

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA
RECURSOS Y TECNOLOGÍAS AGROALIMENTARIAS

TESIS DOCTORAL

**Valorización agroindustrial de residuos
lignocelulósicos (*Arundo donax* L., *Washingtonia
robusta* H. Wendl)**

Clara Eugenia Ferrández García

Orihuela, mayo de 2013

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA
RECURSOS Y TECNOLOGÍAS AGROALIMENTARIAS

TESIS DOCTORAL

Valorización agroindustrial de residuos lignocelulósicos (*Arundo donax* L., *Washingtonia robusta* H. Wendl)

Presentada por

Clara Eugenia Ferrández García

Ingeniero Agrónomo por la Universidad Politécnica de Valencia

Directores

M^a Teresa Ferrández García
Doctora, Arquitecta

F. Javier Andreu Rodríguez
Doctor, Ingeniero Agrónomo

Teresa García Ortuño
Doctora, Ingeniero Agrónomo

Orihuela, 13 de mayo de 2013

AUTORIZACIÓN DE LA PRESENTACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL
POR LOS DIRECTORES

D^a. M^a Teresa Ferrández García, Profesora Doctora del Área de Ingeniería Agroforestal en el Departamento de Ingeniería, Miguel Hernández de Elche.

D. Francisco Javier Andreu Rodríguez, Profesor Doctor del Área de Ingeniería Agroforestal en el Departamento de Ingeniería, Miguel Hernández de Elche.

D^a. Teresa García Ortuño, Profesora Doctora del Área de Ingeniería Agroforestal en el Departamento de Ingeniería, Universidad Miguel Hernández de Elche.

AUTORIZAN:

La presentación de la Tesis Doctoral titulada “**Valorización agroindustrial de residuos lignocelulósicos (*Arundo donax* L., *Washingtonia robusta* H. Wendl)**” realizada por Dña. Clara Eugenia Ferrández García, bajo nuestra dirección y supervisión, en el Departamento de Ingeniería y que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad Miguel Hernández de Elche.

En Orihuela, 13 mayo de 2013

LOS DIRECTORES DE TESIS

Fdo.: Prof. M^a Teresa Ferrández García Fdo.: Prof. F. Javier Andreu Rodríguez

Fdo.: Prof. Teresa García Ortuño

AUTORIZACIÓN DE LA PRESENTACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL
POR EL DEPARTAMENTO RESPONSABLE

D. José Ramón Díaz Sánchez, Director del Departamento Tecnología Agroalimentaria.

INFORMA:

Que la Tesis Doctoral titulada “**Valorización agroindustrial de residuos lignocelulósicos (*Arundo donax L., Washingtonia robusta H. Wendl*)**”, ha sido realizada por D^a. Clara Eugenia Ferrández García, bajo la dirección y supervisión de D^a. M^a Teresa Ferrández García, D. F. Javier Andreu Rodríguez y D^a Teresa García Ortuño y que el Departamento ha dado su conformidad para que sea presentada ante la Comisión de Doctorado.

En Orihuela, a 15 de mayo de 2013

EL DIRECTOR DEL DEPARTAMENTO

Fdo.: José Ramón Díaz Sánchez

**Valorización agroindustrial de residuos
lignocelulósicos (*Arundo donax* L., *Washingtonia
robusta* H. Wendl)**

**Memoria que presenta la Ingeniera Agrónoma Clara Eugenia Ferrández
García para optar al grado de doctor**

Fdo.: Clara Eugenia Ferrández García

VºBº DIRECTORES DE TESIS.

Mª Teresa Ferrández García
Doctora, Arquitecta

F. Javier Andreu Rodríguez
Doctor, Ingeniero Agrónomo

Teresa García Ortuño
Doctora, Ingeniero Agrónomo

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, mi agradecimiento a los directores de esta tesis doctoral, Dra. M^a Teresa Ferrández García, Dr. F. Andreu Rodríguez y Dra. Teresa García Ortuño, por el interés que han mostrado durante el desarrollo de todo el trabajo, así como por la disponibilidad y ayuda recibida, y sobre todo por su afecto.

Agradecer la ayuda recibida de Manuel Ferrández-Villena, sin cuya implicación no se hubiese podido realizar este trabajo.

A todos aquellos que a lo largo de los años me animaron y apoyaron, especialmente a mis familiares, gracias.

RESUMEN

La madera es el material natural más usado desde la antigüedad como material de construcción. Debido a la deforestación y encarecimiento de este producto, la industria del tablero emplea materiales lignocelulósicos no madereros, especialmente residuos de cosechas (lino, arroz, trigo, algodón, bagazo de caña de azúcar, etc.). En la presente tesis, la caña común (*Arundo donax* L.) y la palmera de abanico (*Washingtonia robusta* H. Wendl) se utilizaron como materiales lignocelulósicos para la fabricación de tableros de partículas resistentes y aislantes, y se estudiaron algunos parámetros para evaluar su potencial como sustrato hortícola. Para ello se hicieron varios estudios que han sido publicados en las revistas *BioResources* y *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. De los resultados de estos estudios se desprende que es factible utilizar partículas de caña común y de palmera washingtonia para la fabricación de tableros de partículas, obteniéndose paneles aislantes y tableros aptos para uso general, carpintería interior, fabricación de mobiliario, e incluso tableros estructurales, en algunos casos. En cuanto a la valorización como sustratos hortícolas, las propiedades físicas mostraron valores adecuados, aunque en ambos casos el contenido en nutrientes fue bajo. Por lo tanto, el uso de los residuos de poda de *Washingtonia robusta* H. Wendl y *Arundo donax* L. en la horticultura profesional y en la fabricación de tableros de partículas contribuye a su eliminación de forma ecológica y reduce la necesidad tanto de turba como de madera.

