

**ELABORACIÓN DE TABLEROS DE FIBRAS LIBRES DE RESINAS A PARTIR
DE RESIDUOS DE FIQUE**

SINDY MILENA ARRIAGA RENGIFO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

INGENIERÍA QUÍMICA

MEDELLÍN

2015

**ELABORACIÓN DE TABLEROS DE FIBRAS LIBRES DE RESINAS A PARTIR
DE RESIDUOS DE FIQUE**

SINDY MILENA ARRIAGA RENGIFO

**Trabajo de grado para optar al título
de Ingeniero Químico**

Director

JORGE ALBERTO VELÁSQUEZ JIMÉNEZ.

Doctor en Ingeniería Química

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

INGENIERÍA QUÍMICA

MEDELLÍN

2015

Nota de aceptación

Director
Ph.D Jorge Alberto Velásquez J.

Msc. Fabio Castrillón Hernández.
Director Ingeniería Química

Medellín, marzo de 2015

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme llegar hasta este punto
y alcanzar mis objetivos.

A mis padres y hermana por ser el motor de mi vida
y por el apoyo incondicional para llegar hacer la persona que
que soy hoy.

Al director del proyecto, Ph.D. Jorge Alberto Velásquez Jiménez,
por las constantes asesorías y sugerencias
durante el desarrollo del trabajo.

Al grupo de investigación Pulpa y Papel,
por los espacios de trabajo brindados.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS.....	7
LISTA DE FIGURAS.....	8
RESUMEN	9
INTRODUCCIÓN	10
1. MARCO TEÓRICO	12
1.1 Fique (<i>Furcraea andina</i>) como materia prima.	12
1.2 Pretratamiento con vapor de materiales lignocelulósicos.....	14
1.3 Lignina.....	17
1.4 Tableros de fibras sin aditivos.....	19
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
2.1 Materia prima.	20
2.2 Caracterización de las astillas de fique y las pulpas tratadas.....	21
2.2.1 Humedad	21
2.2.2 Cenizas.....	22
2.2.3 Extractivos en agua caliente	22
2.2.4 Extractivos en etanol/tolueno.....	23
2.2.5 Lignina Klason	24
2.3 Pretratamiento con vapor (<i>steam explosion</i>)	25
2.4 Molienda de la pulpa.	26
2.5 Preparación de los tableros.....	26
2.6 Caracterización físicomecánica.....	27
2.7 Diseño de experimentos.	28
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
3.1 Caracterización de la materia prima.....	30
3.2 Resultados ensayos preliminares.....	30
3.3 Pulpas obtenidas después del <i>steam explosion</i>	33
3.4 Elaboración de los tableros.	35
3.5 Propiedades físicomecánicas.....	37
3.5.1 Módulo de elasticidad (MOE).....	37

3.5.2	Módulo de ruptura (MOR).....	38
3.5.3	Absorción de agua (WA) e hinchazón en el espesor (TS)	40
4.	CONCLUSIONES	43
5.	RECOMENDACIONES.....	44
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	45
	ANEXOS	50

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de la fibra de fique.....	12
Tabla 2. Matriz del diseño de experimentos.....	29
Tabla 3. Caracterización química del fique.....	30
Tabla 4. Resultados de las propiedades físico-mecánicas del diseño de experimentos.....	31
Tabla 5. Matriz del segundo diseño de experimentos.....	33
Tabla 6. Caracterización química de las pulpas después del <i>steam explosion</i>	34
Tabla 7. ANOVA para la lignina.....	34
Tabla 8. Diseño de experimentos No. 2.....	36
Tabla 9. ANOVA para el MOE.....	38
Tabla 10. ANOVA para el MOR.....	39
Tabla 11. ANOVA para el WS.....	41
Tabla 12. ANOVA para el TS.....	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fique (<i>Furcraea andina</i>).....	12
Figura 2. Modelo estructural de la lignina de madera aserrada.....	18
Figura 3. Reactor <i>steam explosion</i>	25
Figura 4. Molino de cuchillas Retsch.....	26
Figura 5. Prensa Hidráulica.....	27
Figura 6. Maquina universal de ensayos.....	28
Figura 7. ANOVA para el MOE, primer diseño de experimentos.....	32
Figura 8. Fique antes y después del <i>steam explosion</i>	33
Figura 9. Media de la lignina para cada severidad.....	35
Figura 10. Tableros de fique a diferentes severidades.....	36
Figura 11. Media del MOE para cada severidad.....	38
Figura 12. Media del MOR para cada severidad.....	40
Figura 13. Media del WS para cada severidad.....	41
Figura 14. Media del TS para cada severidad.....	42
Figura 15. Probetas de la prueba de absorción de agua e hinchamiento.....	42

RESUMEN

Se realizaron tableros de fibra sin aditivos sintéticos utilizando fique como materia prima. Se trabajó bajo un diseño de experimentos donde se evaluó el efecto de la severidad en el pretratamiento y la temperatura de prensado en las propiedades físico-mecánicas de módulo de elasticidad (MOE), módulo de ruptura (MOR), hinchamiento en el espesor (TS) y absorción de agua (WA).

Las astillas de fique fueron tratadas con vapor en un reactor discontinuo de 10 L. La pulpa seca y molida, se llevó a una prensa hidráulica para formar los tableros. Se varió la severidad en el pretratamiento con un rango de 3,4 a 4,0; durante el prensado, la presión y la temperatura se mantuvieron constantes en valores de 12 MPa y 200°C. Las propiedades físico-mecánicas de los tableros, se caracterizaron según lo establecido en las normas estándar españolas y europeas (UNE-EN).

Se lograron tableros de 3 mm de espesor y con dimensiones de 15 mm de longitud por 5 mm de ancho y con densidades por encima de 1000 kg/m³, módulos de elasticidad mayor a 2000 MPa y módulos de rupturas mayores a 10 MPa.

PALABRAS CLAVES: tableros de fibra sin aditivos, astillas de fique, pretratamiento con vapor

INTRODUCCIÓN

La considerable disminución de los recursos naturales, la cada vez más estricta reglamentación sobre el uso de materiales sintéticos, la creciente conciencia ambiental y consideraciones económicas son las principales fuerzas impulsoras para utilizar recursos renovables en aplicaciones industriales. El uso de residuos agrícolas como los del fique para la producción de tableros de fibras sin adhesivos sintéticos es una importante contribución para resolver problemas como la deforestación.

Por otra parte, el aumento en el costo de los combustibles y la escasez de fuentes de petróleo conducen a buscar sustitutos para los subproductos del petróleo como las resinas utilizadas para la producción de tableros de fibras; dichas resinas presentan efectos secundarios como riesgos para la salud causados por las emisiones de compuestos orgánicos volátiles como el formaldehído. En la actualidad las resinas más utilizadas en la fabricación de tableros aglomerados son las fenol formaldehído (FF), urea formaldehído (UF), melamina urea formaldehído (MUF). Las resinas urea formaldehído (UF) y fenol formaldehído (FF), constituyen el 50% de los derivados del formaldehído, el cual se emite al medio ambiente por la combustión incompleta de líquidos o gases derivados del petróleo (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial).

Hoy en día se están aplicando nuevas formulaciones de adhesivos y procesos de prensado, que reducen significativamente el contenido de formaldehído libre de los tableros (Eco Diseño, 2009). Para reducir las emisiones de formaldehído se aplican procesos como, la disminución de la relación formaldehído/urea, la adición de materiales secuestrantes del formaldehído directamente a la mezcla de la resina y al tablero final. El método más utilizado es la disminución de la relación formaldehído/urea. En la última década, la relación era de aproximadamente 1.6, sin embargo, hoy en día se ha conseguido reducir hasta un valor de 1.0 y en

algunos casos incluso más bajo, pero aun así el problema de contaminación por emisión de formaldehído está latente (Vallejos Calzada, 2010).

Por lo anterior, se plantea la fabricación de tableros de fibra mediante el pretratamiento con vapor del fique (*Furcraea andina*); este tratamiento con vapor permite que la lignina presente en las fibras intervenga como aglomerante durante el proceso de prensado termomecánico bajo condiciones de temperatura y presión controladas para así obtener la calidad deseada de los tableros.

La producción de tableros aglomerados a partir de residuos de fique, provenientes de cultivos nacionales, genera un objetivo de alto interés nacional, debido a que el sector fiquero actualmente debe disponer estos residuos en rellenos sin darle ningún tipo de aprovechamiento y generando altos costos económicos y ambientales para las empresas. Por tal razón se establece una interacción entre las empresas productoras y consumidoras de este material vegetal con los grupos académicos, con el fin de realizar estudios que permitan usar la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías para promover la interdependencia entre el medio ambiente y la economía.

Los tableros sin adhesivos sintéticos, usando lignina como adherente en lugar de resina, contribuyen a la conservación del medio ambiente al ser biodegradables y no presentar emisiones de formaldehído.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Fique (*Furcraea andina*) como materia prima.

El fique (*Furcraea andina*) pertenece a una extensa familia botánica del mismo nombre: “Agavaceae”. Se les conoce con el nombre común de agave, pita, maguey, cabuya, fique, mezcal. Su altura varía entre dos y siete metros. Sus hojas son largas, angostas, carnosas, puntiagudas, acanaladas, dentado espinosas (en algunas variedades) y de color verde. El ancho de las hojas maduras varía entre diez y veinte centímetros y el largo entre uno y dos metros. El robusto tallo leñoso suele ser muy corto, por lo que las hojas aparentan surgir de la raíz. (Arte y Diseño, 2012)



Figura 1. Fique (*Furcraea andina*) (Arte y Diseño, 2012)

Su centro de origen está en México, aunque actualmente se distribuyen desde el sur de Estados Unidos hasta el norte de Venezuela y Colombia. La superficie cultivada promedio para anual de fique para Colombia es de 18.180 hectáreas con un rendimiento promedio anual de 1,3 toneladas por hectárea y una producción promedio anual superior a las 23.000 toneladas, de las cuales, la mayor cantidad

se destina a actividades de tipo industrial y en menor proporción a la manufactura artesanal (Corpoica, 2004).

