

TABLEROS SIN ADITIVOS A PARTIR DE *GYNERIUM SAGITTATUM*

Giovanna Diossa Gallego*, Jorge Alberto Velásquez Jiménez*[†], Germán Camilo Quintana Marín*

*Facultad de Ingeniería Química, Grupo Pulpa y Papel, Universidad Pontificia Bolivariana, Cq. 1 #70-01, of. 11-259, Medellín, Colombia.

Recibido 30 Enero 2014; aceptado 03 Octubre 2014
Disponible en línea: 19 Diciembre 2014

Resumen: Se fabricaron tableros aglomerados sin aditivos a partir de *Gynerium sagittatum* pretratada con vapor. Se empleó un diseño de experimentos $2^2 +$ estrella con 8 repeticiones para modelar el efecto de la temperatura de prensado (Tp) entre 137 - 223°C y la severidad del pretratamiento (Se) entre 3,15 - 4,84 sobre las propiedades: módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidad (MOE) e hinchamiento en espesor (TS). A partir del modelo obtenido se determinaron los valores óptimos de los factores Se 4,11 y Tp 217°C que reportaron un MOE de 5612 MPa, un MOR de 34,2 MPa y un TS de 7,76%. Se obtuvieron tableros aglomerados de alta densidad y calidad a partir de *Gynerium sagittatum* mediante tratamiento con *steam explosion*, superando los valores mínimos exigidos por las normas europeas y españolas.

Palabras clave: Tableros de fibras sin adhesivos sintéticos, *Gynerium Sagittatum*, Lignina, Steam Explosion.

BINDERLESS FIBERBOARDS FROM *GYNERIUM SAGITTATUM*

Abstract: Binderless fiberboards were manufactured from steam exploded *Gynerium sagittatum*. An experimental design $2^2 +$ star with 8 replicates was used for modeling the effect of the pressing temperature (Tp) between 137-223°C and the severity of pretreatment (Se) between 3,15 to 4,84 on the properties: modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE) and thickness swelling (TS). From the model obtained the optimal values of the factors were Se 4,11 and Tp 217 °C reported an MOE of 5612 MPa, a MOR 34,2 MPa and 7,76% TS were determined. Binderless fiberboards of high density and quality were obtained from *Gynerium sagittatum* by treatment with *steam explosion*, beyond the minimum values required by Spanish and European standards.

Keywords: Binderless Fiberboards, *Gynerium Sagittatum*, Lignin, Steam Explosion.

1. INTRODUCCIÓN

Los tableros aglomerados de fibras son un material de uso decorativo y estructural, están formados homogéneamente por fibras lignocelulósicas en

combinación con resinas sintéticas o adhesivos aglomerantes combinados con calor y presión. Estos hacen parte de los productos forestales de valor agregado elaborados industrialmente.

[†] Autor al que se le dirige la correspondencia:
Tel. (+574) 4488388 ext 1422, fax 4118779.
E-mail: jorge.velasquezj@upb.edu.co (Jorge Alberto Velásquez Jiménez)

Sus usos son diversos lo cual hace que su demanda en el mercado internacional esté siempre en alza, como indica la FAO la cual reportó un aumento de aproximadamente 44% en la producción de estos entre el 2008 y el 2012 donde esta producción llegó a 103.462.084 m³ (FAO, 2012a) para suplir la demanda mundial.

Colombia reportó una disminución del 32% (FAO, 2012b) en la cantidad de tableros importados entre el 2008 y el 2012, lo cual indica una activación importante del sector en Colombia para suplir la demanda interna de estos productos.

Los tableros de fibras comerciales son unidos con adhesivos de urea formaldehído, resinas fenólicas y epóxicas, siendo estos compuestos contaminantes que están regidos por estrictas legislaciones debido a sus emisiones tóxicas al medio ambiente y a la salud (Hashim & Hamid, 2009). Al emplear material lignocelulósico pretratado que no necesita aglutinantes sintéticos para su formación se estaría contribuyendo a solucionar este problema ambiental, disminuyendo los procesos de contaminación para obtener un producto industrialmente sostenible.

Por lo anterior es ingente la necesidad de procurar nuevas alternativas del uso de nuevas materias primas lignocelulósicas y pretratamientos, a fin de disminuir continuas y grandes presiones industriales sobre el bosque natural y plantaciones forestales.

Algunos residuos lignocelulósicos que se han probado en la fabricación de tableros aglomerados sin adhesivos sintéticos son la palma de aceite (Hashim, 2011), la pulpa *Mansonite* de coníferas (Suchsland & Woodson, 1983; Suchsland & Woodson, 1985; Suchsland & Woodson, 1987), bagazo de caña (Mobarak & Fahmy, 2009) entre otros residuos. Obteniendo tableros sin adhesivos de buenas características.

El pretratamiento con *steam explosion* ha sido utilizado para modificar estructuralmente los materiales lignocelulósicos (Wolfgang, 2013). Un ejemplo de este pretratamiento son los estudios de Velásquez quien fabricó tableros aglomerados sin adhesivos a partir de *Miscanthus sinensis* pretratado con *steam explosion*. Obteniendo tableros dimensionalmente estables y unidos por la propia lignina del material (Salvadó & Velásquez, 2003; Velásquez & Ferrando, 2003).

