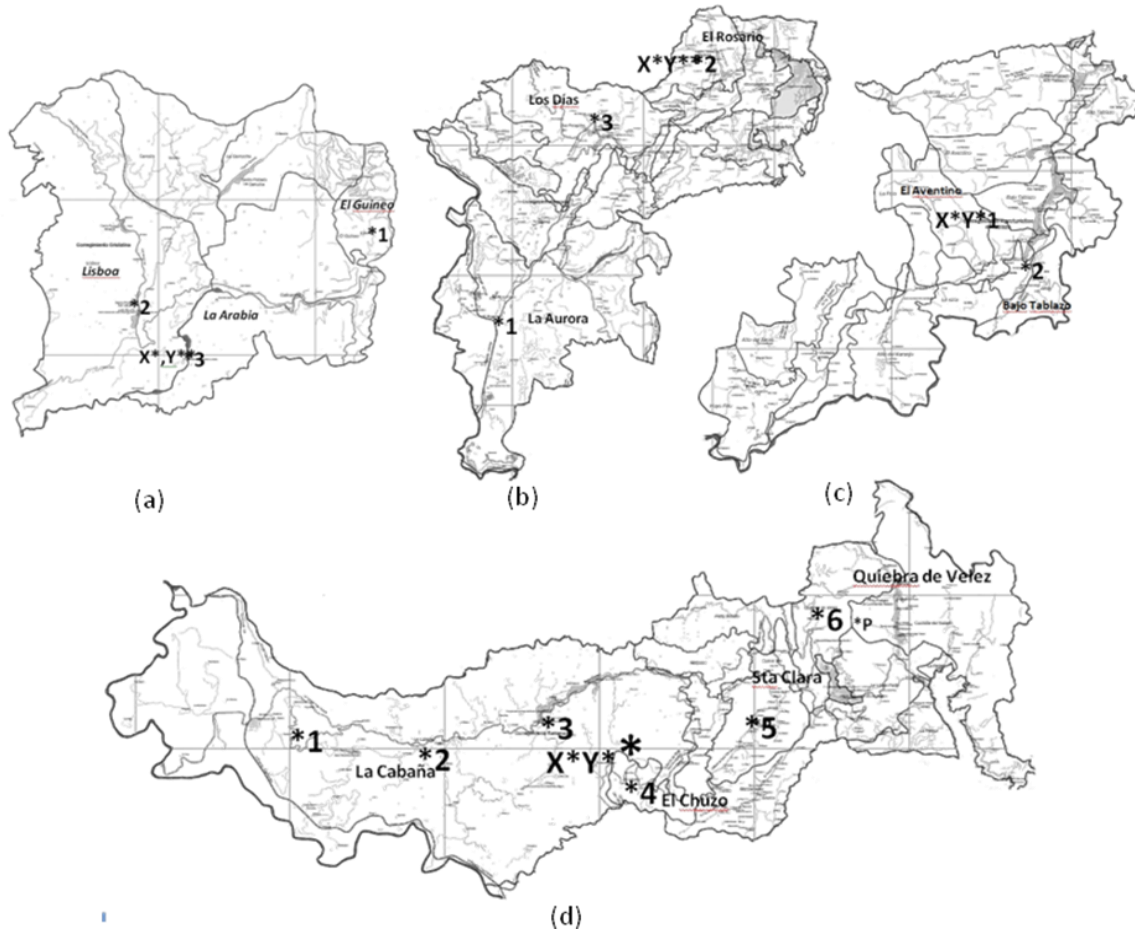
De acuerdo a los resultados, los centros de acopio obtenidos son:

Corregimiento *La Cristalina*: Se localizó el punto en la vereda de mayor producción: *La Arabia* (65.04% de la producción del corregimiento). Las veredas de *Lisboa* y *El Guineo* están conectadas por la carretera municipal. La distancia lineal sugerida al centro de acopio es de 1.78 km y 4.77 km respectivamente (ver Figura 3-5a).

Corregimiento *Panorama*: La locación del centro de acopio fue en la vereda de más alta producción: *La Aurora* (58% de la producción del corregimiento). Las veredas *El Rosario*

y *Los Días*, esta conectadas por carreteras municipales. La distancia lineal al centro de acopio es de 7.84 km y 2.89 km respectivamente (ver Figura 3-5b).

Figura 3-5 Localización de los centros de acopio por corregimiento: a. La Cristalina, b. Panorama, c. Agroturístico y d. El remanso.



Corregimiento Agroindustrial: La ubicación del centro de acopio fue en la vereda de más alta producción: El Aventino (74% del total de producción del corregimiento). La vereda el *Bajo Tablazo* está conectada a una distancia lineal de 920 m (ver Figura 3-5c).

Corregimiento El Remanso: La localización del centro de acopio, se encuentra cerca de la vereda de más alta producción: *El Chuzo*. Las veredas de *La Cabaña* 1, 2 y 3, *Quebra de Vélez* y *Santa Clara* están conectadas por una carretera municipal. La distancia lineal sugerida para los centros de acopio son 6.61 km, 4.12 km, 1.81 km, 2.43 km y 4.37 km respectivamente (ver Figura 3-5d).