El fique se adapta a diferentes condiciones edafoclimáticas en los cuales se encuentran distintas variedades de esta planta; sin embargo, cinco de ellas han sido seleccionadas y mayormente utilizadas por los productores del país estas variedades son: uña de águila (*Furcraea macrophylla*), tunosa común (*Furcraea gigantea*), fique cenizo (*Furcraea cabuya trel*), borde de oro (*Furcraea castilla*) y cabuya o rabo de chucha (*Furcraea andina*) (SENA - SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE, 2006)

La fibra de fique o cabuya se extrae de la planta de fique, la cual es la planta fibrosa más cultivada en Colombia (Delvasto S., 2010). Sus características son muy similares a las fibras de sisal. Hay una variación importante en el diámetro de las fibras entre las fibras de fique de un mismo lote y a lo largo de la fibra, como es típico de las fibras naturales. La variabilidad está asociada a la respuesta física necesaria a lo largo de la hoja para soportar su peso. (F.G. Torres, 2005), (Romildo D Tolêdo Filho, 2003).

Las características reportadas de las fibras de fique son las siguientes:

Tabla 1. Características de la fibra de fique. (Delvasto S., 2010)

Características del fique	
Diámetro equivalente	0,16 – 0,42 mm
Densidad aparente	723 kg/m ³
Gravedad específica	1,47
Absorción de agua	60%
Cantidad de agua	12%
Humedad relativa de equilibrio	8,12%
Celulosa	70%
Lignina	10,1%
Resistencia a la tensión	43 – 571 MPa
Elongación última	9,8%
Módulo elástico	8,2 – 9,1 GPa

Aunque la fibra de fique es muy utilizada, gran cantidad de esta fuente renovable es aún subutilizada. Actualmente el fique se utiliza principalmente para sogas y artesanías. Durante los últimos años la identificación de nuevas áreas de aplicación se ha convertido en una tarea urgente. El uso de fibras de fique como reforzante en materiales compuestos ha generado algún interés.

Gañan y Mondragón, evaluaron la posibilidad de modificar químicamente las fibras de fique para reforzar matrices poliméricas. Las propiedades mecánicas de dichos materiales compuestos de fibra tratados fueron más altas que los de los no tratados. Los autores observaron una reducción de la tendencia hidrófila del fique, lo cual proporciono mejoras en la adherencia de fibra-matriz (Gañan & Mondragón, 2005)

Por esa misma línea, Maranon *et al* investigaron las propiedades de impacto y resistencia a la tracción de materiales compuestos, reforzados con fibras de fique. Los investigadores incorporaron fibras de fique en resinas de poliéster para producir cinco capas de paneles laminados, dando como resultado compuestos de fique con absorción de energía similar que otros compuestos naturales (Maranon, Sanabria, Contreras, & Hormaza, 2008).

Dadas las características de la fibra y el potencial de producción en Colombia, la fibra de fique es un claro candidato para la producción de tableros de fibras sin aditivos mediante un pretratamiento de la fibra el cual mejore la estabilidad dimensional y la capacidad de autoenlazado de la fibra.

1.2 Pretratamiento con vapor de materiales lignocelulósicos.

Realizar un pretratamiento termomecánico a materiales lignocelulósicos es una técnica donde se liberan ácidos orgánicos, principalmente acético a partir de los restos acetilados de las hemicelulosas. Además en este tratamiento se produce una autohidrólisis que afecta los enlaces glicosídicos de las hemicelulosas y a los enlaces α -éter de la lignina.

Chornet y Overend describen la explosión con vapor como un proceso termomecano-químico. La separación de los componentes estructurales se da gracias a el calor en forma de vapor de agua (termo), fuerzas de cizallamiento debido a la expansión de la humedad (mecano), y la hidrólisis de enlaces glicosídicos (químicos) (Chornet & Overend, 1988).

El tratamiento explosivo con vapor, fue patentado en 1926 por Masón para la producción de tableros de madera, este tratamiento combina el efecto de la hidrólisis con la desorganización mecánica de la fibra lignocelulósica por efecto de la descompresión súbita a que es sometido el material. El proceso consiste en inyectar vapor a presión en el reactor donde se introduce la materia prima. El vapor penetra en la estructura lignocelulósica del material que después de un tiempo de reacción determinado es expulsado hacia un ciclón a presión atmosférica. El resultado final del pretratamiento es el cambio dentro de la pared celular y la rotura de la fibra, que provocan un aumento de la accesibilidad de la celulosa a las enzimas hidrolíticas. Las condiciones óptimas de temperatura y tiempo de reacción varían dependiendo del tipo de material. (Mason, 1927).

En la descripción del proceso se ve la importancia de la optimización de dos factores: tiempo de residencia y la temperatura. La cantidad de tiempo que la biomasa pasa en el reactor ayuda a determinar el grado de hidrólisis de hemicelulosa por los ácidos orgánicos. Chornet y Overend adaptaron un modelo para definir la severidad del pretratamiento con vapor en términos del efecto combinado de la temperatura y tiempo de residencia: (Overend & Chornet, 1987)

$$Se = \log \left(\int \exp \left(\frac{Tr-100}{14,75} \right) . dt \right) \quad (1)$$

Donde,

t = tiempo de residencia (min)

Tr = temperatura de reacción (°C)

Tanahashi *et al* estudiaron los efectos de la explosión con vapor en la constitución y las propiedades físicas de la madera. En el estudio se encontró que las fibras de Shirakaba (*Betula platiphilla* Skatchev var. *Japonica* Hara) a presiones mayores de 27,46 bar y 16 min de tiempo de residencia se separaron completamente. Además la cristalinidad aumentó 1,5 veces lo que llevó a los investigadores a concluir que la celulosa amorfa se vuelve cristalina durante el proceso de vaporización. Mediante análisis químicos a las fibras de Shirakaba tratadas con vapor, los autores observaron un pico correspondiente a la temperatura de transición vítrea (Tg) de la lignina que no estaba presente en el análisis de la madera sin tratar. La intensidad en el pico de la lignina aumentó en un tiempo de residencia hasta de 2 min manteniendo la misma presión. Este hecho los autores lo interpretaron como la repolimerización de la lignina, por lo tanto recomendaron una presión de 27,46 bar y tiempo de residencia de 2 min como valores óptimos para la designificación de Shirakaba (Tanahashi, Takada, Aoki, Goto, Higuchi, & Hanai, 1983)

Negro *et al* analizaron el efecto de las variables más importantes después del pretratamiento con vapor en la madera de pino. Estudiaron parámetros como contenido orgánico soluble, cambios en las relaciones atómicas O/C y H/C, índice de cristalinidad de la celulosa, dichos parámetros y sus interacciones fueron examinados con el algoritmo de Yates (Negro, Manzamares, Oliva, Ballesteros, & Ballesteros, 2003)

En cuanto al uso del pretratamiento con vapor en materiales lignocelulósicos para la fabricación de tableros autoenlazados, se han realizado estudios para analizar las bondades de diversas materias primas, así como los parámetros de operación durante el pretratamiento y proceso de prensado. En esta vía Quintana desarrolló tableros de fibra a partir de raquis de banano previamente tratados con vapor, lo que permitió que la lignina presente en las fibras aumentara casi 128% respecto a la cantidad de lignina contenida en las fibras sin tratar. Por lo anterior los tableros obtenidos fueron de buena calidad y sus propiedades estaban dentro de los parámetros exigidos (Quintana, Velásquez, Betancourt, & Gañan, 2009).

Velásquez logró resultados positivos en las propiedades mecánicas de tableros sin adhesivos a partir de *Miscanthus sinensis*. También analizó el efecto de molienda de las fibras después del tratamiento con vapor y la adición de lignina kraft en la estabilidad dimensional de los tableros, dando como resultado mejoras en la calidad del producto final (Vélasquez, 2002).

1.3 Lignina

La lignina es, después de la celulosa y la hemicelulosa, uno de los polímeros más abundantes en la naturaleza, y conforman la pared celular de las plantas en una disposición regulada a nivel nanoestructural, dando como resultado redes de lignina-hidratos de carbono. Es un heteropolímero amorfo constituido por tres unidades diferentes de fenilpropano (alcoholes p-cumarílico, coniferílico y sinapílico) que se entrelazan entre sí mediante diferentes tipos de enlaces (Buranov & Mazza, 2008).

La lignina es una macromolécula racémica reticulado con masas moleculares por encima de 10.000 u. Es relativamente hidrófoba y aromática en la naturaleza. El grado de polimerización en la naturaleza es difícil de medir, ya que se fragmenta durante la extracción y la molécula se compone de diversos tipos de subestructuras que aparecen a repetir de una manera casual, una de sus estructuras se presenta en la Figura 2. (Chávez-Sifontes & Domine, 2013)

La principal función de la lignina en el vegetal es proporcionar soporte estructural, impermeabilidad y resistencia contra agentes microbianos y estrés oxidativo. Se trata de un heteropolímero amorfo, insoluble en agua y ópticamente inactivo. Todo ello hace de la lignina un polímero muy resistente a la degradación (Fengel & Wegener, 1984).