Este trabajo explora la idoneidad del *Gynerium sagittatum* cultivo nativo de Colombia también conocido como caña flecha o brava como materia prima para la fabricación de tableros de fibras pretratadas sin adhesivos sintéticos, así como la determinación de las condiciones de pretratamiento con vapor y temperatura de prensado adecuadas para obtener un tablero de calidad. Este cultivo es energético y de gran capacidad para su explotación a nivel industrial ya que presenta un rendimiento anual de 110 Ton/Hect-año (Caña brava, 2010) además de necesitar menos área de cultivo y tiempo.

Los tableros de fibras a base de *Gynerium sagittatum* se convierten en una propuesta innovadora en el aporte de soluciones tecnológicas que ayudan a dinamizar y contextualizar aún más la industria forestal de los tableros a las exigencias de los tiempos actuales y futuros.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materia prima

El *Gynerium sagittatum* provino de cultivos de Titiribí (Antioquia). Para los ensayos el tiempo de maduración de la planta no fue un factor a considerar. La materia prima se limpia quitando las hojas y corteza externa para dejar la vaina de la caña. Estas se cortan en astillas de aproximadamente 5 cm. Posteriormente el material se extiende y se deja secar al ambiente por 24 hr.

2.2. Caracterización del material lignocelulósico (*gynerium sagittatum* y pulpas pretratadas)

La caracterización se realiza para el material seco, molido y tamizado, garantizando un tamaño de partículas menor a 0.425mm y mayor a 0.250mm para cumplir con las normas estándar ASTM.

Se siguieron las normas estándar ASTM para caracterizar el material determinando: humedad ASTM E-871-82, Cenizas ASTM D 1102-84, extractivos orgánicos ASTM D1107-84, extractivos acuosos ASTM D1110-84 y material insoluble en ácido ASTM D1106-84.

Las holocelulosas se determinan por diferencia porcentual de la caracterización del material lignocelulósico siguiendo la ecuación 1.

$$\% \text{Holocelulosa} = 100 - \% \text{EO} - \% \text{EA} - \% \text{LK}, \quad (1)$$

Donde %EO, %EA y %LK representan respectivamente el porcentaje de extractivos orgánicos, el porcentaje de extractivos acuosos y el porcentaje de lignina Klason de la muestra.

Las pentosanas contenidas en los materiales lignocelulósicos indican la relación o pérdidas de hemicelulosas que este presenta, representadas en el contenido de xilosas. Para cuantificarlas se utilizó la norma TAPPI *Pentosans in Wood and pulp* T223 cm-01.

El contenido de celulosas de las muestras lignocelulósicas se determinó por diferencia porcentual entre las holocelulosas y las pentosanas cuantificadas anteriormente.

2.3. Pretratamiento con vapor (*steam explosion*)

El reactor discontinuo donde tiene lugar el pretratamiento con vapor, fue diseñado y construido por el Grupo Pulpa y Papel de la UPB, para autogenerar el vapor requerido durante el pretratamiento.

El tanque superior es un reactor cilíndrico de 10 L de acero inoxidable con aislamiento térmico en el cual se realiza la autohidrólisis del material lignocelulósico, unido mediante una electroválvula de accionamiento a distancia a un recipiente de 100 litros de acero inoxidable ubicado en la parte inferior, en éste se realiza la expansión súbita y recolecta del material pretratado minimizando las pérdidas de materia (Quintana, 2006).

Para el pretratamiento de *Gynerium sagittatum* mediante *steam explosion* se realizó el siguiente procedimiento:

- El reactor *steam explosion* se alimenta con el material lignocelulósico (astillas de *Gynerium sagittatum*).
- Se adiciona al equipo la cantidad de agua necesaria para el pretratamiento.
- Se calcula la severidad (Se) cada 5 min mediante la Ecuación 2 (Overend & Chornet, 1987), la cual se integra en el tiempo con el método numérico del trapecio, hasta obtener la severidad deseada.

$$Se = \log \left(\int \exp^{(T_{exp} - (100/14.75))} . dt \right), \quad (2)$$

Donde T_{exp} es la temperatura experimental en °C y t es el tiempo en min.

- Se abre la válvula de descarga, la fibra explota debido a la diferencia de presiones y el vapor en expansión la expulsa hacia fuera. Esta pulpa es recogida, filtrada y lavada con abundante agua, para posteriormente ser secada al ambiente.

- Luego del pretratamiento en el *steam explosion* se determina la humedad a cada muestra pretratada, con el fin de tener en cuenta el contenido de fibra en base seca.

2.4. Molienda de pulpa

La pulpa seca al ambiente pretratada con vapor es molida hasta pasar por malla de 4 mm en un molino de cuchillas. Este procedimiento se realizó para incrementar el área superficial así como el área de contacto entre las fibras como sugiere Velásquez (Velásquez, et al., 2002).

2.5. Preparación de los tableros

El material pretratado con *steam explosion* molido, se seca al ambiente hasta humedades alrededor de 7%. Los tableros de prueba fueron prensados usando una caja de formación de 150 mm de longitud y 50 mm de ancho. Se pesa la cantidad necesaria de pulpa molida para garantizar densidades de 110 kg /m³ y espesor de 3.0 mm.

Se utiliza una prensa hidráulica de 30 toneladas con temporizador y control de temperatura la cual se precalienta antes de formar los tableros. Las temperaturas de prensado se varían entre 135 a 230 °C, el tiempo de prensado es de 2 min y la presión de prensado se mantiene constante en 12MPa.

Todos los tableros son prensados siguiendo el método de prensado de 3 etapas descrito por Velásquez (Velásquez, 2002):

- 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.

2.6. Caracterización físico mecánica

Los tableros son caracterizados utilizando las respectivas normas estándar españolas y europeas (UNE-EN): para el espesor (TS) y la absorción de agua (WA) EN 317, para el módulo de elasticidad (MOE) y módulo de ruptura (MOR) EN 310 y para la densidad EN 323.