3.3 Conclusiones

Como respuesta a la creciente necesidad de generar alternativas ambientales en la gestión de la cadena de suministro, en este capítulo se describió el contexto económico regional del potencial de producción y distribución de la fibra del pseudotallo de plátano y banano. Como complemento de las etapas de la cadena logística directa para estas frutas, se proyectó un plan de recuperación ecológico para el acopio del pseudo-tallo, en la zona rural del municipio de Manizales. Se utilizó una encuesta aplicada a los productores de plátano y banano para estimar la disponibilidad de materia prima, y, de acuerdo con la metodología de centros de gravedad, se propuso la ubicación de centros de acopio para cada uno de los cuatro corregimientos. El potencial de extracción y comercialización de FSP permitirían el aumento de los ingresos del agricultor del 9% sobre sus ingresos actuales.

4. Conclusiones Generales

En este trabajo se fabricaron materiales compuestos con fibras de plátano tratadas químicamente con tres reactivos diferentes. Luego de valorar por distintos procedimientos físicos, químicos y de imagen las fibras tratadas estas presentaron una ganancia en hidrofobicidad y pérdida de algunos materiales superficiales como ceras, hemicelulosa y lignina, lo que redundó en una menor afinidad por el agua líquida o de la humedad ambiental, la reducción de su elasticidad y área transversal y, en general la modificación de sus propiedades mecánicas respecto de las fibras en su estado natural. Los materiales compuestos que se elaboraron con las fibras modificadas en una matriz de poliéster presentaron en general mejor comportamiento que los que se hicieron con fibras sin tratar, pero de calidad inferior a los compuestos de fibra de vidrio en la misma matriz polimérica.

En este documento se presenta inicialmente un marco teórico enfocado a los materiales y procedimientos desarrollados. Las fibras son descritas en general y se contextualizan hasta llegar a la fibra natural extraída del seudotallo de plátano. Se exponen las principales modificaciones superficiales y sus efectos en las fibras y materiales compuestos. De los materiales compuestos se describen algunas de las técnicas y de las matrices poliméricas. Tanto para las fibras como para los compuestos, se hace referencia a las principales caracterizaciones realizadas a este tipo de materiales con énfasis en los realizados. Por último se muestra un forma sistemática de realizar una planeación del abastecimiento como inicio de la logística del producto.

La pregunta de investigación fue desarrollada a través del cumplimiento de los tres objetivos específicos planteados. Las modificaciones químicas realizadas agregaron valor a la fibra del seudotallo de plátano, pues se logró disminuir su hidrofiliidad, aumentar su resistencia a diferentes ambientes químicos aunque se disminuyó su resistencia a la tensión. Con la reducción de la afinidad por el agua se pudo verificar la estabilidad de las propiedades de las fibras tratadas durante períodos de tiempo más largos que las que presentan las fibras sin tratar. Las fibras modificadas y sin modificar fueron utilizadas como refuerzo para la fabricación de prototipos de materiales biocompuestos, los cuales mostraron mejoras significativas después de ser caracterizados. La reducción hidrofílica de las fibras mejoro considerablemente la adhesión entre la fibra y la matriz, pues se incrementó su rigidez, se disminuyo la absorción al agua y se aumentó su resistencia química. Estas características obtenidas confieren mayor durabilidad, estabilidad dimensional y capacidad para soportar altas cargas lo cual extiende su viabilidad como materia prima de proyección industrial para ser aplicada en materiales para empaques y como refuerzo de matrices cementicias. Finalmente se identificaron los elementos de la cadena de abastecimiento verde, para la

obtención, transporte y acopiamiento de las fibras del seudotallo de plátano, desde el proveedor hasta centros de acopio. Desde este punto se puede continuar con su futura industrialización como el proceso de modificación química aplicado en municipio de Manizales. A continuación se discriminan los resultados obtenidos.

La importancia de las fibras naturales ha sido documentada desde hace mucho tiempo, debido principalmente a propiedades como: bajo costo, baja densidad, propiedades mecánicas específicas aceptables, baja emisión de gases en su producción y biodegradabilidad. Actualmente estas pueden ayudar a encontrar soluciones nuevas y sustentables como reforzamiento de fibras en materiales compuestos, pero limitaciones como su heterogeneidad e hidrofiliidad no permiten su uso reemplazando totalmente las fibras sintéticas que actualmente dominan el mercado mundial.

En el presente las fibras naturales más importantes mundialmente son el algodón y el yute mientras que las de fique son las más reconocida en Colombia. Sin embargo hay un inexplorado recurso de estos materiales en el país: las fibras del pseudotallo de plátano y de banano (FSP). En este trabajo las FSP fueron modificadas superficialmente por un método químico con anhídrido acético y epiclorhirina con el fin de disminuir las desventajas como la hidrofiliidad y aumentar su potencial aplicación.

Las fibras modificadas y sin modificar fueron caracterizadas por análisis raman, isothermas de adsorción de agua, hinchamiento en agua, resistencia química a ambientes alcalinos y ácidos, análisis termogravimétrico, ángulo de contacto, prueba de tensión y morfología SEM. Los resultados encontrados mostraron una reducción significativa de su afinidad por el agua y menos acentuada de sus propiedades mecánicas. A pesar de que respecto de las naturales en las FSP tratadas se disminuyó la resistencia a la tracción, la reducción de su hidrofiliidad les garantizó mayor estabilidad en el tiempo de esta propiedad y de otras características importantes como la resistencia química, la estabilidad dimensional y la pérdida de peso tal como lo demostraron las mediciones realizadas de resistencia química y absorción de agua, después de seis meses en las FSP modificadas. La hidrofobicidad obtenida, agrega valor a las FSP, pues les confiere mayor durabilidad y estabilidad lo que incrementa y favorece la variedad de sus posibles aplicaciones.