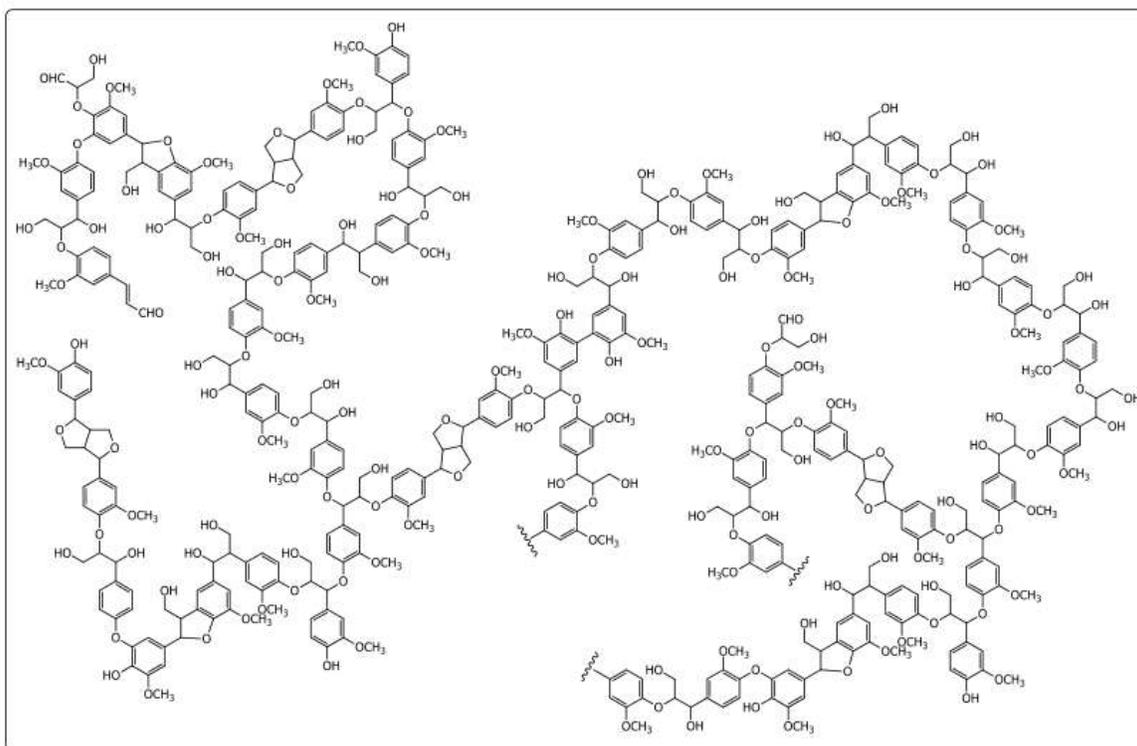


Figura 2. Modelo estructural de la lignina de madera aserrada (Chávez-Sifontes & Domine, 2013)

La lignina posee aplicaciones como dispersante de pesticidas, emulsificante y secuestrador de metales pesados. Otra posible aplicación de la lignina es como precursor en la producción de carbón activado debido a su alto contenido de carbono y estructura molecular similar al carbón bituminoso (Chávez-Sifontes & Domine, 2013).

También se puede emplear la lignina como copolimero para incorporarse en resinas tipo fenol-formaldehído, polímeros tipo poliolefinas-lignina, poliésteres-lignina, poliuretanos-lignina. En este sentido Nihat & Nilgul modificaron la composición de las resinas adicionando lignina, dando como resultado que las resinas fenol-lignina-formaldehído hasta con un 30% de sustitución de lignina se pueden utilizar con éxito como adhesivo para tableros (Nihat S & Nilgul, 2002).

Mohammed et al, trataron previamente fibras de madera de caucho con la enzima lacasa, para mejorar la superficie de la fibra y para generar una solución de lignina activa. La solución de lignina se obtuvo a partir de una reacción enzimática con 200 g de fibras y seis unidades/g de enzimas lacasa; dicha reacción se llevó a cabo en un reactor agitado a 150 rpm durante 2 h a una temperatura de 25°C. Después del tratamiento las fibras fueron separadas por filtración y la solución recogida que principalmente contiene lignina, llamada organosolv lignina (OSL), se concentró hasta que la solución había alcanzado el 3% de contenido de sólidos. Los tableros se fabricaron a partir de 10% de solución de OSL, dando lugar a tableros de densidad media con mayor resistencia mecánica (Mohammed & al, 2013)

1.4 Tableros de fibras sin aditivos

Los tableros de fibra se fabrican mediante la aplicación de presión y calor sobre partículas de madera y otros materiales lignocelulósicos en forma de partículas. En la actualidad son utilizados en la elaboración de estanterías, muebles, armarios y decoración en espacios interiores.

El uso de tableros aglomerados sin resinas sintéticas, es una opción en constante evolución debido a que estos no presentan emisiones de formaldehído como sucede con las resinas comúnmente utilizadas, lo que los convierte en tableros biodegradables y contribuyen así con la conservación del medio ambiente.

Suchsland *et al*, desarrollaron tableros en seco sin aditivos a partir de pulpa Masonite. Los investigadores evaluaron el efecto de la severidad del pretratamiento en la formación de los tableros, sugiriendo que a altas severidades se obtienen mejores propiedades debido al incremento de partículas finas en el material tratado (Suchsland, Woodson, & McMillin, 1987).

Catalina *et al*, realizaron tableros autoenlazados a partir de las fibras de la vena central de la hoja de plátano. Las variables que se analizaron fueron la temperatura, presión y tiempo de prensado, así como la humedad de la fibra en dicho proceso. Se concluyó que durante la termocompresión se degradan las hemicelulosas presentes en la fibra y se forman radicales libres que pueden generar nuevos enlaces, lo que mejora las propiedades mecánicas de los tableros (Alvarez, Capanema, Rojas, & Gañán, 2009).

En otras investigaciones también se han realizado tableros de fibras a partir de la vena central de la hoja de plátano, por ejemplo De la Cuesta *et al* evaluaron el efecto de la temperatura en el proceso de prensado de los tableros sobre las propiedades de módulo de ruptura (MOR) y módulo de elasticidad (MOE). Los resultados demostraron que a mayor temperatura de prensado, mayor degradación de las fibras y por lo tanto mejores propiedades mecánicas (De la Cuesta, Montoya, Betancourt, & Catalina, 2011).

A partir de caña flecha previamente tratada con vapor, Diosa Gallego elaboró tableros de fibras de alta densidad y calidad, concluyendo que a severidades altas y temperaturas de prensado intermedias se obtienen mejores resultados en las propiedades de MOE y MOR (Diosa Gallego, Velásquez, & Quintana, 2014).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materia prima.

Las astillas de fique se limpian para retirar impurezas y material no deseado en las mismas.

2.2 Caracterización de las astillas de fique y las pulpas tratadas.

Las astillas de fique y las pulpas tratadas son sometidas a un proceso de molienda y tamizado, garantizando un tamaño de malla -40+60, con el fin de realizar la respectiva caracterización.

La caracterización se realiza usando métodos estándar de la norma ASTM para:

- Humedad (E-871-82)
- Cenizas (D-1102-84)
- Extractivos en agua caliente (D-1110-84)
- Extractivos en etanol/tolueno (D-1107-84)
- Lignina Klason (D-1106-84, modificado)

2.2.1 Humedad

La humedad se determina para expresar los resultados en base seca del material. En una balanza de precisión se pesa en un crisol alrededor de 2 g de fibra. La muestra se lleva a una estufa a 105°C por un periodo de 4 horas. Después de este tiempo la muestra se retira del horno y se lleva a un desecador hasta que la muestra esté fría y se pesa. El procedimiento se repite hasta lograr un peso constante.

El porcentaje de humedad se calcula mediante la siguiente formula:

$$\%H = \frac{(M_2 - M_3)}{(M_2 - M_1)} * 100 \quad (2)$$

Dónde,

M₁: peso del crisol.

M₂: peso del crisol y de la muestra húmeda.

M₃: peso del crisol y de la muestra seca.

2.2.2 Cenizas

El contenido de cenizas es una medida total de la cantidad de sales minerales que hay en el material lignocelulósico. Se pesan entre 2 y 5 g de muestra de humedad conocida en crisoles de porcelana que previamente se llevaron a una mufla durante una hora a 600°C. La muestra es llevada a la mufla calentada a 600°C por un periodo de 3 horas. Posteriormente la mufla se apaga y las muestras son retiradas cuando se alcanza una temperatura de 200°C. Las muestras se enfrían en un desecador y se pesan inmediatamente.

El porcentaje de cenizas se calcula mediante la siguiente formula:

$$\%Cenizas = \frac{(M_3 - M_1)}{(M_2 - M_1) * \left(\frac{100 - \%H}{100}\right)} * 100 \quad (3)$$

Dónde,

M₁: peso del crisol.

M₂: peso del crisol y de la muestra húmeda.

M₃: peso del crisol y de las cenizas.

%H: porcentaje de humedad de la muestra.

2.2.3 Extractivos en agua caliente

Mediante la extracción con agua caliente se solubilizan las sales minerales, el almidón, las sustancias pépticas, los colorantes y algunos azúcares.

Inicialmente se determina la cantidad de material seco presente en el cartucho de extracción. El sistema de extracción soxhlet con agua se mantiene en reflujo durante un tiempo mínimo de 6 h a 100°C, durante este tiempo el líquido de extracción debe alcanzar un color transparente. Finalmente se seca el conjunto cartucho-fibra a 105°C, se enfría en un desecador y se pesa.

El contenido de extractivos acuosos con referencia al material seco original se determina según la expresión:

$$\%EA = 100 * \left(\frac{M_3 - M_2}{M_3 - M_1} \right) \quad (4)$$

Dónde,

M1: peso del cartucho soxhlet seco a 105°C.

M2: peso del sistema cartucho-muestra extraído con agua seco a 105°C.

M3: peso del sistema cartucho-muestra seco a 105°C.

2.2.4 Extractivos en etanol/tolueno.

Los extractivos orgánicos están compuestos, principalmente, por ceras, grasas, resinas, aceites y taninos.

El sistema de partida es el material libre de extractivos acuosos. Con ayuda de una mezcla de etanol y tolueno (1:2) se logran extraer los compuestos orgánicos. El sistema de extracción soxhlet se mantiene en reflujo por un tiempo mínimo de 6 horas tiempo durante el cual el líquido de extracción alcanza un color transparente. Se intenta regular la potencia del sistema de calentamiento de tal manera que la velocidad de vaciado del sifón sea de 4 a 6 veces por hora. Posteriormente se seca el cartucho con el material libre de extractivos a 80°C en una estufa de vacío.

El contenido de extractivos orgánicos se expresa con referencia al material seco original y se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\%EO = 100 * \left(\frac{M_4 - M_2}{M_3 - M_1} \right) \quad (5)$$

Dónde,

M₁ y M₃: especificados como en el caso anterior.

M₂: peso del sistema cartucho-muestra extraída con orgánicos seco a 105°C.

M₃: peso del sistema cartucho-muestra extraída con agua seco a 105°C.

2.2.5 Lignina Klason

La lignina representa aproximadamente un 30% del material lignocelulósico. Se determina y se cuantifica la lignina insoluble en medio ácido. El material libre de extractivos se somete a dos hidrólisis consecutivas, los polisacáridos se hidrolizan hasta sus monómeros constituyentes y en la solución permanece un sólido que es el que se cuantifica.