ABSTRACT

Wood is the natural raw material most used as a building material since ancient times. Due to deforestation and increasing raw material prices, the particleboard industry has moved on to employ non-wood lignocellulosic materials, especially crop residues (flax, rice stalks, wheat stalks, cotton, sugar cane bagasse, etc.). In this thesis, the giant reed (*Arundo donax* L.) and the mexican fan palm (*Washingtonia robusta* H. Wendl) were used as lignocellulosic materials for the manufacturing of particleboards and heat insulation panels, and some parameters were tested to evaluate their capacity as horticultural substrate. To do so, several studies were accomplished and then were published in the journals *BioResources* and *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. From the results of these studies it can be concluded that it is feasible to use particles of giant reed, and Mexican fan palm to manufacture particleboards, having obtained heat insulation panels, boards for general use, interior fitment including furniture manufacturing, and even reaching the load bearing type. Regarding the valorization of these particles as horticultural substrate, they showed suitable values of some physical properties, although the nutrients content were low for both materials. Therefore, the use of *Washingtonia robusta* pruning waste and *Arundo donax* reeds in professional horticulture and in the particleboard manufacturing contributes to their disposal in environmentally friendly ways and reduces the need for both peat and wood.

ÍNDICE

ÍNDICE

	Pág.
1. Introducción.	1
1.1. Materiales vegetales usados en las construcciones tradicionales.	3
1.2. Tableros de partículas.	5
1.3. Estado actual de los conocimientos científico-técnicos.	6
1.4. Materiales utilizados en el presente estudio.	7
1.5. Proceso de elaboración de los tableros de partículas.	8
1.6. Ensayos experimentales para la evaluación de los tableros.	9
2. Objetivos.	16
3. Publicaciones.	18
- Evaluation of the physical and mechanical properties of particleboard made from giant reed (<i>Arundo donax</i> L.).	19
- Agricultural and industrial valorisation of <i>Arundo donax</i> L.	30
- Evaluation of the different uses of <i>Washingtonia robusta</i> pruning waste.	43
- Panels made from giant reed bonded with non-modified starches	53
4. Resultados.	67
5. Bibliografía.	91

1.- INTRODUCCIÓN

Clara Eugenia Ferrández García

1. INTRODUCCIÓN

La construcción es una parte fundamental del desarrollo sostenible, en el que se debe realizar un balance energético global, incluyendo no sólo la fase de vida útil del edificio, sino todo su proceso constructivo, desde la obtención de los materiales, su elaboración industrial, su puesta en obra, su uso, su reciclaje y su destrucción; lo que se denomina “Ciclo de Vida”.

La construcción sostenible se basa en complementar el ahorro energético y la utilización de energías renovables con la utilización de materiales naturales que se consideran no contaminantes :

- Materiales con bajo impacto ambiental en su proceso de fabricación. Para ello debemos considerar no solo la contaminación que produce su elaboración, sino la cantidad y el tipo de energía consumida en el proceso (por ejemplo, durante el transporte).
- Materiales renovables y/o reciclables.
- Materiales que al fin del ciclo de vida produzcan residuos de bajo impacto ambiental.

La madera es el material natural mas usado desde la antigüedad como material de construcción. Según informes de la FAO (2001) cada año se pierden en el mundo 11 millones de hectáreas de superficie forestal. Entre las causas de estas pérdidas se señalan la expansión de los pastos y los cultivos, y el desarrollo urbano, por lo que la madera es un recurso escaso.

El desarrollo del tablero de partículas y otros tableros de fibras tuvieron un impacto muy positivo en los recursos de la madera, debido a que provenían casi enteramente del uso de materiales reciclados (residuos de madera y aserrín).

Actualmente, a escala europea, la industria de tableros de madera se está viendo afectada por el aumento del consumo de su materia prima con fines energéticos. Los mecanismos de ayuda financiera para la electricidad «verde» propician un uso desequilibrado de madera en la producción de energía eléctrica. Los precios de los

Clara Eugenia Ferrández García

residuos de madera aumentaron una media de un 20% (Janssen y Marutzky, 2004) y siguen aumentando.

Ante la falta de madera, la industria del tablero puso sus miras en otros materiales lignocelulósicos, especialmente en residuos de cosechas (lino, arroz, trigo, algodón, etc.), comercializándose actualmente tableros con dichas materias primas, para uso interior.