A partir de las fibras de plátano modificadas y sin modificar fueron preparadas mediante moldeo manual y caracterizadas piezas de materiales biocompuestos (PPB). La caracterización fue mediante prueba de tensión, prueba de impacto, absorción de agua, resistencia química y microscopia ESEM. Los resultados mostraron diferencias entre los tratamientos, causando mejora, deterioro ó estabilidad de las propiedades de los PPB.

Globalmente, el tratamiento que impartió mejores características de los PPB hechos con las FSP fue la modificación superficial con anhídrido acético y epiclorhidrina. El aumento de la rigidez de los materiales PPB/FSP y el incremento de la resistencia de las FSP modificadas a los ambientes alcalinos, incrementa su potencial para ser usados en aplicaciones que requieran estabilidad dimensional y capacidad de soportar altas cargas.

Adicionalmente, la resistencia a la absorción de agua de los PPB/FSP modificadas, tanto a temperatura ambiente como en su punto de ebullición, extiende su viabilidad para aplicaciones en empaques, donde la hidrofobicidad, bajo peso, buena tensión y biodegradabilidad son características importantes.

Al cambiar el material de relleno inorgánico o sintético de los materiales compuestos convencionales por fibras naturales para la obtención de un producto más amigable con el medio ambiente se reduce de manera importante su calidad estructural, resistencia mecánica y química. Sin embargo, al modificar químicamente las fibras se pueden hacer importantes mejoras admitiendo que, con esta estrategia, aumentar simultáneamente todas las características y hacerlo comparable a un compuesto convencional no es fácil.

Sin embargo las características específicas obtenidas de los prototipos de biocompuestos con fibras de plátano modificadas son comparables técnicamente, por ejemplo, con los compuestos fabricados de fibras de fique, fibras producidas a nivel industrial y posicionadas en el mercado nacional. Por otro lado, aunque la brecha sigue siendo alta con respecto de las propiedades mostradas por las fibras de vidrio, las FSP tiene ventajas como: bajo costo (con proyección de producción a gran escala), reducción de peso del material, por su baja densidad (aplicaciones en la industria automotriz y aérea), buenas propiedades acústicas (aplicaciones en la construcción), no son abrasivas con los equipos de fabricación (lo que aumenta la vida útil de los mismos), requieren de baja energía en su producción y sobre todo su biodegradabilidad (amigables con el medio ambiente, durante su producción y al final de su ciclo de vida), entre otras.

Se identificaron los elementos de una cadena logística verde para facilitar la recolección, transporte, almacenamiento y extracción/producción de las fibras extraídas delseudodallo, desde las fincas productoras hasta centros de acopio ubicados estratégicamente. Esto contribuye a iniciar el proceso de aprovechamiento, reproducción y comercialización de la fibra. Se encontró que, para el caso la zona rural del municipio de Manizales, el aprovechamiento económico de estos residuos podría beneficiar alrededor de 70 familias. La metodología usada para este diseño puede ser fácilmente reproducida ó escalada a otras regiones con cultivos de plátano y banano, productos de gran importancia económica y social para la región y el país.

Recomendaciones

Respecto de los tratamientos químicos de las fibras se recomienda considerar en un futuro el efecto de varios factores como la variación del tiempo de exposición de las fibras en la solución y de la temperatura de secado. Estas variables muy probablemente podrían tener influencia significativa sobre las propiedades mecánicas y, eventualmente serían alternativas viables y sencillas para mejorar estas características.

Para contribuir a la reducción de costos en el tratamiento y a sus efectos medioambientales se sugiere evaluar otros productos químicos de funcionalidad similar a los utilizados en este trabajo que, siendo más económicos y menos contaminantes, puedan ser utilizados para que las fibras adquieran el grado de hidrofobicidad y características mecánicas necesarios para su aplicación en la fabricación de materiales compuestos.

De acuerdo con la información disponible en la literatura se recomienda incrementar la cantidad de fibra en el compuesto e identificar sus efectos en las diferentes propiedades. La técnica que se usó en este trabajo no permitió cargas superiores al 15%. Para tal fin se propone utilizar otras técnicas de preparación de compuestos que permitan incrementar la proporción de fibra cargada en la matriz. Otra forma de obtener este propósito sería cambiar el tamaño de la fibra, por ejemplo, fibra cortada en longitudes muy pequeñas.

Aunque la resina de poliéster es un material viable debido a su bajo costo y comercialización, es de gran importancia empezar a identificar resinas de tipo biodegradable y así obtener un material completamente natural.