Inicialmente, en la primera hidrólisis, se tratan unos 0.3 g del sustrato lignocelulósico libre de extractivos con 3 ml de ácido sulfúrico concentrado al 72% w/w en un baño con temperatura controlada a 30°C. El sistema se agita durante una hora. En la segunda hidrólisis, se diluye el sistema anterior agregando 84 ml de agua destilada, alcanzándose una concentración de ácido del 4% w/w. El recipiente se tapa y se introduce en el autoclave, calentado previamente a 100°C, se cierra el autoclave y se deja durante media hora a 120°C. Posteriormente el recipiente se deja enfriar hasta alcanzar unos 20°C.

El sólido se filtra en papel filtro, previamente pesado. Se recoge el filtrado, el cual contiene los azúcares disueltos. El residuo de lignina se lava con agua destilada hasta que las aguas de lavado sean neutras. Se seca el sistema sólido - filtro en la estufa a 105°C hasta lograr peso constante.

El cálculo de la lignina klason referido al material original seco es el siguiente:

$$\%LK = \left(\frac{M_3 - M_2}{M_1} \right) * \left(1 - \frac{\%EO}{100} - \frac{\%EA}{100} \right) * 100 \quad (6)$$

Dónde,

%EA: porcentaje de extractivos acuosos.

%EO: porcentaje de extractivos orgánicos.

M₁: peso de la muestra seca libre de extractivos.

M₂: peso del filtro seco.

M₃: peso del sistema filtro-lignina.

2.3 Pretratamiento con vapor (*steam explosion*)

El pretratamiento con vapor a las astillas de fique se realiza en el *steam explosion*, un reactor discontinuo de 10 L de acero inoxidable el cual está unido mediante una válvula neumática de accionamiento a distancia a un recipiente de 100 L donde se despresuriza el material favoreciendo la desfibrilación del mismo y se recolecta el material tratado evitando perdidas. En la Figuras 3 se muestra un esquema y foto del reactor *steam explosion*.

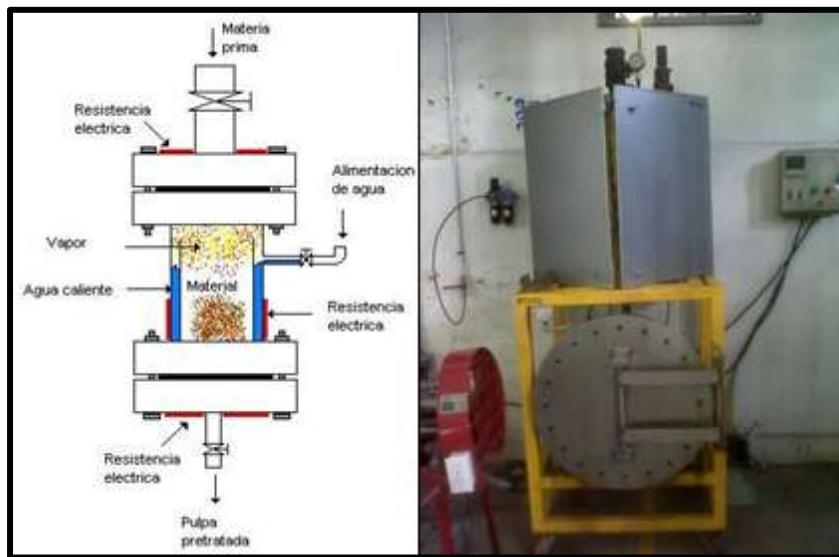


Figura 3. Reactor *steam explosion*

Para realizar el pretratamiento, se alimentan 200 g de fibras de fique (*Furcra andina*) y dos litros de agua al reactor. Aproximadamente cada 5 minutos se calcula la severidad, la cual combina la temperatura del vapor y el tiempo de residencia; dicho parámetro se calcula con la expresión de la ecuación 7:

$$Severidad = \log(R_0) \quad (7)$$

$$R_0 = \int_{t_1}^{t_2} e^{\frac{T-100}{14.75}} dt \quad (8)$$

Dónde,

T: Temperatura del pretratamiento en °C

t: tiempo del pretratamiento en min.

Después de alcanzar la severidad deseada se abre la válvula de descarga y la fibra es expulsada hacia el tanque de 100 L. La pulpa se recoge en recipientes de plástico, se filtra y se lava con agua corriente. La pulpa filtrada se ubica en bandejas y por convección natural se seca durante uno o dos días, y de esta forma se garantiza la remoción de la humedad de la pulpa

2.4 Molienda de la pulpa.

El material seco se homogeneiza en un molino de cuchillas (*Retsch SM 100*), utilizando un tamiz de 4mm. En la Figura 4 se muestra una foto del molino.



Figura 4. Molino de cuchillas Retsch.

2.5 Preparación de los tableros.

Los tableros de fibra con aproximadamente 3 mm de espesor y densidad alrededor de 1000 kg/m^3 , se preparan bajo condiciones controladas de temperatura y presión.

Para esto, el material pretratado se ubica en un molde con dimensiones de 150 mm de longitud y 50 mm de ancho. El material se prensa en caliente en una prensa hidráulica de 30 toneladas con temporizador y control de temperatura. La

temperatura de prensado se varía entre 137 y 223°C, mientras que la presión se mantiene constante en un valor de 12 MPa. El ciclo de prensado se realiza en tres etapas (Salvadó & Velásquez, 2003):

- Preprensado durante el tiempo de consigna a la presión y a la temperatura deseada.
- Tiempo de respiración durante 1 minuto.
- Prensado a la presión de consigna durante el tiempo deseado a la temperatura deseada.

A continuación en la Figura 5 se muestra una foto de la prensa hidráulica.



Figura 5. Prensa Hidráulica

2.6 Caracterización físicomecánica

La caracterización físicomecánica de los tableros, se realiza según las respectivas normas UNE EN. La resistencia mecánica se caracteriza mediante el módulo de ruptura, MOR (31094) y el módulo de elasticidad, MOE (31094) y la estabilidad dimensional se caracteriza mediante el hinchamiento en espesor, TS (31794) y la

absorción de agua, WA (31794). Adicionalmente se determina la densidad de acuerdo a la norma (32394). Para la medición de la resistencia mecánica de los tableros, se usa una maquina universal de ensayos (*HM30T-4HD*), la cual cuenta con un software de adquisición de datos. Una foto de esta prensa se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Maquina universal de ensayos.

Para la determinación de la estabilidad dimensional se cuenta con un baño térmico de agua (*DK-20*) con controlador digital de temperatura.

Las especificaciones necesarias para la determinación de las propiedades fisicomecánicas de los tableros según las normas se muestran en el anexo.

2.7 Diseño de experimentos.

Un diseño de experimentos es un modelo estadístico clásico cuyo objetivo es averiguar si unos determinados factores influyen en una variable de interés y si existe influencia de algún factor, cuantificar dicha influencia.

Para analizar la respuesta generada por cada nivel o prueba en los factores a modelar, se realizaron unos ensayos previos con un diseño factorial 2^2 más

estrella con 8 repeticiones al centro. Este diseño de experimentos consta de 16 experimentos, donde la temperatura del prensado se varió entre 137 y 223°C y la severidad del pretratamiento entre 3,5 y 4,0).

En los experimentos finales se tiene como factor la severidad del pretratamiento (3,4 - 4,0) y como variables de respuesta el módulo de elasticidad (MOE), módulo de ruptura (MOR), hinchamiento en espesor (TS) y absorción de agua (WA). Las respuestas serán analizadas en el programa *Statgraphics Plus 5.0*.

Tabla 2. Matriz del diseño de experimentos

Experimento No.	Severidad	Temperatura de prensado (°C)
1	3,8	180
2	3,5	180
3	4,0	150
4	3,8	180
5	3,8	180
6	3,8	137,574
7	3,8	180
8	3,8	222,426
9	3,8	180
10	3,6	210
11	4,0	210
12	3,6	150
13	3,8	180
14	3,8	180
15	4,0	180
16	3,8	180

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización de la materia prima.

Inicialmente las astillas de fique fueron molidas para homogenizar el material. El análisis químico del fique (*Furcraea andina*) se presenta en la Tabla 3. La caracterización refleja la cantidad de sales minerales que presenta el material, valor que se refleja en el porcentaje de cenizas. Del mismo modo se observa en el alto porcentaje de extractivos acuosos la solubilización de algunas sales y en los extractivos orgánicos la baja cantidad de grasas. La cantidad de lignina encontrada experimentalmente es semejante al reportado por Arroyave con un valor de 11,3% (Arroyave & Velásquez, 2001).

Tabla 3. Caracterización química del fique

Parámetro	% base seca
Humedad	9,36
Cenizas	11,45
Extractivos acuosos	30,96
Extractivos orgánicos	7,13
Lignina Klason	10,1
Holocelulosas	31,10

3.2 Resultados ensayos preliminares.

Para verificar la idoneidad del modelo en las propiedades mecánicas de los tableros, se utilizó la herramienta estadística de análisis de varianza simple (ANOVA); los resultados de dichas propiedades se relacionan a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de las propiedades físico-mecánicas del diseño de experimentos

Experimento	Severidad	T prensado (°C)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	%WA	%TS
1	3,8	180	829,324	7,424	93,773	123,333
2	3,5	180	1200,676	3,750	119,609	119,354
3	4,0	150	2056,530	7,338	131,402	106,896
4	3,8	180	784,829	6,178	106,409	113,333
5	3,8	180	605,687	4,707	94,384	80
6	3,8	137,574	1053,456	6,202	179,012	133,333
7	3,8	180	2187,863	10,134	80,117	70,370
8	3,8	222,426	2261,962	11,541	32,296	30,769
9	3,8	180	1228,901	5,978	130,290	63,636
10	3,6	210	535,011	5,553	93,596	55,172
11	4,0	210	1366,904	8,071	45,391	13,793
12	3,6	150	1181,534	4,479	225,337	140,625
13	3,8	180	1435,727	10,095	87,172	46,666
14	3,8	180	1236,205	7,700	118,659	96,774
15	4,0	180	1221,592	8,534	126,379	76
16	3,8	180	1288,048	8,287	110,994	83,333

Después de realizar los análisis correspondientes y observar que los valores de R^2 estaban alrededor de 83%, es decir no se evidenció un ajuste satisfactorio de los datos obtenidos al modelo predicho, fue necesario repetir la experimentación, pero esta vez analizando solamente la influencia de la severidad del pretratamiento en las propiedades físico-mecánicas. La temperatura de prensado se mantuvo en un valor constante, ya que se pudo observar que dicha propiedad no predominaba estadísticamente en las propiedades mecánicas como se puede observar en la Figura 7.