La Confederación Europea de la Industria de la Madera, en un estudio del año 2000 (Dielen L. *et al.*), puso en conocimiento de la Comisión Europea la competencia que había por los residuos de madera, lo que suscitó que se promovieran planes estratégicos de I+D+i sobre cultivos agroenergéticos. Estos cultivos y residuos agrícolas nuevamente compiten con el sector del tablero de partículas ya que muchos de estos materiales comenzaban a utilizarlos o estaban en experimentación. Dentro de los cultivos agroenergéticos el que más éxito está teniendo es la caña común. Esto indica que la industria nuevamente tendrá que poner sus miras en otros materiales lignocelulósicos con bajo poder calorífico que no puedan ser usados como biomasa energética.

No solo es un problema la falta de materias primas en la industria del tablero, sino también los adhesivos que utiliza (mayoritariamente urea formaldehído, fenol formaldehído, etc), debido a que los tableros emiten vapor de formaldehído. El formaldehído es un producto tóxico por ingestión, irritante a la piel y en contacto con los ojos y está catalogado por la IARC (Agencia Internacional de Investigación del Cáncer) como cancerígeno, por ello, se han endurecido las normativas europeas para su utilización.

Es una situación complicada para una industria que ya estaba afectada por la ralentización del sector de la construcción y, en consecuencia, de la industria del mueble.

1.1. Materiales vegetales usados en las construcciones tradicionales.

El material más usado tradicionalmente como aislante ha sido la madera, pero debido a la deforestación y encarecimiento de este producto, se fueron incorporando otros materiales para su uso como aislantes, tanto acústicos como térmicos. Con el desarrollo de la Industria química y la obtención de derivados del petróleo actualmente

Clara Eugenia Ferrández García

los productos que más se comercializan como aislantes son fibras minerales y productos sintéticos como los poliestirenos.

Los aislantes procedentes de fibras naturales se encuentran en un momento de crecimiento y cada vez son más las empresas que comercializan diferentes materias primas naturales. La industria del lino ha desarrollado un panel aislante; la lana se usa en forma de esteras aislantes; el algodón y el cáñamo se emplean a modo de mantas (geotextiles).

En las construcciones tradicionales se han utilizado como aislantes entre otros productos vegetales: paja, fibra de coco, algas, cáscara de arroz, mazorcas de maíz, corteza de pino, cáscara de avellanas, almendras y nueces y caña común.

La paja se usa como material de construcción desde hace miles de años. Se usa mezclada con barro para hacer morteros, para cubrir techos, etc. La paja es un conductor muy pobre del calor, por lo que la temperatura en el interior del edificio se mantiene estable. Su uso exige una mineralización previa para eliminar las proteínas que podrían atraer a insectos y parásitos. Esta tarea se realiza sumergiendo la paja en una disolución al 5% de cal. La primera casa (documentada) hecha con fardos de paja fue construida en las llanuras de Nebraska en 1896-97. En Europa, la casa de fardos de paja más antigua conocida fue construida en Montargis, Francia en 1921. A partir de 1940 este estilo de construcción cayó en desuso, aunque todavía hay defensores de sus beneficios.

La fibra de coco ha sido usada especialmente como aislante acústico en suelos ya que con tan solo 18 mm puede conseguir un poder aislante de 26 dB. Posee una densidad de 124 kg/m³ y su clasificación al fuego es M3. No le ataca el moho ni la humedad. Su conductividad térmica es de 0,045 W/mK. Su difusión al vapor es 1. Su instalación evita la corriente electroestática y es un producto que permite ser compactado (Valero, 2007).

Las algas se han utilizado durante mucho tiempo en construcciones tradicionales en las islas Baleares. Las algas se instalaban en los techos entre dos capas de mezcla de ceniza y cal. La utilización de cáscara de arroz en las construcciones es muy antigua.

Actualmente se están desarrollando proyectos de investigación que utilizan este producto vegetal para el desarrollo de paneles. Las mazorcas de maíz se usaron en la mezcla de morteros de cal, a los que aportaba ligereza y poder aislante. La cal evita el ataque de insectos o parásitos. La utilización de cáscaras de nueces, almendras y

Clara Eugenia Ferrández García

avellanas se reducía al relleno de cámaras en muros o cubiertas y antes de su utilización precisaban de algún tratamiento para evitar el ataque de insectos o parásitos. La caña común se utilizó como material de construcción en muchos países mediterráneos. En el sur de la provincia de Alicante se usó en todas las construcciones hasta principios del siglo XX (García-Ortuño et al. 2011), fundamentalmente formando parte de los forjados de cubierta y de piso. Hasta los años sesenta se siguió usando para pequeñas construcciones unifamiliares y alojamientos ganaderos.

El tronco de palmera se utilizó en la zona de levante (España) en vigas de forjado y las hojas (las palmas) como cubierta de alojamientos ganaderos.

1.2. Tableros de partículas.

La norma europea EN 309 de 1992 define los tableros de partículas como *“aquellos fabricados mediante la aplicación de presión y calor sobre partículas de madera (serrín, virutas y similares) y/u otros materiales lignocelulósicos en forma de partículas (fibras de cáñamo, lino, bagazo y similares) con adición de un adhesivo”*.

La primera referencia bibliográfica de la industria de tableros de partículas (la utilización de residuos de madera), data del año 1902, siendo sus autores los técnicos alemanes Ernst Hubaart y J.M. Salter. Sin embargo, no fue hasta 1910 cuando se aplicó calor y presión, en una planta piloto, a fibras o partículas de características adecuadas para la obtención de tableros de partículas. En noviembre de 1936, Pfhöl registró la primera patente que conseguiría fabricar tableros de partículas aglomerados mediante adhesivos sintéticos utilizando prensa de platos calientes.