De acuerdo a las normas europeas los requerimientos estándar para estas propiedades son: densidad $> 800\text{kg/m}^3$, MOR $\geq 40\text{MPa}$, MOE $\geq 3000\text{MPa}$, WA $\leq 30\%$ y TS $\leq 20\%$.

2.7. Diseño de experimentos

En este estudio se utiliza un diseño de experimentos con superficie de respuesta 2^2 más estrella con 8 repeticiones al centro, el cual arroja un diseño de 16 ensayos de un mismo bloque los cuales se muestran en la [Tabla 2](#).

Los factores fueron la temperatura de prensado (Tp) y la severidad del pretratamiento (Se) y las variables de respuesta el módulo de elasticidad (MOE), módulo de ruptura (MOR) y el hinchamiento en espesor (TS).

El orden de los experimentos será completamente aleatorizado para disminuir los errores no controlables. Las respuestas fueron analizadas en el programa *STATGRAPHICS Centurion XV*.

Después de evaluar las respuestas de los modelos frente a los factores y sus variables de respuesta se propuso una optimización de múltiple respuesta utilizando el programa *STATGRAPHICS Centurion XV*.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización de la materia prima:(*gynerium sagittatum*)

Los resultados de la caracterización química de *Gynerium sagittatum* se muestran en la [Tabla 1](#) donde se puede resaltar el bajo contenido de constituyentes inorgánicos sólidos de esta representados en las cenizas totales.

Es importante resaltar el contenido de celulosa obtenido ya que este es junto con el material insoluble en ácido (lignina) los principales

compuestos para la elaboración de tableros aglomerados.

El valor de lignina determinado experimentalmente para el *Gynerium sagittatum* se confirma con el valor reportado por Niño ([Niño Lozano, 2011](#)). El *gynerium sagittatum* posee porcentajes de estos compuestos superiores al 20% lo cual lo hace una materia óptima para la elaboración de tableros aglomerados sin adhesivos.

3.2. Obtención de pulpas

Las pulpas pretratadas con *steam explosion* a diferentes severidades se muestran en la [Fig.1](#) donde se evidencia el cambio de color y estructura de las pulpas debido a la pérdida de hemicelulosas por la autohidrólisis de los enlaces glicosídicos presentes por los ácidos acético y fórmico liberados ([Quintana, 2006](#)).

El contenido de celulosa presente se hidroliza en menor extensión y necesita condiciones más severas ([Sun, 2005](#)). El contenido de lignina porcentual de las pulpas aumenta con una mayor severidad además de producir una serie de compuestos fenólicos y subproductos de condensación que la hacen apta para su uso en la fabricación de tableros al fluir y plastificarse entre las fibras en el proceso de prensado ([Velásquez, et al., 2002](#)).

Tabla 1. Caracterización química de *gynerium sagittatum*

Prueba	% base seca
Humedad	8,88 ± 0,09
Cenizas totales	2,18 ± 0,16
Extraíbles Orgánicos	7,06 ± 0,22
Extraíbles Acuosa	5,66 ± 0,68
Lignina Klason	24,18 ± 1,08
Holocelulosa	63,10 ± 1,98
Pentosanas	24,16 ± 0,19
Celulosa	38,95 ± 0,19

Es importante resaltar la efectividad del pretratamiento en el material lignocelulósico del *gynerium sagittatum* como se evidencia en la [Fig.1](#)

Ya que es este el que le da las propiedades adecuadas para producir tableros de buena calidad sin la necesidad de utilizar aglomerantes o resinas.



Fig. 1. Efecto del pretratamiento *steam explosion* a diferentes severidades. a) *Gynerium sagittatum*. b) Se 3,15. c) Se 3,4. d) Se 4. e) Se 4,6. f) Se 4,8.

3.3. Elaboración de los tableros

Se evaluaron solo tableros de pulpas de *Gynerium sagittatum* tratada con *steam explosion* para encontrar un óptimo mejorando las variables de respuesta. Se procede de esta manera teniendo como precedente la efectividad de este pretratamiento en la modificación de materiales lignocelulósicos para la fabricación de tableros de fibras aglomerados ([Anglès & Reguant, 1999](#); [Quintana, et al., 2009](#); [Velásquez & Ferrando, 2003](#)).

Ya que el efecto del *steam explosion* disminuye el contenido de hemicelulosas y aumenta el contenido porcentual de lignina en las pulpas lo cual lo hace apto para la formación ([Anglés & Ferrando, 2001](#)). Estos estudios respaldan la necesidad del pretratamiento y la viabilidad de la materia prima para la elaboración de tableros aglomerados.

El resultado del diseño de experimentos para las propiedades físico-mecánicas se muestra en la Tabla 2. Para cada variable de respuesta (MOE; MOR y TS) se llevó a cabo un análisis de varianza donde todas las hipótesis se llevaron a cabo con un nivel de confianza del 95%.

Es importante resaltar que todos los tableros de fibras presentaron densidades mayores a 900kg/m³ por lo cual están clasificados como tableros de fibras de alta densidad (HDF) y dentro de este

grupo serán comparados con los valores estándar para las propiedades físico-mecánicas.

En la [Tabla 2](#) hay algunos datos de respuesta de las propiedades que se excluyeron para obtener mejores correlaciones en su modelación. Estos puntos corresponden a repeticiones del punto central lo cual no afecta los extremos o valores puntuales decisivos evaluados en el diseño del experimento, garantizando su veracidad.