Medias y 95,0% de Fisher LSD

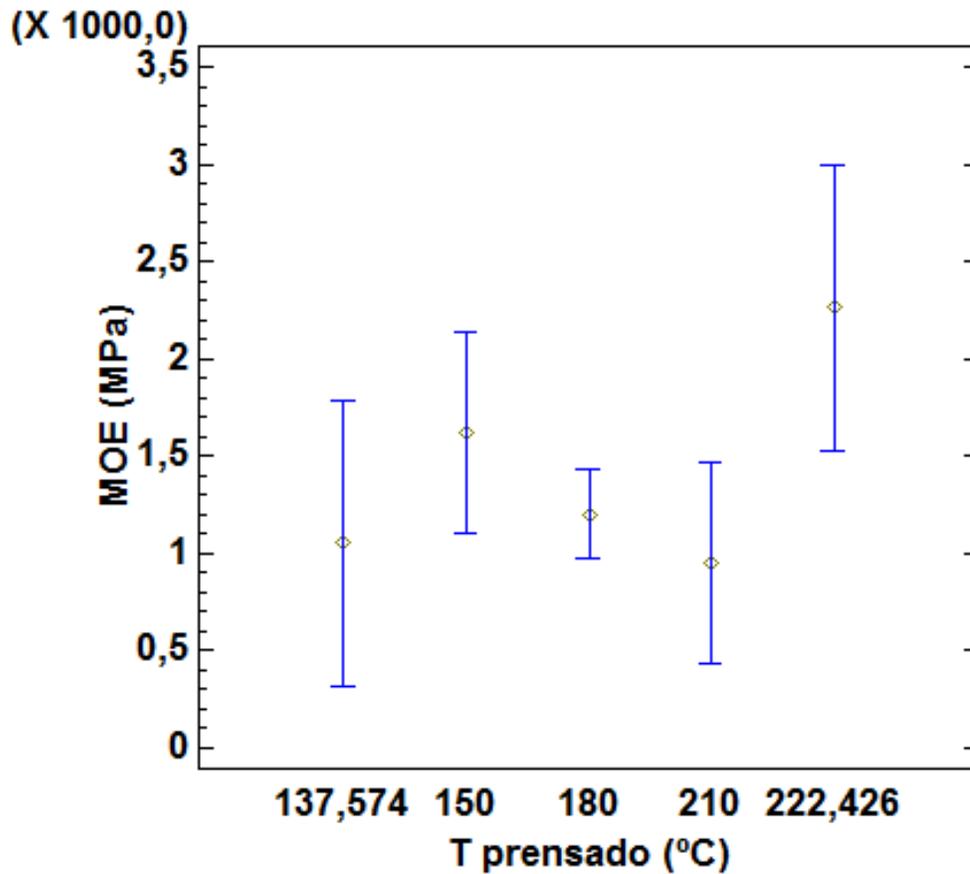


Figura 7. ANOVA para el MOE, primer diseño de experimentos.

En la Tabla 5, se presenta la matriz del nuevo diseño de experimentos realizado. Este diseño consta de 12 experimentos y como se mencionó anteriormente el proceso de prensado se llevó a cabo bajo valores constantes de temperatura y presión, siendo estas 200°C y 4,94 MPa respectivamente.

Tabla 5. Matriz del segundo diseño de experimentos

Experimento No.	Severidad
1	4,0
2	4,0
3	4,0
4	3,8
5	3,8
6	3,8
7	3,6
8	3,6
9	3,6
10	3,4
11	3,4
12	3,4

3.3 Pulpas obtenidas después del *steam explosion*.

Durante el pretratamiento con vapor gran parte de las hemicelulosas se hidrolizan generando así un cambio de color y olor en las fibras de fique, en la Figura 8 se muestra la diferencia de color del material antes y después del tratamiento. Otra de las consecuencias de usar el *steam explosion* es la plastificación de la lignina, la cual permite que durante el proceso de prensado las fibras puedan unirse sin utilizar adhesivos sintéticos (Salvadó & Velásquez, 2003)



Figura 8. Fique antes y después del *steam explosion*.

Dependiendo de la severidad requerida el material estuvo sometido a mayor o menor tiempo con el vapor generado en el reactor. A una severidad de 4, el contenido de lignina alcanza hasta un 80% más de la lignina presente inicialmente en el fique.

Por otra parte las pulpas tratadas en el *steam explosion* también fueron caracterizadas químicamente, para conocer los porcentajes de extraíbles y de lignina que se logró obtener después del pretratamiento. Dichos resultados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Caracterización química de las pulpas después del *steam explosion*

	Severidades			
	4,0	3,8	3,6	3,4
%Humedad	55,318	7,660	6,921	71,842
% Extraíbles acuosos	88,639	10,759	10,618	11,067
%Extraíbles orgánicos	16,598	16,327	13,809	16,151
%Lignina	18,187	16,174	13,797	,11,455

En la Tabla 7 se presenta la tabla ANOVA para la lignina a diferentes severidades, donde se ve la influencia de la severidad en el contenido de lignina, esto se puede decir ya que el valor menor a 0,05 de la razón P así lo indica.

Tabla 7. ANOVA para la lignina.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media de Cuadrados	Razón F	Razón P
Severidad	76,5291	3	25,5097	249,89	0,000
Error Total	0,816663	8	0,102083		
Total (Corr)	77,3458	11			

Medias y 95,0% de Fisher LSD

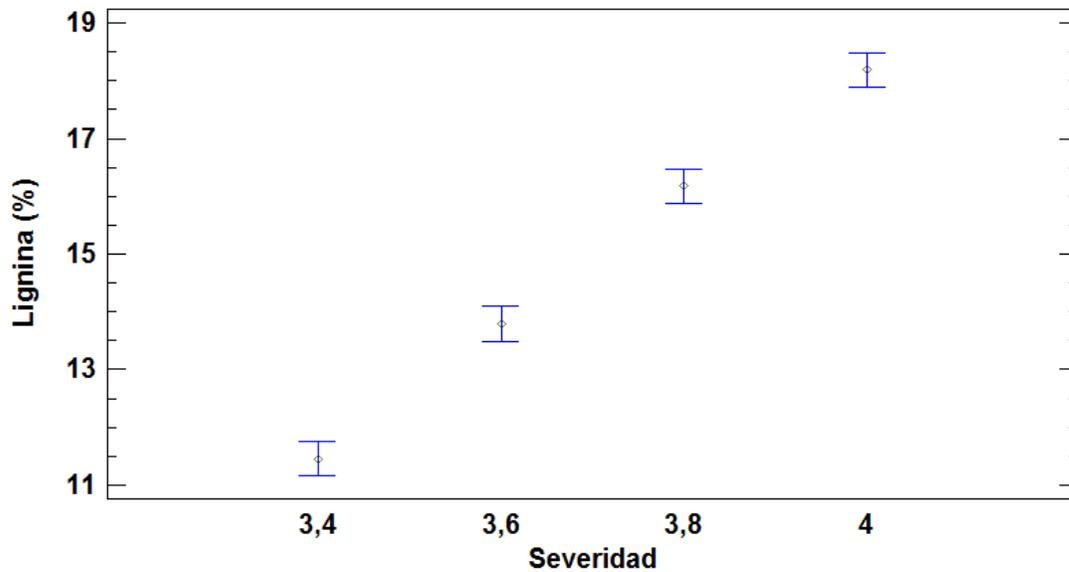


Figura 9. Media de la lignina para cada severidad.

3.4 Elaboración de los tableros.

Después de moler las pulpas y teniendo en cuenta el porcentaje de humedad del material a cada una de las severidades trabajadas, se pesó la cantidad necesaria para lograr tableros con densidades alrededor de 1000 kg/m^3 .

Los tableros elaborados a partir del diseño de experimentos al no poseer la cantidad suficiente de lignina, presentan un aspecto poco liso y oscuro a medida que aumenta la severidad, pero sin presentar burbujas como se muestra en la Figura 10.

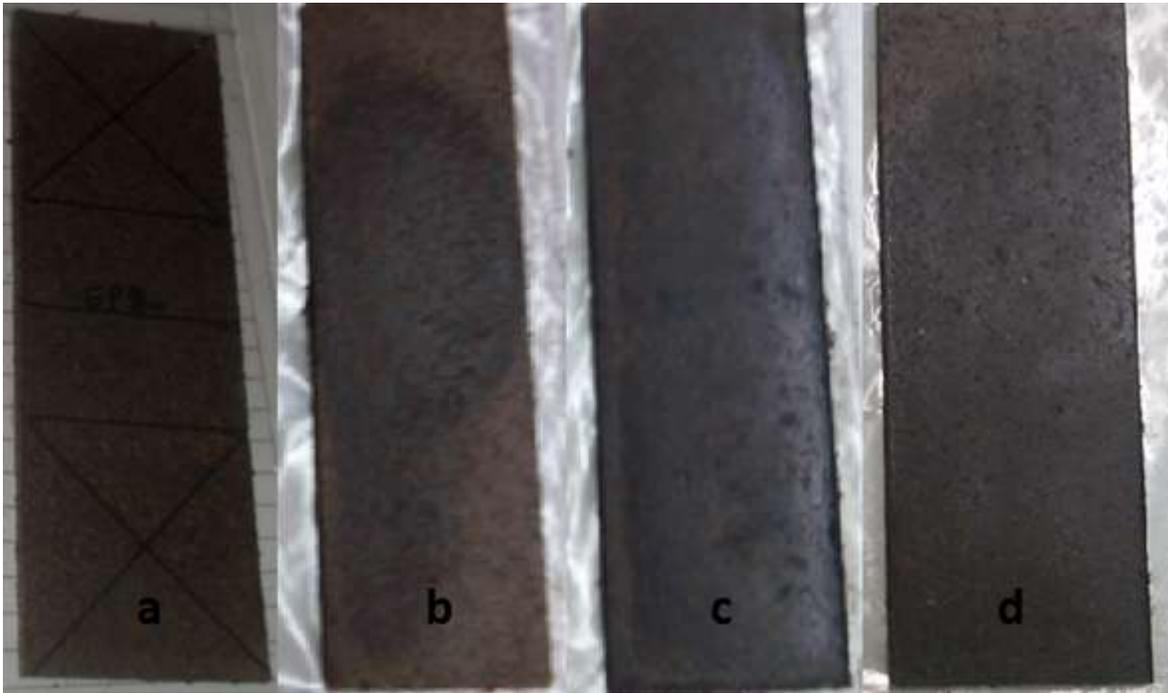


Figura 10. Tableros de fique a diferentes severidades. **a)** Se: 3,4 **b)** Se: 3,6
c) Se: 3,8 **d)** Se: 4,0