Producción bibliográfica

- 1.1 Artículo de modificación química superficial a fibras de yute y lino realizado en la universidad de Minho “*Modificación química de las fibras de yute y de lino con anhídrido acético y epichlorhidrina*” aceptado y publicado revista NOOS (Universidad nacional sede Manizales) <http://revnoos.manizales.unal.edu.co/index.php/es/articulo/volumen-3> (Ver Anexo 1.1).
- 1.2 Artículo del capítulo 2 “*Compuestos de poliéster reforzados con fibra de plátano/banano tejida y modificada químicamente, comparación con fibra de vidrio y fique*”, aceptado por la revista internacional “*Información tecnológica (Chile)*”. (Ver Anexo 1.2).
- 1.3 *Water uptake, chemical characterization and mechanical behavior of modified banana-plantain fiber and their polyester composites*. Sometido a revisión”: revista internacional “*Polymer Composites*”. (Ver Anexo 1.3).
- 2 Capítulo de libro versión en inglés y extendida del capítulo 3 “*Towards Green Supply Chain Management in Agricultural Sector: Approach to Logistic Design for Utilization of Banana-Plantain Pseudo-Stem Fiber*”. Libro en proceso de publicación : “*Green Supply Chains: applications in agribusiness industries*” (Ver Anexo 2)
- 3.1 Congreso internacional: 1st Internacional Conference on Natural Fibers: Sustainable materials for Advanced Applications (Guimaraes- Portugal 9-10 11 June 2013):
 - 3.1.1 “*Epichlorohydrin and acetic anhydride modification of banana-plantain (musa paradisiaca) pseudo-stem fibers*”. (Ver Anexo 3.1.)
 - 3.1.2 “*Comparison of chemical and DBD plasma treatments of banana-plantain (musa paradisiaca) pseudo-stem fibers*”. (Ver Anexo 3.1.)
- 3.2 Congreso internacional: The international mechanical engineering and agricultural sciences congress (UPB Floridablanca – Colombia 9-10 11 October 2013): “*Kaolinite/banana-plantain fiber/polyester composites: Mechanical tensile and water absorption properties*”. (Ver Anexo 3.2).
- 3.3 Congreso internacional: The 13th Internacional Symposium on Bioplastics, Biocomposites & Biorefining; Guelph, Canada; May 19-24 2014. Abstract Submission: “*Kaolinite/banana-plantain fiber/polyester composites: Mechanical tensile and water absorption properties*”. (Ver Anexo 3.3)
- 4 Pasantía internacional Universitaria Universidade do Minho (Portugal): Prof. Raul Figueiro, por un periodo de 3 meses. (Ver Anexo 4)
- 5 Proyecto aprobado por el Programa Jóvenes Investigadores e innovadores 2012, Facultad de Ingeniería y Arquitectura –Convenio especial de cooperación No. 0729

de 2012. Resolución DFIA – 0281 de 2013: “*Elaboración de un material biocompuesto a partir de la fibra de plátano*”. (Ver Anexo 5)

6 Artículos de divulgación

6.1 Unimedios. “*Fibra de plátano competirá con las de vidrio y carbón*”, agosto de 2013. (Ver Anexo 6.1)

6.2 La patria. “*Fibra de plátano para hacer plásticos*”, septiembre 15 de 2013 (Ver Anexo 6.2)

6.3 Prisma TV. (Ver link <http://www.prismatv.unal.edu.co/nc/detalle-serie/detalle-programa/article/fibra-de-platano-capitulo-2.html>)

Referencias

1. Flieger, M., et al., *Biodegradable plastics from renewable sources*. Folia Microbiologica, 2003. **48**(1): p. 27-44.
2. Mohanty, A.K., L.T. Drzal, and M. Misra, *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites*, ed. C. Press. 2005. 896.
3. Capuz Rizo, S., et al., *Ecodiseño :ingeniería del ciclo de vida para el desarrollo de productos sostenibles*, ed. U.P.d.V. Alfaomega. 2006, México. 268.
4. Hoof, B.v., N. Monroy, and A. Saer, *Producción más limpia :paradigma de gestión ambiental* Alfaomega Universidad de Los Andes, 2008.. 2008, Bogotá. 280.
5. Johansson, C., et al., *Renewable fibers and bio-based materials for packaging applications*. BioResources, 2012. **7**(2): p. 1-47.
6. FAO. *Año internacional de las fibras naturales*. 2009 [cited 2013 Noviembre 2013]; Available from: <http://www.naturalfibres2009.org/es/>.
7. Rodríguez, L. and O. Suarez, *Formular alternativas basadas en tecnología de acumulación para el uso eficiente de la cadena de valor del plátano*, in *Departamento de Ingeniería Industrial* 2010, Universidad Nacional de Colombia: Manizales. p. 136.
8. Kuniak, L. and R.H. Marchessault, *Study of the Crosslinking Reaction between Epichlorohydrin and Starch*. Starch - Stärke, 1972. **24**(4): p. 110-116.
9. Zeng, X. and E. Ruckenstein, *Control of Pore Sizes in Macroporous Chitosan and Chitin Membranes*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1996. **35**(11): p. 4169-4175.
10. Orrego, C. and J. Valencia, *Preparation and characterization of chitosan membranes by using a combined freeze gelation and mild crosslinking method*. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2009. **32**(2): p. 197-206.
11. Kim, D.-Y., Y. Nishiyama, and S. Kuga, *Surface acetylation of bacterial cellulose*. Cellulose, 2002. **9**(3-4): p. 361-367.
12. Freier, T., et al., *Controlling cell adhesion and degradation of chitosan films by N-acetylation*. Biomaterials, 2005. **26**(29): p. 5872-5878.
13. Díaz, A., M.J. Álvares, and P. González, *Logística Inversa y Medio Ambiente*, ed. McGRAW-HILL. 2004, Madrid.
14. Rodríguez, L., O. Suárez, and A. Pareja, *Cadena de valor en el sector primario: El caso del plátano*. 2011, Universidad Nacional de Colombia: Sede Manizales.
15. Bessadok, A., et al., *Influence of chemical modifications on water-sorption and mechanical properties of Agave fibres*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008. **39**(1): p. 29-45.
16. Singha, A.S. and V.K. Thakur, *Synthesis and Characterizations of Silane Treated Grewia optiva Fibers*. International Journal of Polymer Analysis and Characterization, 2009. **14**(4): p. 301-321.