En la [Fig. 2](#) se muestra las probetas o tableros formados con pulpas de *Gynerium sagittatum* pretratados a diferentes severidades, evidenciándose que con pulpas de mayor severidad da como resultado un tablero con mejor acabado liso y sin imperfecciones señal de que la lignina presente en el material se distribuyó uniformemente entre las fibras y plastifico con el calor generando una capa repelente en el tablero como también reporta Castro en su trabajo (Castro & Henao, 2009).

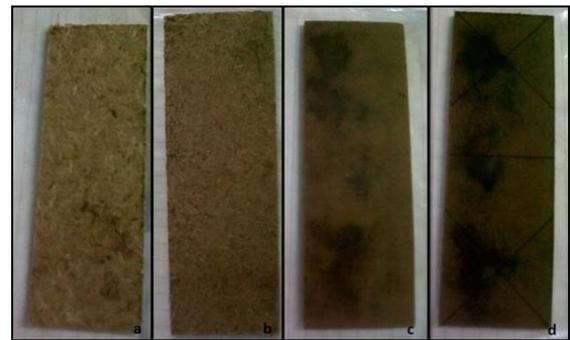


Fig. 2. tableros de *Gynerium sagittatum* pretratado a diferentes severidades a) SE 3,15. b) SE 3,4. c) SE 4. d) 4,6.

3.4. Resultado de propiedades físico-mecánica.

3.4.1. Análisis para el módulo de elasticidad (MOE)

El análisis de varianza para el MOE muestra que solo 1 factor tiene influencia estadísticamente significativamente sobre la variable y es la severidad como se evidencia en el diagrama de Pareto de la [Fig. 3](#). Además se concluye que no se presentaron interacciones con los demás factores estudiados.

Se encontró que el factor de la temperatura de prensado no es influyente, esto es evidencia de que

a cualquier temperatura analizada dentro de la región es suficiente para activar la lignina presente en el material lignocelulósico. La lignina es la que actúa como adhesivo entre las fibras ya que se distribuye entre estas debido al efecto del calor y de la presión que se le ejerza en la formación del tablero en donde se plastifica y activa su efecto enlazante (Velásquez & Ferrando, 2003).

La severidad tiene un efecto positivo sobre la propiedad mecánica MOE como se muestra en la gráfica de efectos principales de la Fig. 3. Para la temperatura de prensado se determina que su cambio no es significativo en el aumento del MOE ya que se corresponde con la magnitud del error experimental determinado en el punto central.

Tabla 2. Resultado de diseño de experimentos propiedades físico-mecánicas

Exp.	Se	T p (°C)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	%TS
1	3,4	150	462,43	3,21	227,5
2	4,6	150	3078,78	26,99	46,7
3	4	180	3372,33	46,59	33,3
4	4	137,57	2687,78	23,99	101,7
5	4	180	2158,23	30,01	25
6	4	180	3982,43	40,26	31
7	3,4	210	1294,56	9,50	71,9
8	4	222,42	3360,84	36,90	15,3
9	4	180	2615,52	35,12	36,7
10	3,15	180	508,45	3,01	133,3
11	4	180	2878,59	34,78	37,9
12	4,6	210	2727,33	25,99	16,7
13	4	180	3506,57	46,47	18,2
14	4	180	2723,75	30,09	36,4
15	4	180	2863,44	38,14	25
16	4,84	180	1806,28	11,68	12,5

Se observa que hay un valor máximo para el valor del MOE en relación con la severidad del pretratamiento con *steam explosion*. Confirmando que a severidades menores es menor esta

propiedad y a mayores más alta; esto se explica gracias al contenido de lignina porcentual presente en las pulpas las cual se plastifica en la formación generando mayores puntos de contacto lo que se traduce en mayor rigidez para el tablero.

El valor máximo de MOE alcanzado es superior a los 3000 MPa que es el valor que exigen las normas europeas como parámetro de calidad en sus productos confirmando las buenas características de los tableros de *gynerium sagittatum* para suplir los tableros comerciales estándar. Comparando con otros trabajos realizados previamente esta propiedad está en el mismo rango de magnitud. Autores como Quintana (Quintana, et al., 2009) con vástagos de *Musacea* (banano) y Anglés con *abies alba-pinus insignis* (madera suave) (Anglés & Ferrando, 2001) reportan valores de 3064 y 3900 MPa para esta propiedad para sus tableros aglomerados pretratados con vapor.

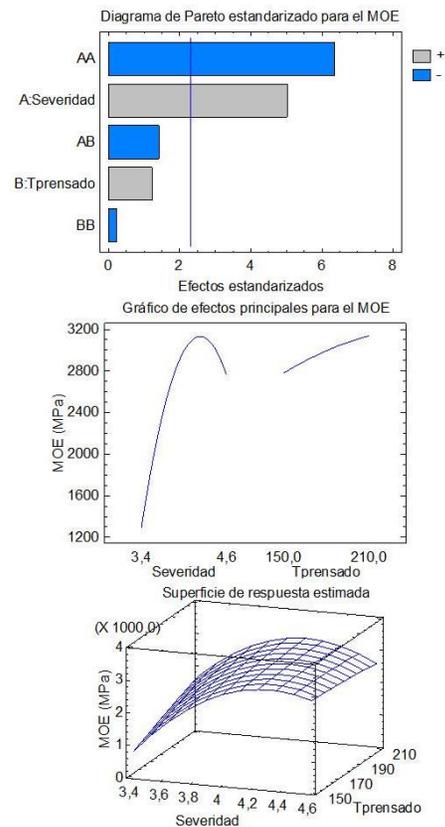


Fig. 3. Gráficos para el análisis del MOE.