Para proceder a realizar los análisis de las propiedades mecánicas, se presenta en la Tabla 8 el resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 8. Diseño de experimentos No. 2

Experimento	Severidad	MOE (MPa)	MOR (MPa)	%WA	%TS
1	4,0	1194,682	8,298	88,359	57,446
2	4,0	2019,885	10,170	45,254	42,750
3	4,0	1309,594	7,627	45,957	41,417
4	3,8	1826,469	9,435	49,464	39,849
5	3,8	1652,450	8,753	56,705	42,435
6	3,8	1158,149	8,225	86,868	62,645
7	3,6	1091,744	8,160	55,528	41,634
8	3,6	1483,476	8,551	74,7195	48,920
9	3,6	619,873	6,389	71,0868	40,338
10	3,4	1434,559	11,359	94,6911	55,882
11	3,4	2329,128	12,315	102,123	58,333
12	3,4	1810,602	13,339	97,9816	61,338

3.5 Propiedades físicomecánicas

3.5.1 Módulo de elasticidad (MOE)

Teniendo en cuenta el ANOVA que se presenta en la Tabla 9 y el gráfico de la Figura 11, las severidades trabajadas durante la experimentación no tienen estadísticamente gran influencia en el MOE.

La importancia del pretratamiento radica en que a mayores exposiciones del material en el reactor, se logra mayor cantidad de lignina debido a la pérdida de hemicelulosas dando como resultado una redistribución de los componentes presentes en la fibra (Salvadó & Velásquez, 2003). La lignina es la responsable de permitir el enlace entre las fibras y por lo tanto el contenido significativo de ésta en la materia prima permitirá mejores módulos de elasticidad.

Por lo anterior se puede concluir que para lograr tableros de fique con mayor módulo de elasticidad, se hace necesario trabajar a severidades más altas, las cuales permitan una mayor redistribución de la lignina en las pulpas. A la hora de trabajar severidades más altas, es importante tener en cuenta la hipótesis presentada por Anglès *et al*, la cual indica que una parte de la lignina se solubilice y pueda ser encontrada en forma de extractivos orgánicos en la caracterización (Anglès, Reguant, Montané, Ferrando, Farriol, & Salvadó, 1999).

En trabajos realizados por De la Cuesta *et al* a partir de la vena central de la hoja de plátano, lograron tableros con MOE alrededor de los 2000 MPa, valor cercano al máximo obtenido en esta investigación el cual fue de 2329 MPa. Cabe anotar que según los requerimientos de las normas europeas el valor del MOE debe ser mayor a 3000 MPa, exigencias que han podido alcanzar autores como Diosa y Mancera con 3360 MPa y 4135 MPa respectivamente (Diosa Gallego, Velásquez, & Quintana, 2014), (Mancera & Mansouri, 2011).

Tabla 9. ANOVA para el MOE.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media de Cuadrados	Razón F	Razón P
Severidad	958349	3	319450	1,80	0,2245
Error Total	1,41747E6	8	177184		
Total (Corr)	2,37582E6	11			

Medias y 95,0% de Fisher LSD

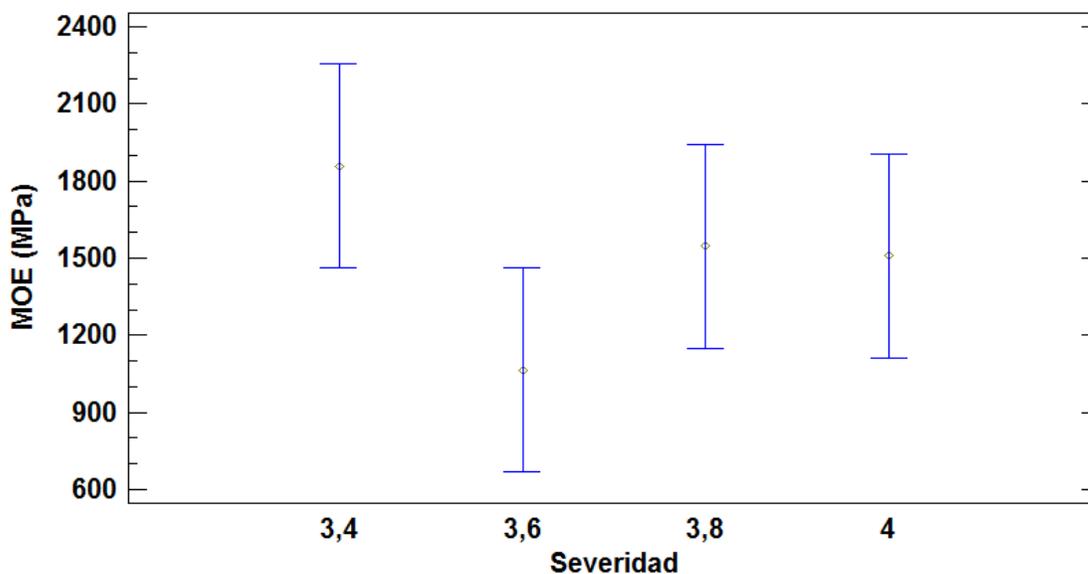


Figura 11. Media del MOE para cada severidad.

3.5.2 Módulo de ruptura (MOR)

El ANOVA para el módulo de ruptura (MOR), se enseña en la Tabla 10. El análisis arrojó que el factor de la severidad tiene influencia estadística sobre esta propiedad. Los resultados muestran que los mejores valores para el MOR se obtuvieron a severidades bajas, a pesar de que este valor es pequeño comparado con los parámetros establecidos por la norma europea.

El pretratamiento con vapor es una técnica importante que permite aumentar el contenido de lignina, pero en el caso de las fibras de fique el incremento en la lignina no es suficiente para obtener tableros con buena resistencia. Aunque a severidades más altas el contenido de lignina es mayor, también es cierto que la fibra se deteriora en mayor proporción lo que ocasiona resistencias menores.

A una severidad de 3,4 el valor máximo de MOR es de 13,34 MPa, valor más alto que 8,6 MPa el cual fue reportado por De la Cuesta *et al*, pero más bajo que el resultado obtenido por Velásquez a partir de *Miscanthus sinensis* (54 MPa), siendo este uno de los mejores resultados en cuanto a tableros autoenlazados. (De la Cuesta, Montoya, Betancourt, & Catalina, 2011), (Velásquez & Ferrando, 2003).

A partir de lo expuesto se puede concluir que una de las soluciones para obtener tableros con mejores propiedades mecánicas (MOE y MOR) es necesario añadir lignina exógena.

Tabla 10. ANOVA para el MOR.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media de Cuadrados	Razón F	Razón P
Severidad	37,0983	3	12,3661	11,21	0,0031
Error Total	8,82392	8	1,10299		
Total (Corr.)	45,9222	11			

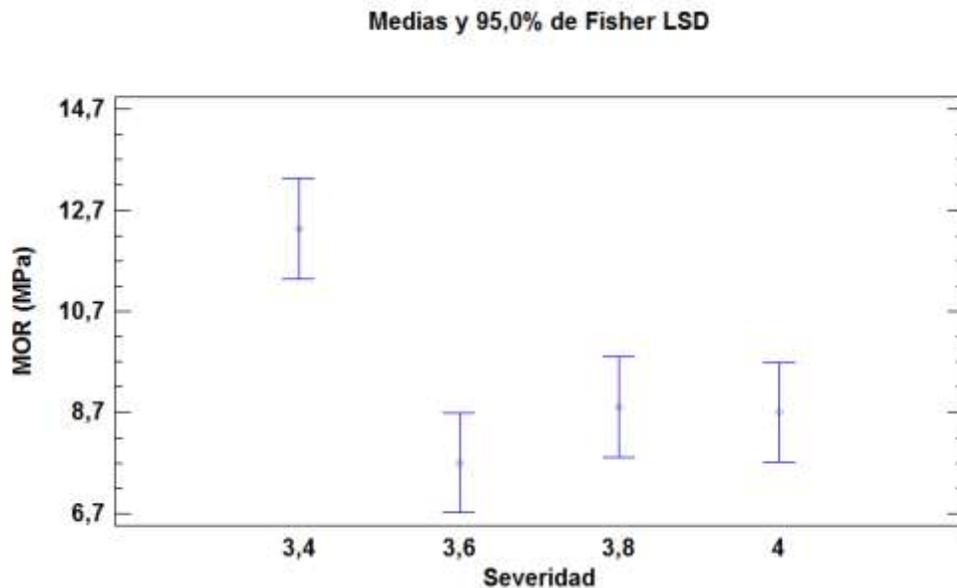


Figura 12. Media del MOR para cada severidad.

3.5.3 Absorción de agua (WA) e hinchazón en el espesor (TS)

La estabilidad dimensional de los tableros está relacionada con la absorción de agua así como el hinchamiento del espesor. En las Tablas 11 y 12 y las Figuras 13 y 14 se presentan los análisis de varianza para el WA y TS respectivamente. A partir de estos gráficos se puede observar que la severidad no es una variable significativa en estas propiedades.

En los tableros de fique elaborados, la absorción de agua y el hinchamiento en el espesor tienen un comportamiento similar, siendo los valores más bajos obtenidos 45,3% y 39,8% respectivamente. Con raquis de banano como materia prima Quintana reporto valores similares, 42,67% para WS y 33,33% para TS. (Quintana, Velásquez, Betancourt, & Gañan, 2009)

La absorción de agua en los tableros es directamente proporcional al contenido de hemicelulosas presente en las pulpas. De nuevo queda de manifiesto que el pretratamiento con vapor en las fibras de fique no es suficiente para garantizar

propiedades aceptables de los tableros, porque aunque dicho tratamiento garantiza el aumento en el contenido de lignina, no se logra remover gran cantidad de las hemicelulosas que por su carácter hidrófilo hacen inestables los tableros. En la Figura 15 se muestran las probetas después de 24 horas de inmersión en agua.