Antes de la 2ª Guerra Mundial se efectuaron experimentos sobre tableros de madera aglomerada tanto en Europa como en Norteamérica, pero la primera fábrica que produjo estos tableros comercialmente se construyó en Bremen (Alemania), en 1941. Se servía de trozos de madera, utilizando como aglutinante una resina fenólica, alcanzando una producción diaria de 10 toneladas. En los años 1941-43, dos fábricas de madera contrachapada en Alemania iniciaron la fabricación de tableros de madera aglomerada sirviéndose de los residuos de contrachapado, desmenuzados o reducidos a partículas menudas. Utilizaban prensas de apertura múltiple y el aglutinante era la resina de urea formaldehído. Los trabajos sobre los problemas técnicos y científicos relativos a este campo se intensificaron en los años posteriores al enfrentarse Alemania con una grave

Clara Eugenia Ferrández García

escasez de madera. Las resinas de urea fueron las que generalmente se usaron y se observó que podía conseguirse una considerable economía de resina utilizando partículas homogéneas, cortadas por máquinas especiales, en lugar de trozos heterogéneos de madera.

Se han utilizado muchas especies de maderas, incluido el abedul, haya y aliso, así como el pino. Se consiguieron perfeccionamientos en Alemania Occidental y en otros lugares, sobre todo en Suiza y el Reino Unido, utilizando madera como materia prima básica para las fábricas ya establecidas. En 1945, Suiza lanzó al mercado el primer tablero de madera aglomerada de tres capas, que utilizaba partículas irregulares para la capa mediana y partículas delgadas y planas para las caras exteriores más resistentes.

Entre tanto, se había explorado la posibilidad de servirse de residuos agrícolas en lugar de madera, y en Bélgica comenzó a funcionar en 1947 una primera fábrica que se servía del lino, a la que siguieron en seguida otras.

Al ir perfeccionándose los procesos de trabajo en la industria de los tableros de partículas, los procedimientos se hicieron más racionales y se multiplicaron las aplicaciones para el producto terminado; al mismo tiempo, se inició la fabricación en otros continentes: Asia, África y América. En América, en especial, creció el número de nuevas fábricas y la producción creció rápidamente.

Las resinas sintéticas de fraguado térmico (urea-formaldehído, fenol-formaldehído y melamina-formaldehído), constituyen la base de la mayor parte de los aglutinantes usados para estos tableros. La resina de urea-formaldehído es la de aplicación más general; es también la más económica, presenta un color claro y es adecuada para tableros de aplicación interior.

Los tableros de partículas tienen muchas aplicaciones, desde la industria del mueble, envases y embalajes hasta la de materiales de construcción.

1.3. Estado actual de los conocimientos científico-técnicos.

Las materias primas lignocelulósicas utilizadas en la industria de tableros de partículas proceden de las maderas, pero las fibras vegetales no madereras y los residuos agrícolas también han sido investigados para la producción de tableros de partículas. La utilización de residuos agrícolas como materia prima en la industria

Clara Eugenia Ferrández García

forestal se remonta al año 1900 para la industria de la pulpa y el panel (Copur et al. 2007). La revisión bibliográfica realizada por Youngquist y colaboradores (1994) cita 1165 informes de investigación de todo el mundo sobre el uso de fibras vegetales no madereras para materiales de construcción y paneles de 1913 a 1993. En la última década, la investigación se ha llevado a cabo en una amplia variedad de plantas anuales y residuos agrícolas tales como: paja de trigo (Han et al. 1998; Mo et al. 2003; Sain y Panthapulakkal 2006), cáscara de arroz (Leiva et al. 2007; Ciannamea et al. 2010.), carpelo de algodón (Alma et al. 2005), tallos de algodón (Guler y Ozen 2004), harina de cáscara de cacahuete (Batalla et al. 2005), cáscara de cacahuete (Guler et al. 2008), cáscara de almendra (Guru et al. 2006), lino (Papadopoulos y Hague, 2003), tallos de girasol (Guler et al. 2006; Nemli 2003; Khristova et al. 1998), tallos de berenjena (Guntekin y Karakus 2008), tabaco (Ntalos y Grigoriou 2002), palmera datilera (Nemli et al. 2001), podas de vid (Ntalos y Grigoriou 2002), kenaf (Grigoriou et al. 2000; Kalaycioglu y Nemli 2006), cáscara de avellana (Copur et al., 2008), virutas de bambú (Papadopoulos et al, 2004), bagazo de caña de bambú (Lee et al. 2005), bambú (Sudin y Swamy 2006) y palmera del aceite (Abdul Khalil et al. 2007).

1.4. Materiales utilizados en el presente estudio.

En el presente estudio, los materiales lignocelulósicos utilizados fueron la caña común (*Arundo donax* L.) y la palmera de abanico (*Washingtonia robusta* H. Wendl).