Por otra parte los trabajos de Mancera (Mancera & Mansouri, 2011) con racimos de *vitis vinifera* y Velásquez (Velásquez & Ferrando, 2003) con *miscanthus sinensis* reportaron valores superiores para el MOE de 4135 y 6590 MPa respectivamente

siendo el último uno de los trabajos en tableros aglomerados sin aditivos con mejores resultados en propiedades mecánicas.

En la [Fig. 3](#) se evidencia el gráfico superficie de respuesta estimada el cual presenta la formación de un máximo lo cual confirma que la región de exploración fue bien elegida.

El ajuste de los parámetros del modelo generado con los valores obtenidos experimentalmente se confirma con un R^2 de 89,63 % y un R^2 ajustado a los grados de libertad de 83,14 %.

3.4.2. Análisis para el módulo de ruptura (MOR)

El análisis de varianza para la resistencia a la flexión o módulo de ruptura (MOR), arrojó que solo la severidad tiene influencia estadísticamente significativamente sobre esta propiedad. Esto se puede evidenciar en el diagrama de Pareto de la [Fig.4](#). Los resultados muestran que los mejores valores para el MOR se obtuvieron a severidades intermedias como se observa en el gráfico de efectos principales de la [Fig.4](#).

El valor máximo de MOR alcanzado en los ensayos es de 40MPa para una severidad de 4, a estas condiciones la temperatura de prensado no es relevante. Esto se puede explicar porque el rango de temperaturas es suficiente para hacer fluir y plastificar el contenido de lignina la cual se distribuye en el interior del tablero. Lo anterior incrementa la resistencia de los tableros al existir una mejor capacidad de enlaces entre las fibras de las diferentes pulpas ([Salvadó & Velásquez, 2003](#)).

Es importante evidenciar que las severidades altas aplicadas también producen un efecto negativo sobre la resistencia de los tableros disminuyendo su calidad. Ya que el pretratamiento degrada las fibras disminuyendo la matriz de la pulpa además de generar ligninas modificadas demasiado frágiles debido a los procesos de polimerización en la autohidrólisis que se presentan ([Quintana, 2006](#)). Por esto para los resultados experimentales obtenidos no se recomienda pretratamiento con severidades mayores a 4,2.

El pretratamiento con vapor es de gran importancia en esta propiedad para los tableros aglomerados sin enlazantes. Autores como Hashim ([Said & Hashim, 2011](#); [Saari & Hashim, 2014](#)) quien

trabajó con troncos de *Elaeis guineensis* (palma de aceite) reportó valores de MOR para tableros de 5,73 MPa sin pretratamiento y con pretratamiento estos valores ascendieron a 25 MPa, esto confirma ampliamente la efectividad del pretratamiento en la formación de tableros aglomerados sin enlazantes de calidad.

Otros autores como Anglés ([Anglés & Ferrando, 2001](#)), Quintana ([Quintana, et al., 2009](#)) y Mancera ([Mancera & Mansouri, 2011](#)), los cuales trabajaron con *Abies alba-pinus insignis*, vástagos de *Musacea* y racimos de *Vitis vinífera* respectivamente, obtuvieron resultados para el MOR de 25 MPa. Siendo estos menores en comparación con el valor determinado en este trabajo para el *gynerium sagittatum*.

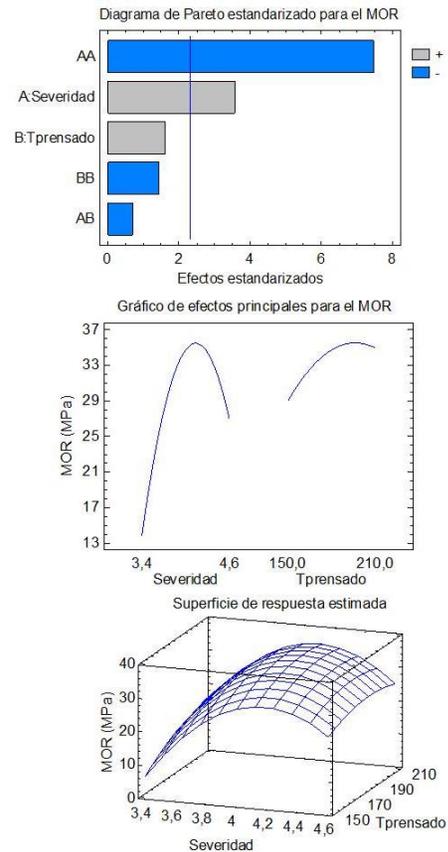


Fig. 4. Gráficos para el análisis del MOR

El trabajo de Velásquez ([Velásquez & Ferrando, 2003](#)) reporta un valor de 54 MPa para el MOR para sus tableros a partir de *Miscanthus sinensis* de nuevo es la mayor propiedad encontrada para esta clase de tableros sin enlazantes.

El modelo generado a partir de los datos experimentales se ajusta con una R^2 de 90,01% y el R^2 ajustado por grados de libertad con 83,76 %.

3.4.3. Análisis para el hinchamiento en espesor TS

La estabilidad dimensional de los tableros a diferencia de las demás propiedades analizadas anteriormente, presenta interacción entre todos los factores posibles como se evidencia en el diagrama de Pareto de la Fig. 5. Esto indica que todos los factores (Se, Tp) y sus combinaciones son influyentes en el comportamiento del TS de los tableros analizados.