Tabla 11. ANOVA para el WS.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media de Cuadrados	Razón F	Razón P
Severidad	2874,15	3	958,049	3,44	0,0722
Error Total	2229,09	8	278,637		
Total (Corr.)	5103,24	11			

Medias y 95,0% de Fisher LSD

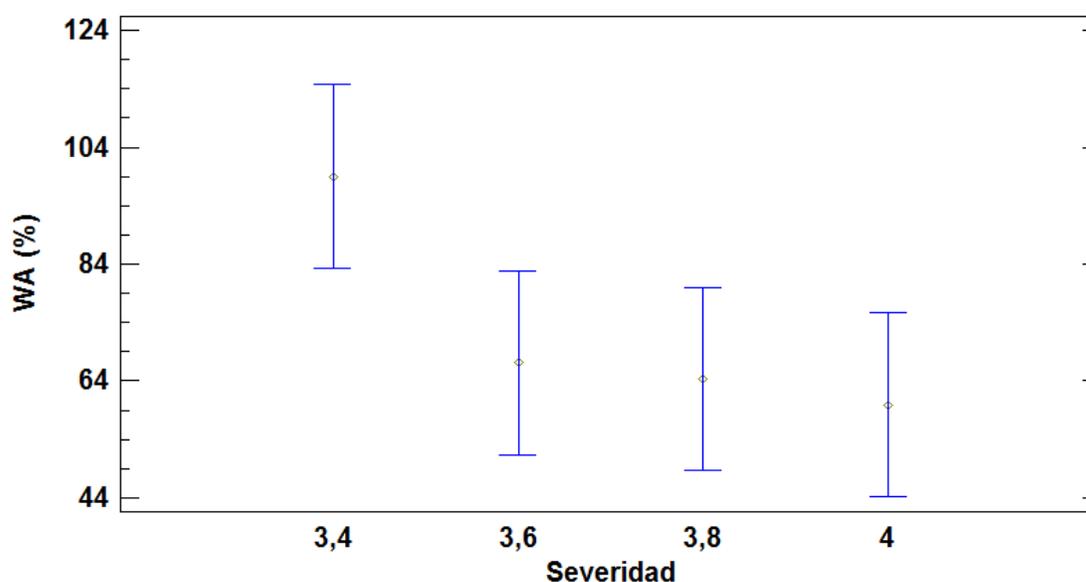


Figura 13. Media del WS para cada severidad.

Tabla 12. ANOVA para el TS.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media de Cuadrados	Razón F	Razón P
Severidad	367,722	3	122,574	1,86	0,2141
Error Total	526,207	8	65,7758		
Total (Corr.)	893,929	11			

Medias y 95,0% de Fisher LSD

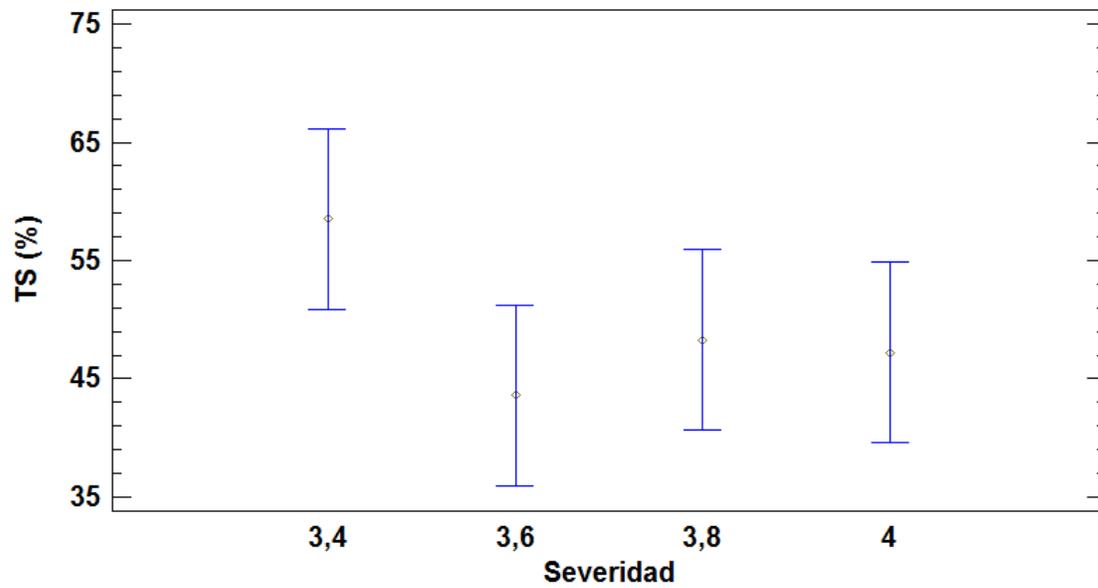


Figura 14. Media del TS para cada severidad.

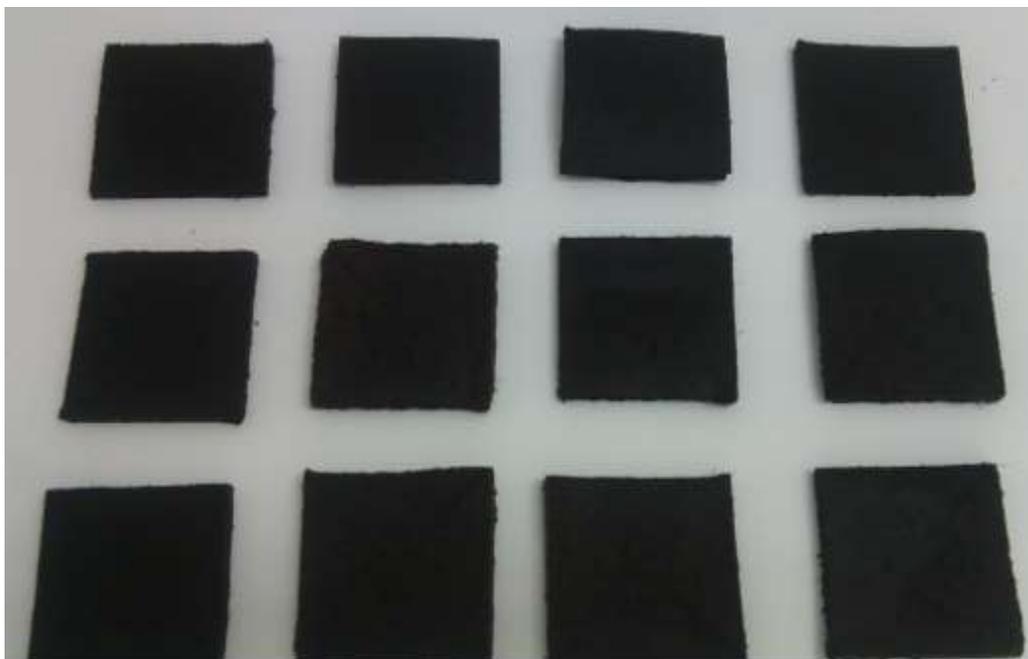


Figura 15. Probetas de la prueba de absorción de agua e hinchamiento.

4. CONCLUSIONES

Ensayos preliminares permitieron concluir que la temperatura en el proceso de prensado no es un factor influyente en la elaboración de los tableros a partir de residuos de fique.

Tratar previamente con vapor las fibras de fique, es una alternativa que permite aumentar el contenido de lignina en la materia prima, debido a la redistribución de los componente presentes en la fibra ocasionado por la pérdida de hemicelulosas. Con este tratamiento se logró obtener hasta un 80% más de lignina que la inicialmente presenta la fibra.

A severidades menores se obtuvieron mejores propiedades en las propiedades mecánicas de los tableros, con valores de 2.329 MPa para el módulo de elasticidad y 13,34 MPa para el módulo de ruptura.

A severidades muy altas se adquiere mayor contenido de lignina, pero a su vez las fibras se deterioran más ocasionando menor resistencia en los tableros.

La inestabilidad de los tableros se ve directamente afectada por el carácter hidrófilo de las hemicelulosas que aún están presentes en las pulpas, lo que ocasiona tableros con mayor absorción de agua.

5. RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones se recomienda el uso de lignina exógena durante el proceso de prensado para mejorar las propiedades mecánicas de los tableros.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez, C., Capanema, E., Rojas, O., & Gañán, P. (2009). Desarrollo de tableros aglomerados auto-enlazados a partir de fibra de la vena central de la hoja de plátano. *Prospectiva*, 69-74.
- Anglès, M., Reguant, J., Montané, D., Ferrando, F., Farriol, X., & Salvadó, J. (1999). Binderless Composites from Pretreated Residual Softwood. *Journal of Applied Polymer Science*, 2485-2491.
- Arroyave, P., & Velásquez, D. (2001). Aprovechamiento integral de *Furcraea macrophylla* Backer. *Universidad EAFIT*, 250.
- Arte y Diseño. (31 de Enero de 2012). *Tejido Texturizado*. Recuperado el 17 de Diciembre de 2014, de <https://tejidotexturizado.wordpress.com/queeslaplantadefique/>
- ASTM. Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels. Recuperado el 20 de Noviembre de 2014. <http://www.astm.org/Standards/E871.htm>.
- ASTM. Standard Test Method for Ash in Wood. Recuperado el 20 de Noviembre de 2014 <http://www.astm.org/Standards/D1102.htm>.
- ASTM. Standard Test Method for Ethanol-Toluene Solubility of Wood. Recuperado el 20 de Noviembre de 2014 <http://www.astm.org/Standards/D1107.htm>.
- ASTM. Standard Test Methods for Water Solubility of Wood. Recuperado el 20 de Noviembre de 2014 <http://www.astm.org/Standards/D1110.htm>.
- Buranov, A. U., & Mazza, G. (2008). Lignin in straw of herbaceous crops. *Industrial Crops and Products*, 237-259.