La caña común (*Arundo donax* L.) pertenece a la subfamilia de Arundinoideae la familia de las gramíneas (Tucker, 1990). La caña común se cree que se originó en Asia, pero también se considera como una especie nativa en los países que rodean el Mar Mediterráneo. Desde esta área, se ha dispersó por la acción del hombre a todas las áreas subtropicales y cálido-templadas del mundo, debido a sus múltiples usos (Lewandowski et al. 2003). En el sureste de España, la caña fue utilizada como material de construcción (paredes, techos, forjados, vallas) para las construcciones ganaderas, viviendas rurales y para el control de la erosión en los bordes de los ríos, hasta mediados del siglo 20. La caña común ha invadido la cuenca del río Segura, consumiendo agua tan necesaria para el uso agrícola. Los grandes grupos de cañas alteran el cauce y el flujo de la corriente, aumentando los daños por inundaciones

Clara Eugenia Ferrández García

(Frandsen y Jackson, 1994; Moran y Goolsby 2009), además, desplazan poblaciones de plantas y animales nativos (Bell 1997; Herrera y Dudley 2003). Los tratamientos de control físicos (quema), mecánicos (siega o acolchado) y control químico (Tracy y DeLoach 1999) son los métodos más comúnmente utilizados para resolver estos problemas, pero no tienen suficiente impacto.

La *Washingtonia robusta* H. Wendl. (palmera abanico, washingtonia mejicana) pertenece a la familia Arecaceae. Esta palmera es nativa del noroeste de México (Sonora occidental y Baja California Sur) (Felger et al., 2001). Puede crecer hasta 30 m de altura, y sus hojas tienen un pecíolo (raquis) de hasta 1 m de largo, incluyendo los foliolos, pueden alcanzar hasta 2 m de largo.

La palmera washingtonia requiere pleno sol para su crecimiento y suelos permeables con altos contenidos en nutrientes. Sin embargo, esta planta también puede crecer en suelos pobres y resiste temperaturas bajas (resisten a -5 °C) y el déficit hídrico (Roberts 1989). La washingtonia robusta ha sido usada como vigas de madera y como material para cubrir los tejados (Roberts 1989), y tiene un amplio uso en horticultura (Simon et al. 2010). Esta planta se poda a menudo, cada 3 a 4 meses, lo que induce una tasa de crecimiento más rápida (Downer et al. 2009). Esta práctica agrícola genera un gran volumen de residuos de poda, que generalmente se eliminan en vertederos.

Los adhesivos utilizados en este estudio han sido urea-formaldehído (UF) y almidones y harinas de cereales y patata.

1.5. Proceso de elaboración de los tableros de partículas.

El proceso de fabricación de los tableros fue mediante proceso seco y consistió en las siguientes actividades:

- Corte y desfibrado de las especies vegetales mediante una desfibradora de cuchillas de eje horizontal.
- Secado de las partículas.
- Tamizado de las partículas obtenidas clasificándose según el tamiz en el que son retenidas de < 0,25, 1, 2, y 4 mm.
- Mezclado de distintas proporciones y tamaños de partículas y adhesivos, según el prototipo de tablero a fabricar.

Clara Eugenia Ferrández García

- Formado de la manta del tablero en un molde de dimensiones 35x 50 y 40 x 60 cm con un tratamiento previo de protección del molde con film de polietileno de alta temperatura para facilitar el desmoldeo.
- Prepresado de forma manual hasta enrasar la manta.
- Presado en prensa de platos calientes variando el tiempo, la presión y temperatura según ell tipo de tablero.
- Enfriado de los tableros al aire a una temperatura de 20° C, y humedad ambiente de 65 %.
- Refrentado y escuadrado de los bordes mediante una cortadora mecánica.

1.6. Ensayos experimentales para la evaluación de los tableros.

Para la realización de cada uno de los ensayos es necesaria la obtención de las probetas con las dimensiones apropiadas y debidamente acondicionadas según indican las normas EN para cada ensayo.

En la industria del tablero el muestreo de las probetas de cada tablero debe estar de acuerdo con la norma EN 326-1 (1995). Dicha norma establece el número de probetas necesarias en función de las dimensiones del tablero (como indica la figura 1), siendo las dimensiones de cada probeta las indicadas para cada ensayo según la norma EN 325 (1995) (determinación de las dimensiones de las probetas).