Observando el gráfico de interacciones para el TS de la Fig. 5 se evidencia que es más importante el efecto que tiene la severidad en esta propiedad, ya que muestra que a altas temperaturas de prensado no se presentan variaciones tan significativas de TS, mientras que a bajas temperaturas el efecto de la severidad es dramático en la propiedad.

Para obtener un tablero resistente a la humedad la absorción de agua debe ser mínima; esto se logra aumentando las severidades del pretratamiento y la temperatura de prensado. Al pretratar el material con *steam explosion* se busca que la lignina con su carácter hidrofóbico cubra la celulosa y disminuya la posible formación de múltiples puentes de hidrógeno que la hacen soluble en agua reduciendo la absorción de agua y haciendo que los tableros conserven su estabilidad dimensional (Fengel & Wegener, 2003).

Según la superficie de respuesta estimada de la Fig.5. La relación adecuada que se debe mantener para obtener un tablero con baja deformación dimensional son mayores temperaturas de prensado y severidades.

El valor para el TS menor determinado experimentalmente fue de 12%, este cumple con los requerimientos estándar ya que es menor al 20% además de superar valores reportados por otros autores como Hashim (Saari & Hashim, 2014) quien encontró valores de 38.78% para tableros de troncos de *Elaeis guineensis*. Anglés por su parte reporto el 14% para el TS de sus tableros de *Abies alba-pinus insignis* (Anglés & Ferrando, 2001), los cuales también cumplen la norma estándar pero no supera el comportamiento de los tableros de *gynerium sagittatum*.

Otros autores presentan valores que contrastan con los hallados. Quintana (Quintana, et al., 2009) determinó un valor del 49% para el TS utilizando vástago de *Musácea* para sus tableros, a su vez Mancera (Mancera & Mansouri, 2011) y

Velásquez (Velásquez & Ferrando, 2003) reportaron valores de TS del 8.9 y 8% respectivamente los cuales hacen a sus tableros mejores opciones en cuanto a esta propiedad.

El modelo ajustado a partir de los datos experimentales se ajusta con un R² del 94,56% y el R² ajustado por grados de libertad con el 91,85%.

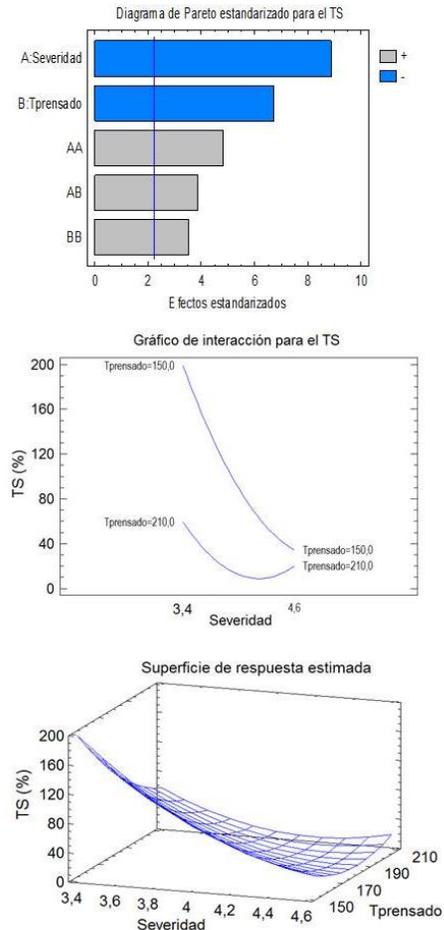


Fig. 5. Gráficos para el análisis del TS.

3.4.4. Verificación de resultados

Partiendo del análisis estadístico y de los modelos encontrados para las diferentes variables de respuesta, se pudo establecer los valores que deben tener los factores evaluados para obtener las mejores propiedades para los tableros.

En la Tabla 3 se muestra los valores propuestos para los factores y los óptimos encontrados, resaltando en negrilla los promedios de las variables de respuesta de 3 ensayos realizados a las condiciones optimizadas.

Para establecer cuáles deben ser las condiciones óptimas de trabajo, solo se optimizó con las variables de respuesta MOE y el TS ya que el comportamiento del MOE y el MOR son similares y el cálculo del MOE es menos sensible a factores como el espesor de los tableros.

Según los valores óptimos encontrados, los tableros resultantes a partir de *Gynerium sagittatum* pretratada cumplen en términos generales con los mínimos exigidos para tableros de alta densidad a nivel comercial. Aunque estas propiedades están por debajo de trabajos similares como el que reporta Velásquez con *Miscanthus sinensis* (Velásquez, 2002).

Al trabajar con los troncos de *Gynerium sagittatum* y ser estos la parte estructural de la planta se parte de un material de buena calidad en términos de contenido de celulosas, fibras y lignina lo cual genera un buen efecto enlazante lo que se tradujo en tableros de buena resistencia.

Tabla 3. Parámetros de optimización y valores experimentales obtenidos a estas condiciones

Se	Tp (°C)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	%TS
		5383,54	32,59	6,25
4,1	217	5330,76	31,59	8,47
		6361,17	38,42	8,57
Promedio		5691,82 ± 656,63	34,20 ± 4,17	7,77 ± 1,49

En la [Tabla 4](#) se reporta la caracterización para la severidad óptima encontrada donde se confirma el aumento del contenido de porcentual de lignina en un 36% respecto al material original (*gynerium sagittatum*) lo cual valida la relación de la lignina con el aumento de la resistencia de los tableros. También se evidencia una disminución del 68% de pentosanas o hemicelulosas las cuales como se ha reportado anteriormente son las principales responsables de la estabilidad dimensional de los tableros y una disminución de menos del 10% en la celulosa contenida en el material pretratado con el *steam explosion* lo cual confirma que el pretratamiento no disminuye ésta drásticamente, es decir, no disminuye la calidad de los tableros ya que esta es una de los principales requerimientos para la formación de un tablero con calidad.