17. Mysamy, K. and I. Rajendran, *Influence of alkali treatment and fibre length on mechanical properties of short Agave fibre reinforced epoxy composites*. Materials & Design, 2011. **32**(8–9): p. 4629-4640.
18. Espinal, C., H. Martínez, and Y. Peña, *La cadena del plátano en Colombia.*, 2005: Ministerio de agricultura y desarrollo rural; Observatorio de agro cadenas Colombia.
19. Alves, C., et al., *Ecodesign of automotive components making use of natural jute fiber composites*. Journal of Cleaner Production, 2010. **18**(4): p. 313-327.
20. Idicula, M., et al., *Dynamic mechanical analysis of randomly oriented intimately mixed short banana/sisal hybrid fibre reinforced polyester composites*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(7–8): p. 1077-1087.
21. Guimarães, J.L., et al., *Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourd fibers of Brazil*. Industrial Crops and Products, 2009. **30**(3): p. 407-415.
22. Barreto, A.C.H., et al., *Properties of sisal fibers treated by alkali solution and their application into cardanol-based biocomposites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011. **42**(5): p. 492-500.
23. Besednjak, A., *Materiales Compuestos: Procesos de fabricación de embarcaciones*. Nautica UPC. 2005, Barcelona.
24. John, M.J. and S. Thomas, *Biofibres and biocomposites*. Carbohydrate Polymers, 2008. **71**(3): p. 343-364.
25. Thomas, S. and L.A. Pothan, *Natural Fibre Reinforced Polymer Composites from Macro to Nanoscale*. 1 ed. 2009, USA: Old City Publishing, Inc.
26. Idicula, M., et al., *A study of the mechanical properties of randomly oriented short banana and sisal hybrid fiber reinforced polyester composites*. Journal of Applied Polymer Science, 2005. **96**(5): p. 1699-1709.
27. Faruk, O., et al., *Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010*. Progress in Polymer Science, 2012(0).
28. William F. Smith and J. Hashemi, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. 4 ed, ed. McGraw-Hill. 2006, México. 1032.
29. Pothan, L.A., S. Thomas, and N.R. Neelakantan, *Short banana fiber reinforced polyester composites: Mechanical, failure and aging characteristics*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1997. **16**(8): p. 744-765.
30. Mohanty, A.K., M. Misra, and L.T. Drzal, *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*. 2005: Taylor & Francis.
31. Lillholt, H. and J.M. Lawther, *Natural Organic Fibers*, in *Comprehensive Composite Materials Vol 1: Fiber Reinforcements and General Theory of Composites*, T.-W. Chou, Editor. 2000: New York. p. 303-325.
32. Chivrac, F., E. Pollet, and L. Avérous, *Progress in nano-biocomposites based on polysaccharides and nanoclays*. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2009. **67**(1): p. 1-17.
33. Chanprateep, S., *Current trends in biodegradable polyhydroxyalkanoates*. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2010. **110**(6): p. 621-632.
34. Barkakaty, B.C., *Some structural aspects of sisal fibers*. Journal of Applied Polymer Science, 1976. **20**(11): p. 2921-2940.
35. Bisanda, E.T.N. and M.P. Ansell, *The effect of silane treatment on the mechanical and physical properties of sisal-epoxy composites*. Composites Science and Technology, 1991. **41**(2): p. 165-178.
36. Rozman, H.D., L. Musa, and A. Abubakar, *Rice husk–polyester composites: The effect of chemical modification of rice husk on the mechanical and dimensional*

- stability properties*. Journal of Applied Polymer Science, 2005. **97**(3): p. 1237-1247.
37. Kalia, S., B.S. Kaith, and I. Kaur, *Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites—A review*. Polymer Engineering & Science, 2009. **49**(7): p. 1253-1272.
 38. Sgriccia, N., M.C. Hawley, and M. Misra, *Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008. **39**(10): p. 1632-1637.
 39. Kabir, M.M., et al., *Effects of Natural Fibre surface on composite properties: A review*. Energy, Environment and Sustainability 2011: p. 94-99.
 40. Jawaid, M. and H.P.S. Abdul Khalil, *Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review*. Carbohydrate Polymers, 2011. **86**(1): p. 1-18.
 41. Müssig, J., J. Mussig, and C. Stevens, *Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications*. 2010: John Wiley & Sons.
 42. Balogh, G. *Centro de Recursos Naturales Renovables de la Zona Semiárida* [cited 2014 13 enero]; Available from: <http://www.cerzos-conicet.gov.ar/>.
 43. Annie Paul, S., et al., *Effect of fiber loading and chemical treatments on thermophysical properties of banana fiber/polypropylene commingled composite materials*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008. **39**(9): p. 1582-1588.
 44. Mukhopadhyay, S.P.D., et al., *Banana Fibers – Variability and Fracture Behaviour* Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2008. **3**(2): p. 6.
 45. Rhim, J.-W. and P.K.W. Ng, *Natural biopolymer-based nanocomposite films for packaging applications*. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2007. **47**(4): p. 411-433.
 46. Clark, J.H. and F. Deswarte, *Introduction to Chemicals from Biomass*. Renewable Resources, ed. C. Stevens. 2008, London: John Wiley & Sons, Ltd.
 47. Kalia, S., B.S. Kaith, and I. Kaur, *Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites*. 2011.
 48. Nwabunma, D. and T. Kyu, *Polyolefin Composites*, ed. I. John Wiley & Sons. 2008. 624.
 49. Bledzki, A.K. and J. Gassan, *Composites reinforced with cellulose based fibres*. Progress in Polymer Science, 1999. **24**(2): p. 221-274.
 50. Charlet, K., et al., *Multi-scale morphological characterisation of flax: From the stem to the fibrils*. Carbohydrate Polymers, 2010. **82**(1): p. 54-61.
 51. Baley, C., *Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2002. **33**(7): p. 939-948.
 52. Belgacem, M.N. and A. Gandini, *The surface modification of cellulose fibres for use as reinforcing elements in composite materials*. Composite Interfaces, 2005. **12**(1-2): p. 41-75.
 53. John, M.J. and R.D. Anandjiwala, *Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforced composites*. Polymer Composites, 2008. **29**(2): p. 187-207.
 54. Tripathy, P.C., et al., *Studies of Cu(II)-IO4- initiated graft copolymerization of methyl methacrylate from defatted pineapple leaf fibres*. Polymer International, 1999. **48**(9): p. 868-872.
 55. Ouajai, S., A. Hodzic, and R.A. Shanks, *Morphological and grafting modification of natural cellulose fibers*. Journal of Applied Polymer Science, 2004. **94**(6): p. 2456-2465.