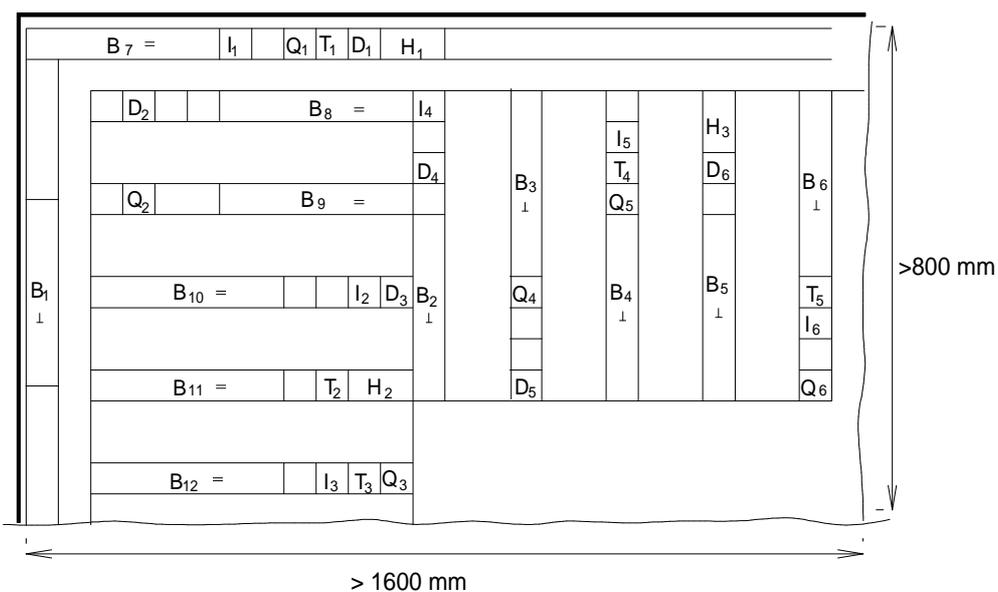


Figura 1. Plano de corte para la elaboración de las probetas de ensayo de un tablero.

Clara Eugenia Ferrández García

Los prototipos de tableros fabricados con una superficie de 600 x 400 mm, se cortaron de acuerdo al esquema adaptado a la norma (considerando el tamaño de las probetas, el número necesario de probetas y los ensayos que se deben realizar), mostrado en la figura 2.

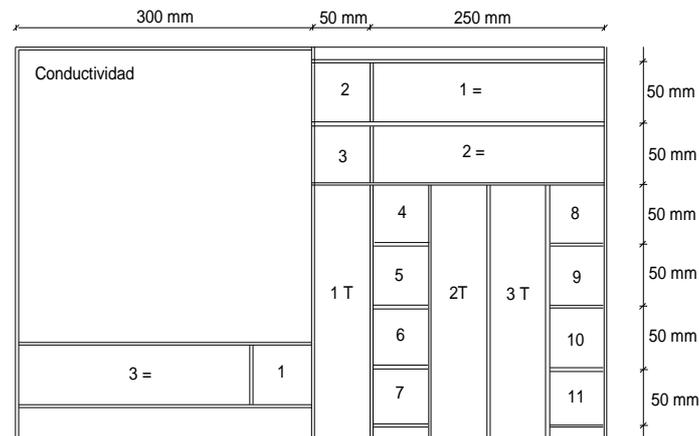


Figura 2. Esquema de despiece del tablero prototipo

Ensayos experimentales.

Los ensayos consistieron en la obtención de la densidad y humedad de las probetas, la determinación del Módulo de Elasticidad en flexión (MOE) y de la resistencia característica a flexión, la resistencia a tracción perpendicular, el hinchamiento en espesor después de 2 y 24 horas de inmersión en agua, absorción de agua después de 24 horas de inmersión, resistencia al arranque de tornillo en la cara del tablero y el ensayo para determinar la conductividad térmica.

A) Densidad de los tableros.

Para la determinación de la densidad se siguió la norma EN 323 (1994). “Tableros derivados de la madera. Determinación de la densidad”.

Como instrumento de medida se utilizaron un micrómetro con precisión de 0,01mm, un calibre de precisión 0,1 mm y una balanza de 0,01g.

Las probetas se cortaron en dimensiones de 50x50 mm de lado y se mantuvieron con las condiciones del laboratorio a una humedad relativa de $65 \pm 5\%$ y una temperatura de

Clara Eugenia Ferrández García

$20 \pm 2^\circ$ C. El espesor t , se midió en el punto de intersección de las diagonales. Además del espesor t , se midieron el largo y ancho (b_1 y b_2) en mm y se pesaron las probetas, siendo m el peso en gramos.

La densidad de cada probeta en kg/m^3 , se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{b_1 \cdot b_2 \cdot t} \times 10^6 \quad (1)$$

B).- Ensayo de humedad.

Para la determinación del contenido de humedad de los tableros se aplicó la norma EN 322 (1993). Esta norma se fundamenta en la determinación por pesada de la pérdida de masa en la probeta, entre su estado en el momento del muestreo y después de secar hasta masa constante a $(103 \pm 2)^\circ$ C .

Los aparatos utilizados fueron una balanza graduada en 0,01 g, y una estufa de circulación forzada regulable a $(103 \pm 2)^\circ$ C.

Las probetas utilizadas para este ensayo tuvieron dimensiones rectangulares y una masa inicial de (20 ± 1) g.

La humedad H de cada probeta, se expresa como tanto por ciento de la masa, con una aproximación del 0,1%, mediante la siguiente fórmula:

$$H = \frac{m_H - m_0}{m_0} \times 100 \quad (2)$$

donde

m_H es la masa inicial de la probeta en gramos;

m_0 es la masa de la probeta después del secado en gramos.

C) Ensayo a flexión.

El ensayo a flexión se realizó de acuerdo con la norma UNE EN 310 (1994). “Tableros derivados de madera. Determinación del Módulo de Elasticidad en flexión y de la resistencia a la flexión”.

El ensayo se realiza aplicando una carga en el centro de la probeta, que se encuentra apoyada en dos puntos.