Tabla 4. Caracterización química de la *gynerium sagittatum* SE 4,1

Prueba	% en base seca
Humedad	5,82 ± 0,23
Cenizas totales	0,86 ± 0,14
Extraíbles Orgánicos	21,64 ± 1,24
Extraíbles Acuosa	2,12 ± 0,62
Lignina Klason	33,27 ± 5,26
Holocelulosa	42,97 ± 7,12
Pentosanas	8,01 ± 0,08
Celulosa	34,96 ± 0,08

En la [Fig.6](#) se evidencia la reestructuración porcentual que sufre la caracterización de la caña flecha al ser tratada con vapor a Se 4,1. Es importante resaltar el aumento de los extraíbles orgánicos (EO) en el material pretratado ya que es 3 veces mayor. La lignina (alto peso molecular) del *gynerium sagittatum* en el pretratamiento con vapor es sometida a reacciones de ruptura formando compuestos o ligninas de bajo peso molecular por reacciones de condensación (Wolfgang, 2013). Esta lignina modificada se redistribuye en su mayoría sobre las microfibrillas de la celulosa. Al caracterizar los EO se cuantifico en su mayoría los compuestos y ligninas degradados aumentando significativamente su valor.

El aumento de los componentes antes y después del pretratamiento con vapor se explica gracias a la pérdida de hemicelulosa que sufrió el *gynerium sagittatum* con el pretratamiento lo cual distribuyó en base al total los demás componentes. Estas están contenidas en el lixiviado que genera el pretratamiento junto con EO que se pierden en el tratamiento.

La hemicelulosa en la madera es la encargada de impartir las propiedades viscoelásticas, al degradar estas se hace frágil y rígido el material pretratado (Wolfgang, 2013). La eliminación de los grupos OH de estas por reacciones de deshidratación dan como resultado un material con superficies hidrófobas (mayor resistencia a la humedad) como se ha comprobado anteriormente.

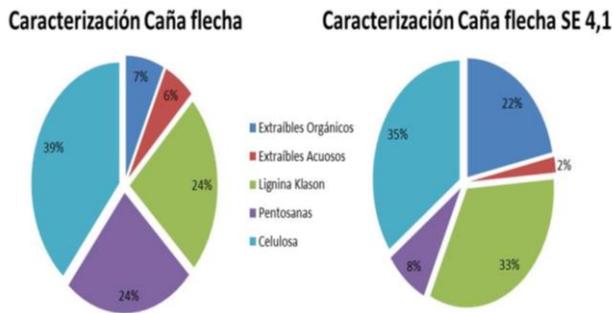


Fig. 6. Diagrama circular para la caracterización del *Gynerium sagittatum* y la pulpa pretratada con vapor SE 4,1

El valor óptimo determinado para la severidad es 4.1 este valor maximiza el MOE y al no tener influencia significativa sobre el MOR este punto no hará que cambie su óptimo significativamente. La temperatura determinada para la optimización es 217°C la cual al no ser influyente con el MOR y el MOE se determinó para sustentar la disminución del TS donde si tenía una importancia marcada por esta razón esta temperatura se puede considerar alta.

4. CONCLUSIONES

Es posible obtener tableros de partículas de alta densidad y calidad a partir de *Gynerium sagittatum* mediante tratamiento con *steam explosion*, superando los valores mínimos exigidos por las normas europeas y españolas.

La materia prima es adecuada para la realización de los tableros a pesar de necesitar un pretratamiento para maximizar sus propiedades.

El pretratamiento con vapor conlleva a la pérdida de hemicelulosas y una mejor distribución de la lignina sobre las fibras.

Los modelos ajustados en los diseños de experimentos a las diferentes variables de respuesta han sido satisfactorios y han permitido realizar un análisis fiable desde el punto de vista estadístico.

Entre mayor sea la severidad y con temperaturas de prensado intermedias se obtienen los mejores resultados para las propiedades mecánicas MOR y MOE, los valores más altos son de 40 MPa y 3300 MPa respectivamente.

La lignina cumple su función como aglomerante y proporciona el carácter hidrofóbico al tablero, trabajar con alta severidad resulta en un TS de 12%.

Existe una dependencia directa entre la estabilidad dimensional de los tableros y las hemicelulosas ya que estas son altamente hidrofílicas y por lo tanto absorben humedad que se traducirá en un aumento del espesor del tablero.

Los valores óptimos de los factores para maximizar las propiedades mecánicas y minimizar las propiedades físicas de los tableros son severidad 4.11 y temperatura de prensado de 217°C.

Los valores para las propiedades físico mecánicas optimizadas fueron MOE 5691,82 MPa, MOR 34,20 MPa y TS 7.7%.

Es necesario realizar un estudio sobre el efecto del pretratamiento con vapor sobre la estructura de la lignina para poder establecer claramente el efecto de su peso molecular sobre sus características adhesivas y las propiedades mecánicas de los tableros.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al programa de jóvenes investigadores COLCIENCIAS 566 por el financiamiento económico durante la realización de la investigación.