56. Mishra, S., et al., *Graft Copolymerization of Acrylonitrile on Chemically Modified Sisal Fibers*. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2001. **286**(2): p. 107-113.
57. Mondal, M.I.H., F.I. Farouqui, and F.M.E. Kabir, *Graft copolymerization of acrylamide and acrylic acid onto jute fibre using potassium persulphate as initiator* *Chemistry and Technology*, 2002. **36**(5-6).
58. Edeerozey, A.M.M., et al., *Chemical modification of kenaf fibers*. *Materials Letters*, 2007. **61**(10): p. 2023-2025.
59. Kabir, M.M., H. Wang, and K.-T. Lau, *Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: an overview*. *Composites Part B: Engineering*, 2012. **47**(7): p. 2883-2892.
60. Hill, C.A.S., H.P.S.A. Khalil, and M.D. Hale, *A study of the potential of acetylation to improve the properties of plant fibres*. *Industrial Crops and Products*, 1998. **8**(1): p. 53-63.
61. Li, X., L. Tabil, and S. Panigrahi, *Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites: A Review*. *Journal of Polymers and the Environment*, 2007. **15**(1): p. 25-33.
62. Lee, S.-H., S.-Y. Park, and J.-H. Choi, *Fiber formation and physical properties of chitosan fiber crosslinked by epichlorohydrin in a wet spinning system: The effect of the concentration of the crosslinking agent epichlorohydrin*. *Journal of Applied Polymer Science*, 2004. **92**(3): p. 2054-2062.
63. Merlini, C., V. Soldi, and G.M.O. Barra, *Influence of fiber surface treatment and length on physico-chemical properties of short random banana fiber-reinforced castor oil polyurethane composites*. *Polymer Testing*, 2011. **30**(8): p. 833-840.
64. Arifuzzaman Khan, G., et al., *Surface modification of okra bast fiber and its physico-chemical characteristics*. *Fibers and Polymers*, 2009. **10**(1): p. 65-70.
65. Nechwatal, A., K.-P. Mieck, and T. Reußmann, *Developments in the characterization of natural fibre properties and in the use of natural fibres for composites*. *Composites Science and Technology*, 2003. **63**(9): p. 1273-1279.
66. Ibrahim, M.M., et al., *Banana fibers and microfibrils as lignocellulosic reinforcements in polymer composites*. *Carbohydrate Polymers*, 2010. **81**(4): p. 811-819.
67. Liu, L., et al., *Modification of natural bamboo fibers for textile applications*. *Fibers and Polymers*, 2011. **12**(1): p. 95-103.
68. Mejía Osorio, J.C., R. Rodríguez Baracaldo, and J.J. Olaya Florez, *The influence of alkali treatment on banana fibre's mechanical properties* *Ingeniería e investigación*, 2012. **32**(1): p. 4.
69. Charlet, K., et al., *Characteristics of Hermès flax fibres as a function of their location in the stem and properties of the derived unidirectional composites*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007. **38**(8): p. 1912-1921.
70. Duval, A., et al., *Influence of the sampling area of the stem on the mechanical properties of hemp fibers*. *Materials Letters*, 2011. **65**(4): p. 797-800.
71. Pacheco-Torgal, F. and S. Jalali, *Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review*. *Construction and Building Materials*, 2011. **25**(2): p. 575-581.
72. Kang, J. and S. Kim, *Improvement in the mechanical properties of polylactide and bamboo fiber biocomposites by fiber surface modification*. *Macromolecular Research*, 2011. **19**(8): p. 789-796.