Clara Eugenia Ferrández García

En función del espesor del tablero t , se fijan las medidas de apoyos de los rodillos así como las del vuelo que tiene que tener el tablero. Es decir: $L_1 = 20 \cdot t$ y $L_2 = L_1 + 50$. (Medidas en mm)-

Teniendo en cuenta que los diámetros de los cilindros de carga están normalizados, las probetas se definen pues en función del espesor con un ancho fijo de 50 mm. El largo se cortará en función de la dimensión L_2 que define la norma y los apoyos se regulan en base a L_1 , y $L_{1/2}$

La resistencia a flexión f_m (en N/mm²), de cada probeta, se calcula de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$f_m = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot L_1}{2 \cdot b \cdot t^2} \quad (3)$$

donde:

F_{max} es la carga máxima en Newton.

L_1 es la distancia entre los ejes de apoyo en mm.

b es la anchura de la probeta en mm.

t es el espesor de la probeta en mm.

El módulo de elasticidad en flexión E_m en N/mm², de acuerdo con la norma UNE para el ensayo de flexión de cada probeta, se define como indica la siguiente ecuación:

$$E_m = \frac{[L_1^3 \cdot (F_2 - F_1)]}{[4 \cdot b \cdot t^3 (a_2 - a_1)]} \quad (4)$$

Siendo:

F_1 el valor de la carga correspondiente a aproximadamente un 10% del valor de la carga máxima en Newton que corresponde a un valor de a_1 de deformación en mm.

F_2 , corresponde a aproximadamente un 40% del valor de la carga máxima; a_2 , es el valor de la deformación en dicho punto.

D) Ensayo de cohesión interna.

Para determinar la resistencia a tracción perpendicular a las caras (cohesión interna) de los tableros se siguió lo indicado en la norma UNE EN 319 (1994).

El fundamento de dicho ensayo consiste en determinar la carga máxima aplicada en relación con la superficie de la probeta.

Clara Eugenia Ferrández García

Las probetas medían 50 ± 1 mm de lado, con cantos rectos y limpios.

Las probetas y los bloques metálicos se acondicionaron hasta masa constante en una atmósfera de humedad media relativa (65 ± 5) % y temperatura de $(20 \pm 2)^\circ$ C.

Las probetas se encolaron posteriormente sobre el bloque metálico mediante colas termofusibles y se mantuvieron durante 24 horas en condiciones ambientales controladas antes de ensayarlas. Posteriormente se colocó el conjunto bloque-probeta en los tacos de agarre y se aplicó el esfuerzo de tracción hasta rotura.

La carga se aplica a velocidad constante durante todo el ensayo de forma que se alcance la carga máxima en (60 ± 30) segundos. Los resultados de cada ensayo se obtuvieron con la siguiente fórmula y se expresan en N/mm^2 .

$$f_{t\perp} = \frac{F_{m\acute{a}x.}}{a \cdot b} \quad (5)$$

Donde:

$F_{m\acute{a}x.}$, es la carga de rotura, en Newton.

a y b , son la longitud y ancho de la probeta en milímetros.

La resistencia a la tracción perpendicular de cada tablero se toma como la media aritmética del conjunto de los resultados obtenidos sobre todas las probetas muestreadas de ese tablero.

E) Ensayo de la hinchazón en espesor.

Para determinar la hinchazón en espesor después de inmersión en agua se aplica la norma UNE EN 317 (1994).

Las probetas son de forma cuadrada de (50 ± 1) mm de lado.

Procedimiento operatorio:

- Medición del espesor.
- Inmersión: Se sumergen las probetas en posición vertical, en agua limpia, en reposo y con un pH de 7 ± 1 y una temperatura de $(20 \pm 1)^\circ$ C, la temperatura se mantiene durante el ensayo. Las probetas se mantienen separadas entre sí, así como del fondo y las paredes de la cubeta. Durante el ensayo los cantos superiores de las probetas quedarán sumergidos a (25 ± 5) mm. El tiempo de inmersión es de 24 h.

Clara Eugenia Ferrández García

- Medición del espesor después de inmersión: Una vez finalizado el tiempo de inmersión se sacan las probetas del baño, se elimina el exceso de agua y se mide el espesor.

Finalmente se calcula la hinchazón en espesor de cada probeta Gt , expresada en tanto por ciento sobre su espesor inicial, mediante la fórmula:

$$Gt = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \cdot 100 \quad (6)$$

donde:

t_1 es el espesor de la probeta antes de inmersión, en mm.

t_2 es el espesor de la probeta después de inmersión, en mm.

La hinchazón en espesor para un tablero se considera la media aritmética de los resultados de todas las probetas tomadas de cada tablero.

F) Ensayo de determinación de la resistencia al arranque de tornillos.

En la norma EN 320 (1994) se establece el método de ensayo para determinar dicha resistencia.

Se determina la resistencia al arranque de tornillos sobre la cara midiendo la fuerza requerida para arrancar un tornillo normalizado de la probeta.

Las probetas son cuadradas con un lado de (50 ± 1) mm. Después del acondicionamiento de las probetas, se taladran perpendicularmente a la superficie en el punto central de la cara y de los bordes adyacentes y se insertan los tornillos en los orificios pretaladrados.

Se ejerce una fuerza axial sobre la parte interior de la cabeza del tornillo y se va incrementando a través del dispositivo, hasta que se alcanza la carga máxima.