REFERENCIAS

- Anglès, M. & Ferrando, F., 2001. Suitability of steam exploded residual softwood for the production of binderless panels. Effect of pretreatment severity and lignin addition. *Biomass and Bioenergy*, **21** (3), 211-224.
- Anglès, M. & Reguant, J., 1999. Binderless Composites from Pretreated Residual Softwood. *Journal of Applied Polymer Science*, **73**, 2485-2491.
- Caña brava, 2010. *Proyecto caña brava*. [En línea] Available at: http://www.canabrava.com.pe/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=48&Itemid=64 [Último acceso: 10 10 2013].
- Castro, D. & Henao, E., 2009. *Elaboración de tableros aglomerados a partir de lodos*

- papeleros y lignina*. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.
- FAO, 2012a. *Estadísticas de productos forestales*. [En línea] Available at: <http://faostat.fao.org/DesktopDefault.aspx?PageID=626&lang=es#ancor> [Último acceso: 8 10 2013].
- FAO, 2012b. *Producción e importación tableros de fibras en Colombia*. [En línea] Available at: <http://faostat.fao.org/DesktopDefault.aspx?PageID=626&lang=es#ancor> [Último acceso: 8 10 2013].
- Fengel, D. & Wegener, G., 2003. *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*. s.l.:Verlag Kessel.
- Hashim, R., 2011. Characterization of raw materials and manufactured binderless particleboard from oil palm biomass. *Materials and Design*, **32** (1), 246–254.
- Hashim, R. & Hamid, S., 2009. Extractable formaldehyde from waste medium density fibreboard. *J Trop*, **21**, 25–33.
- Mancera, C. & Mansouri, N., 2011. The effect of lignin as a natural adhesive on the physico-mechanical properties of vitis vinifera fiberboards. *Bioresources*, **6** (3), 2851-2860.
- Mobarak, F. & Fahmy, Y., 2009. Binderless Lignocellulose Composite from Bagasse and Mechanism of Self-Bonding. *Holzforchung International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood.*, **36** (3), 131-136.
- Niño Lozano, J. F., 2011. *Potencial y beneficio socio-ambiental del uso de materiales lignocelulósicos generados en proyectos lineales*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Overend, R. & Chornet, E., 1987. Fractionation of lignocellulosis by steam-aqueous pretreatments. *Trans. R. Soc*, **A321**, 523-536.
- Quintana, G., 2006. *Pretratamiento con vapor del raquis de banano para la producción de tableros de aglomerados sin enlazantes*, Medellín: s.n.
- Quintana, G., Velásquez, J. & Bentancourt, S., 2009. Binderless fiberboard from steam exploded banana bunch. *Industrial crops and products*, **29** (1), 62.
- Saari, N. & Hashim, R., 2014. Properties of steam treated binderless particleboard made from oil palm trunks. *Composites*, **56**, 344-349.
- Said, N. & Hashim, R., 2011. Influence of press temperature on the properties of binderless particleboard made from oil palm trunk. *Materials and Design*, **32**, 2520-2525.
- Salvadó, J. & Velásquez, J., 2003. Binderless fiberboard from steam exploded *Miscanthus sinensis*: optimization pressing and pretreatment conditions. *Wood Science and Technology*, Diciembre, **37** (3), 279 – 286.
- Suchsland, O. & Woodson, E., 1983. Effect of hardboard process variables on fiberbonding. *Forest Products Journal*, **33** (4), 58.
- Suchsland, O. & Woodson, G., 1985. Binderless fiberboard from two different types of fiber furnishes. *Forest Products Journal*, **35** (2), 63-68.
- Suchsland, O. & Woodson, G., 1987. Effect on cooking conditions on fiber bonding in dry-formed binderless hardboard. *Forest Products Journal*, **37** (11-12), 65 – 69.
- Sun, X., 2005. Characteristics of degraded cellulose obtained from steam exploded wheat straw. *Carbohydrate Research*, **340** (1), 97.
- Velásquez, J., 2002. *Producción de tableros de fibras a partir de Miscanthus sinensis*. Tarragona: s.n.
- Velásquez, J. & Ferrando, F., 2003. Binderless fiberboard from steam exploded *Miscanthus sinensis*. *Wood Science and Technology*, **37** (3), 269 – 278.
- 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*, **18** (1), 17-23.
- Velásquez, J., Ferrando, F. & Salvadó, J., 2002. Binderless fiberboard from steam exploded *Miscanthus sinensis*: the effect of a grinding process. *Holz als Roh- und Werkstoff*, **60** (4), 297- 302.
- Wolfgang, S., 2013. *Steam explosion for biomass pre-treatment*, s.l.: Danish Technological Institute.

SOBRE LOS AUTORES

Giovanna Diossa Gallego

Ingeniera Química de la Universidad Pontificia Bolivariana. Joven investigador COLCIENCIAS.

Jorge Alberto Velásquez Jiménez

Profesor Titular de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Pontificia Bolivariana. Ingeniero Químico de la Universidad Pontificia

Bolivariana. Maestro en Ciencias Forestales, graduado de la Universidad de Guadalajara. Doctor en Ingeniería Química de la Universitat Rovira i Virgili. Áreas de interés investigativo: Pulpa y Papel, Simulación de procesos químicos.

Germán Camilo Quintana Marín

Ingeniero Químico de la Universidad Pontificia Bolivariana. Maestro en Sistemas Energéticos y Doctor en Ingeniería, graduado de la Universidad de Pontificia Bolivariana. Actualmente es Profesor Titular de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Pontificia Bolivariana y sus áreas de interés investigativo son: los procesos papeleros y el aprovechamiento de residuos agrícolas, obtención de insumos químicos con énfasis en química de materiales lignocelulósicos.