73. Murali Mohan Rao, K., K. Mohana Rao, and A.V. Ratna Prasad, *Fabrication and testing of natural fibre composites: Vakka, sisal, bamboo and banana*. Materials & Design, 2010. **31**(1): p. 508-513.
74. Ratna Prasad, A.V. and K. Mohana Rao, *Mechanical properties of natural fibre reinforced polyester composites: Jowar, sisal and bamboo*. Materials & Design, 2011. **32**(8–9): p. 4658-4663.
75. Garside, P. and P. Wyeth, *Identification of cellulosic fibres by FTIR spectroscopy: Thread and single fibre analysis by attenuated total reflectance*. Studies in Conservation, 2003. **48**(4): p. 269-275.
76. Wielage, B., et al., *Thermogravimetric and differential scanning calorimetric analysis of natural fibres and polypropylene*. Thermochimica Acta, 1999. **337**(1–2): p. 169-177.
77. Dudkiewicz, A., et al., *Characterization of nanomaterials in food by electron microscopy*. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2011. **30**(1): p. 28-43.
78. Tan, K.C., *A framework of supply chain management literature*. European Journal of Purchasing & Supply Management, 2001. **7**(1): p. 39-48.
79. Heizer, J. and B. Render, *Principios de la Administración de Operaciones*, ed. M. Pearson. Vol. 5. 2004. 704.
80. Ballou, R., *Logística: Administración de la Cadena de Suministro*. 5 ed, ed. P.P.H. México. 2004. 789.
81. Murphy, P. and R. Poist, *Green Logistics Strategies: An Analysis of Usage Patterns*. Transportation Journal, 2000. **40**(2): p. 11.
82. Sarache-Castro, W., C. Cardona, and J. Tamayo, *Localización y sistemas de información logístico. Aplicaciones en una red de abastecimiento agroindustrial*. Gobernación de Caldas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. 2009.
83. Rockland, L.B., *Saturated Salt Solutions for Static Control of Relative Humidity between 5° and 40° C* Analytical Chemistry., 1960. **32**(10).
84. Orrego, C.E., et al., *Novel chitosan membranes as support for lipases immobilization: Characterization aspects*. Carbohydrate Polymers, 2010. **79**(1): p. 9-16.
85. Oliveira, F., et al., *Surface Modification of Banana Fibers by DBD Plasma Treatment*. Plasma Chem Plasma Process, 2012. **32**: p. 259–273.
86. B. Deepa, et al., *Structure, morphology and thermal characteristics of banana nano fibers obtained by steam explosion*. Bioresource Technology, 2011. **102**(2).
87. Himmelsbach, D.S. and D.E. Akin, *Near-Infrared Fourier-Transform Raman Spectroscopy of Flax (*Linum usitatissimum* L.) Stems*. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998. **46**.
88. Chu, L.-Q., et al., *Base-induced delignification of miscanthus x giganteus studied by three-dimensional confocal raman imaging*. Bioresource Technology, 2010. **101**(13): p. 4919-4925.
89. Kovur, S.K., et al., *Characterization of refined hemp fibers using Nir FT Raman micro spectroscopy and enviromental scanning electron microscopy*. BioResources 2008. **3**(4).
90. Edwards, H.G.M., D.W. Farwell, and D. Webster, *FT Raman microscopy of untreated natural plant fibres*. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 1997. **53**(13): p. 2383-2392.
91. Stewart, D., et al., *Fourier-Transform Infrared and Raman Spectroscopic Study of Biochemical and Chemical Treatments of Oak Wood (*Quercus ruba*) and Barley (*Hordum vulgare*) Straw*. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1995. **43**.

92. Bernabé, G., et al., *Thermal behavior of lignin and cellulose from waste composting process*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2013. **111**(1): p. 589-595.
93. Khalil, A., H.P. S., and N.L. Suraya, *Anhydride modification of cultivated kenaf bast fibers: Morphological, spectroscopic, and thermal studies*. BioResources, 2011. **6**(2).
94. Bessadok, A., et al., *Study of water sorption on modified Agave fibres*. Carbohydrate Polymers, 2009. **76**(1): p. 74-85.
95. Hill, C.A.S., A. Norton, and G. Newman, *The water vapor sorption behavior of natural fibers*. Journal of Applied Polymer Science, 2009. **112**(3): p. 1524-1537.
96. Xie, Y., et al., *The dynamic water vapour sorption behaviour of natural fibres and kinetic analysis using the parallel exponential kinetics model*. Journal of Materials Science, 2011. **46**(2): p. 479-489.
97. Alix, S., et al., *Effect of chemical treatments on water sorption and mechanical properties of flax fibres*. Bioresource Technology, 2009. **100**(20): p. 4742-4749.
98. Mwaikambo, L.Y. and M.P. Ansell, *Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization*. Journal of Applied Polymer Science, 2002. **84**(12): p. 2222-2234.
99. Gustafsson, E., P.A. Larsson, and L. Wågberg, *Treatment of cellulose fibres with polyelectrolytes and wax colloids to create tailored highly hydrophobic fibrous networks*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2012. **414**(0): p. 415-421.
100. Bhushan, B., M. Nosonovsky, and Y.C. Jung, *Lotus Effect: Roughness-Induced Superhydrophobic Surfaces*, in *Nanotribology and Nanomechanics*. 2008, Springer Berlin Heidelberg. p. 995-1072.
101. Tavisto, M., et al., *Wetting and wicking of fibre plant straw fractions*. Industrial Crops and Products, 2003. **18**(1): p. 25-35.
102. Fuentes, C.A., et al., *Wetting behaviour and surface properties of technical bamboo fibres*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2011. **380**(1-3): p. 89-99.
103. Alvarez, V.A. and A. Vázquez, *Influence of fiber chemical modification procedure on the mechanical properties and water absorption of MaterBi-Y/sisal fiber composites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006. **37**(10): p. 1672-1680.
104. Singha, A.S. and R.K. Rana, *Effect of pressure induced graft copolymerization on the physico-chemical properties of bio-fibres*. BioResources, 2010. **5**(2).
105. George, J., S.S. Bhagawan, and S. Thomas, *Thermogravimetric and dynamic mechanical thermal analysis of pineapple fibre reinforced polyethylene composites*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 1996. **47**(4): p. 1121-1140.
106. Yang, H., et al., *Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis*. Fuel, 2007. **86**(12-13): p. 1781-1788.
107. ElayaPerumal, A. and N. Venkateshwaran, *Natural Fiber-Reinforced Polymer Composites in Automotive Applications- A Review*. IJAEA, 2008. **1**(6): p. 68-74.
108. Oliveira, F., et al., *Surface Modification of Banana Fibers by DBD Plasma Treatment*. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2012. **32**: p. 259-273.
109. Arifuzzaman Khan, G.M., et al., *Surface modification of okra bast fiber and its physico-chemical characteristics*. Fibers and Polymers, 2009. **10**(1): p. 65-70.