- Chávez-Sifontes, M., & Domine, M. (2013). Lignina, Estructura y Aplicaciones: Métodos de Despolimerización para la Obtención de Derivados Aromáticos de Interés Industrial. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 15-46.
- Chornet, E., & Overend, R. (1988). Phenomenological Kinetics and Reaction Engineering Aspects of Steam/Aqueous Treatments. *Proceedings of the International Workshop on Steam Explosion Techniques: Fundamentals and Industrial Applications* (págs. 21-58). Milan: Gordon and Breach Science Publishers.
- Corpoica. (2004). *Acuerdo para el fomento de la producción y competitividad del subsector del fique*. Bogotá.
- De la Cuesta, J. F., Montoya, Ú., Betancourt, S., & Catalina, A. (2011). Efecto de la temperatura de procesamiento sobre las propiedades mecánicas de tableros aglomerados sin resina sintética. *Prospectiva*, 75-80.
- Delvasto S., E. T. (2010). . An appropriate vacuum technology for manufacture of corrugated fique fiber reinforced cementitious sheets. *Construction and Building Materials* , 187-192.
- Diosa Gallego, G., Velásquez, J., & Quintana, G. (2014). Tableros sin aditivos a partir de Gynerium Sagittatum. *Investigaciones Aplicadas*, 101-112.
- Eco Diseño. (2009). *La emisión de formaldehído en los productos del sector madera-mueble*.
- F.G. Torres, M. C. (2005). Study of the interfacial properties of natural fiber reinforced polyethylene. *Polymer Testing*, 694-698.
- Fengel, D., & Wegener, G. (1984). *Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. Berlín: DE GRUYTER.
- Gañan, P., & Mondragón, I. (2002). Surface modification of fique fibers. Effect on their physico-mechanical properties. *Polymer Composites*, 383-394.

- Gañan, P., & Mondragón, I. (2005). Effect of Fiber Treatments on Mechanical Behavior of Short Fique Fiber-reinforced Polyacetal Composites. *Journal of Composite Materials* , 633-646.
- Mancera, C., & Mansouri, N. (2011). The effect of lignin as a natural adhesive on the physico-mechanical properties . *Bioresourses*, 2851-2860.
- Maranon, A., Sanabria, Y., Contreras, M. F., & Hormaza, W. (2008). Impact Performance of Natural Fique-Fiber Reinforced Composites. *ASME*, 897-898.
- Mason, W. (1927). Pulp and paper from steam exploded wood. *Paper Trade Journal* .
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (s.f.). *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*. Recuperado el 6 de Septiembre de 2013, de <http://www.minambiente.gov.co/>
- Mohammed, N., & al, e. (2013). Fabrication of Medium Density Fibreboard from Enzyme treated Rubber Wood (*Hevea brasiliensis*) Fibre and Modified Organosolv Lignin. *International Journal of Adhesion & Adhesives*.
- Negro, M. J., Manzamares, P., Oliva, J. M., Ballesteros, I., & Ballesteros, M. (2003). Changes in various physical/chemical parameters of *Pinus pinaster* wood after steam explosion pretreatment. *Biomass and Bioenergy*, 301-308.
- Nihat S, C., & Nilgul, O. (2002). Use of organosolv lignin in phenol-formaldehyde resins for particleboard production II. Particleboard production and properties. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 481-486.
- Overend, R., & Chornet, E. (1987). Fractionation of lignocellulosics by steam-aqueous pretreatments. *Philosophical Transaction of the Royal Society*, 523-536.

- Quintana, G., Velásquez, J., Betancourt, S., & Gañan, P. (2009). Binderless fiberboard from steam exploded banana bunch. *Industrial Crops and Products*, 60-66.
- Romildo D Tolêdo Filhoa, K. G. (2003). Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability. *Cement and Concrete Composites*, 185-196.
- Salvadó, J., & Velásquez, J. (2003). Binderless fiberboard from steam exploded *Miscanthus sinensis*: optimization pressing and pretreatment conditions. *Wood Science and Technology*, 269-278.
- SENA - SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE. (2006). *Estudio de caracterización ocupacional del sector fiquero de Colombia*. San Juan de Pasto.
- Suchsland, O., Woodson, G. E., & McMillin, C. W. (1987). Effect on cooking conditions on fiber bonding in dry-formed binderless hardboard. *Forest Products Journal*, 65-69.
- Tanahashi, M., Takada, S., Aoki, T., Goto, T., Higuchi, T., & Hanai, S. (1983). Characterization of Explosion Wood: Structure and Physical Properties. *Wood Research*, 36-51.
- UNE EN. Norma para la determinación de la hinchazón en el espesor de tableros de prensado plano EN 317. 1993. Norma.
- UNE EN. Norma para la determinación del módulo de elasticidad aparente en flexión de cara y la resistencia a flexión de los tableros derivados de la madera con espesor > 3mm EN 310. 1993. Norma.
- UNE EN. Norma para la determinación de la densidad de las probetas de los tableros derivados de madera EN 323. 1995. Norma.

Vallejos Calzada, S. (2010). *Estudio de la reducción de emisión de formaldehído en las resinas de urea formaldehído*. Burgos.

Vélasquez, J. (2002). *Producción de tableros de fibras a partir de Miscanthus* . Tarragona.

Velásquez, J., & Ferrando, F. (2003). Effects of kraft lignin addition in the production of binderless fiberboard from steam exploded *Miscanthus sinensis*. *Industrial Crops and Products*, 17-23.

ANEXOS

ANEXO A. Norma UNE 31794

El principio del método se fundamenta en la determinación de la absorción de agua calculando el aumento en la masa y el hinchamiento en espesor de las probetas después de la inmersión total en agua durante 24 h ± 15 min. Se ha empleado la norma UNE 31794.

Las probetas son cuadradas de 50 mm de lado. Estas se pesan con una precisión de 0,01 g. seguidamente, se mide el grueso en el centro de la probeta con una aproximación de 0,01 mm. Luego se colocan las probetas verticalmente y separadas unas de otras en un recipiente que contiene agua destilada con un pH neutro y una temperatura de 20°C. Los tableros han de estar sumergidos unos 20 mm por debajo de la superficie del agua durante 24 h ± 15 min.

Se sacan las probetas del agua y se colocan horizontalmente sobre hojas de celulosa de tal manera que se les retire el agua en exceso. Durante los 10 minutos siguientes, se pesan las probetas y se les mide el espesor como al comienzo.

- El porcentaje de absorción de agua se calcula con la siguiente fórmula:

$$\%WA = \frac{M_1 - M_0}{M_0} * 100$$

Dónde,

M₁: Peso después de inmersión en agua.

M₀: Peso inicial de la probeta.

- El porcentaje de hinchamiento en espesor se calcula mediante esta fórmula:

$$\%TS = \frac{L_1 - L_0}{L_0} * 100$$

Dónde,

L₁: Espesor después de inmersión en agua

L₀: Espesor inicial de la probeta

ANEXO B. Propiedades mecánicas de los tableros. MOR y MOE

La determinación del módulo de ruptura y del módulo de elasticidad se realiza mediante un ensayo de flexo-tracción siguiendo las normas UNE EN 31094 y EN 323 para tableros de fibras, donde se aplica una carga en el centro de una probeta rectangular que está apoyada en sus extremos.

El módulo de elasticidad se calcula utilizando la secante de la curva carga de deformación en el primer tercio, ya que dentro de esta zona los tableros tienen un comportamiento lineal. El valor calculado se denomina módulo aparente, ya que este método de ensayo incluye tanto la influencia del esfuerzo cortante como la flexión y no se cumplen estrictamente las hipótesis anunciadas anteriormente. La tensión de ruptura se ve afectada por las mismas limitaciones, especialmente por la falta de linealidad que se observa en la parte final del ensayo.

La determinación del módulo de elasticidad y la tensión de ruptura se realiza a través de la teoría elemental de vigas. El dispositivo de ensayo consta de un soporte con dos cilindros paralelos que hacen de punto de apoyo, los cuales tienen una longitud superior al ancho de las probetas y un diámetro de $15\pm 0,5$ mm; la distancia entre los dos puntos de apoyo se puede ajustar dependiendo de las dimensiones de la probeta. El dispositivo de ensayo consta de un cabezal de carga cilíndrico con la misma longitud que los puntos de apoyo y con un diámetro de $15\pm 0,5$ mm el cual está colocado paralelamente y equidistante de éstos.

Los instrumentos utilizados en la medida de las deformaciones que se producen en la mitad de la probeta tienen una precisión de 0.1 mm y el sistema de medida de la carga aplicada en las probetas proporciona una precisión de 1% del valor medido.

Las probetas son rectangulares de 50 mm x 150 mm, acondicionadas según requiere la norma. Antes de realizar la prueba se miden el ancho y el espesor de

la probeta, con este último se determina la distancia entre los dos puntos de apoyo la cual será 20 veces el espesor nominal del tablero ± 1 mm. Las probetas se apoyan con su eje longitudinal perpendicular a los ejes de los cilindros de apoyo. La carga se aplica en el centro de la probeta. La velocidad de deformación ha de ser constante durante la realización del ensayo y se debe alcanzar la carga máxima en 60 ± 30 s.

Se mide la deformación en el centro de la probeta, concretamente sobre el cabezal de carga, con una precisión de 0.1 mm y se registran los valores correspondientes a la deformación y la carga en el 10% y el 40% de la carga máxima. También se registra la carga máxima.

- El módulo de elasticidad (MOE) en MPa se calcula de acuerdo con la siguiente expresión:

$$MOE = \frac{[l_1^3(F_2 - F_1)]}{[4bt^3(a_2 - a_1)]}$$

Dónde,

l_1 : Distancia entre los ejes de apoyo, en mm

b: Anchura de la probeta, en mm

t: Espesor de la probeta, en mm

F_2 : 40% de la carga máxima, en N

F_1 : 10% de la carga máxima, en N

a_2 : Deformación obtenida a F_2 , en mm

a_1 : Deformación obtenida a F_1 , en mm

- La resistencia a la flexión (MOR) en MPa de cada probeta se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$MOR = \frac{3(F_{max}l_1)}{2bt^2}$$

Dónde,

F_{max} : Carga máxima, en N

l_1 , b, t igual que en la formula anterior