110. Vilay, V., et al., *Effect of fiber surface treatment and fiber loading on the properties of bagasse fiber-reinforced unsaturated polyester composites*. Composites Science and Technology, 2008. **68**(3-4): p. 631-638.
111. Udaya Kiran, C., et al., *Tensile Properties of Sun Hemp, Banana and Sisal Fiber Reinforced Polyester Composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2007. **26**(10): p. 1043-1050.
112. Pothan, L.A., J. George, and S. Thomas, *Effect of fiber surface treatments on the fiber-matrix interaction in banana fiber reinforced polyester composites*. Composite Interfaces, 2002. **9**(4): p. 335-353.
113. Shah, H., B. Srinivasulu, and S.C. Shit, *Influence of banana fibre chemical modification on the mechanical and morphological properties of woven banana fabric/unsaturated polyester resin composites*. Polymers from Renewable Resources, 2013. **4**(2): p. 61-65.
114. Dittenber, D.B. and H.V.S. GangaRao, *Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012. **43**(8): p. 1419-1429.
115. Pothan, L.A., et al., *Effect of Chemical Modification on the Mechanical and Electrical Properties of Banana Fiber Polyester Composites*. Journal of Composite Materials, 2007. **41**(19): p. 2371-2386.
116. Sreekumar, P.A., et al., *Mechanical and water sorption studies of ecofriendly banana fiber-reinforced polyester composites fabricated by RTM*. Journal of Applied Polymer Science, 2008. **109**(3): p. 1547-1555.
117. Paul, S.A., et al., *Influence of polarity parameters on the mechanical properties of composites from polypropylene fiber and short banana fiber*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010. **41**(10): p. 1380-1387.
118. Sumaila, M., I. Amber, and M. Bawa, *Effect of fiber length on the physical and mechanical properties of random oriented, nonwoven short banana (musa balbisiana) fibre/epoxy composite*. Asian journal of natural and applied sciences, 2013. **2**(1): p. 39-49.
119. Karnani, R., M. Krishnan, and R. Narayan, *Biofiber-reinforced polypropylene composites*. Polymer Engineering & Science, 1997. **37**(2): p. 476-483.
120. Jannah, M., et al., *Effect of Chemical Surface Modifications on the Properties of Woven Banana-Reinforced Unsaturated Polyester Composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2009. **28**(12): p. 1519-1532.
121. Kim, H.J. and D.W. Seo, *Effect of water absorption fatigue on mechanical properties of sisal textile-reinforced composites*. International Journal of Fatigue, 2006. **28**(10): p. 1307-1314.
122. Dhakal, H.N., Z.Y. Zhang, and M.O.W. Richardson, *Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites*. Composites Science and Technology, 2007. **67**(7-8): p. 1674-1683.
123. Sheno, R.A. and J.F. Wellicome, *Composite materials in maritime structures*, ed. C.O.T. Series. Vol. 1. 2008.
124. Sever, K., et al., *Surface treatments of jute fabric: The influence of surface characteristics on jute fabrics and mechanical properties of jute/polyester composites*. Industrial Crops and Products, 2012. **35**(1): p. 22-30.
125. Belalcázar, S., J.C. Toro, and R. Jaramillo, *El cultivo del plátano en el trópico*, ed. Produmedios. 1991. 376.
126. Espinal G, C.F., H.J. Martínez Covalada, and Y. Peña Marín, *La Cadena de plátano en Colombia*, 2006: Bogotá.

127. Arcila P, M.I., *“oscosecha, Industrialización y Uso de Subproductos del Plátano*, C.R. Nueve, Editor 2002: Armenia.
128. Mohapatra, D., S. Mishra, and N. Sutar, *Banana and its by-product utilisation: an overview*. Journal of Scientific & Industrial Research, 2010. **69**: p. 323-329.
129. Joshi, S.V., et al., *Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?* Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2004. **35**(3): p. 371-376.
130. Satyanarayana, K.G., J.L. Guimarães, and F. Wypych, *Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007. **38**(7): p. 1694-1709.
131. Commission, E., *D2.3 - Report on the “Assessment of the Bio-based Products Market Potential for Innovation”*. 2010.
132. Corabastos. *CORABASTOS “Recogemos la mejor cosecha”* Accessed in march 2013. <http://www.corabastos.com.co>; Available from: <http://www.corabastos.com.co/historico/reportes/>.