Siendo la resistencia la fuerza máxima en función del espesor de la probeta

$$\frac{F_{max}}{t} \left(\frac{N}{mm} \right) \quad (9)$$

Los valores de resistencia al arranque de tornillos sobre las caras del tablero se calcula como las medias aritméticas de los resultados de todas las probetas del tablero.

Clara Eugenia Ferrández García

G) Conductividad térmica

Los materiales aislantes térmicos se caracterizan por una baja conductividad térmica. El procedimiento de ensayo para determinar la conductividad en los materiales de construcción se encuentra recogido fundamentalmente en la norma EN 12667 (2002).

Dentro de la norma de ensayo se recogen dos posible métodos: el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. Ambos métodos son igualmente válidos, siendo el hecho diferencial entre ellos que el primero es un método absoluto y el segundo un método relativo, es decir, esta basado en una calibración previa del equipo realizada con un material cuya conductividad térmica es conocida y está certificada.

El método más implantado actualmente es el método del equipo medidor de flujo de calor debido fundamentalmente a la rapidez con la que se realizan las medidas. Para determinar la conductividad térmica en el estado estacionario del material se emplea la siguiente ecuación:

$$\frac{dQ}{\Delta T} = \frac{\lambda}{e} = \frac{1}{R} \quad (10)$$

donde:

dQ es el flujo de calor, obtenido a partir de las constantes de calibración de los medidores de flujo de calor y de la señal eléctrica que proporcionan (en W/m^2)

ΔT es la diferencia de temperatura establecida entre los dos lados de la muestra (en K)

λ es la conductividad térmica de la muestra (en $\text{W/m}\cdot\text{K}$)

e es el espesor de la muestra (en metros)

R es la resistencia térmica de la muestra (en $\text{m}^2\cdot\text{K/W}$)

A , es la sección de la base de la probeta en milímetros.

2.- OBJETIVOS

Clara Eugenia Ferrández García

2. OBJETIVOS.

Esta tesis doctoral, por conjunto de publicaciones, tiene como objetivo la valorización de residuos vegetales lignocelulósicos como materia prima fácilmente renovable para la obtención de tableros de partículas resistentes y aislantes (para su uso en los sectores de la construcción y el mueble), y como componente de sustratos hortícolas. De esta forma se podría suministrar una alternativa sostenible al uso de madera y turba, dándole una salida medioambiental segura a estos residuos.

Para ello se han propuesto cuatro estudios mostrados en los cuatro artículos que se utilizarán para la defensa de la Tesis Doctoral. Los objetivos específicos de cada uno de ellos han sido:

- Utilizar la caña común como materia prima para elaborar tableros de partículas y así ayudar al control de esta planta invasora, dándole un valor añadido. Evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los tableros elaborados para averiguar si son comparables a los tableros tradicionales de partículas de madera. Y de esta forma ofrecer una alternativa como material lignocelulósico a la industria de la madera.
- Caracterizar algunos parámetros agrícolas e industriales de diferentes partes de la caña común para evaluar su potencial como sustrato hortícola y como materia prima para la elaboración de paneles de aislamiento térmico.
- Caracterizar algunos parámetros agrícolas e industriales de los residuos de poda de *Washingtonia robusta* para evaluar su potencial como sustrato hortícola y como materia prima para la elaboración de tableros de partículas para el sector de la construcción.
- Elaborar paneles ecológicos utilizando partículas de caña común (*Arundo donax* L.) como sustrato lignocelulósico, de bajo coste y adhesivos basados en almidones no modificados y harinas de cereales.

3.- PUBLICACIONES

Valorización agroindustrial de residuos lignocelulósicos (*Arundo donax* L.,
Washingtonia robusta H. Wendl)

3. Publicaciones

Clara Eugenia Ferrández García



EVALUATION OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF PARTICLEBOARD MADE FROM GIANT REED (*ARUNDO DONAX* L.)

Teresa García-Ortuño, Javier Andréu-Rodríguez, María T. Ferrández-García, Manuel Ferrández-Villena, and Clara. E. Ferrández-García *

Clara Eugenia Ferrández García

PEER-REVIEWED ARTICLE

bioresources.com

EVALUATION OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF PARTICLEBOARD MADE FROM GIANT REED (*ARUNDO DONAX* L.)

Teresa García-Ortuño, Javier Andréu-Rodríguez, María T. Ferrández-García, Manuel Ferrández-Villena, and Clara. E. Ferrández-García *

Single-layer experimental particleboards were made from various sizes of *Arundo donax* particles bonded with urea formaldehyde resin. The experimental panels were tested for their mechanical strength including modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), internal bonding (IB), screw holding strength (SH), and physical properties (density, moisture content, thickness swelling (TS), and water absorption (WA)) according to the procedures defined by European Union (EN) Standards. The overall results showed that most panels exceeded the EN Standards for MOE, MOR, and IB. The mechanical properties of the particleboard were enhanced as the density increased. Particle size was found to have a profound effect on the board properties.

Keywords: Giant reed; *Arundo donax* L.; Particleboard; Particle size; Mechanical properties

Contact information: Department of Engineering, Escuela Politécnica Superior de Orihuela, Universidad Miguel Hernández de Elche, Spain. * Corresponding author: cferrandez@umh.es

INTRODUCTION

Particleboard is a wood-based panel product manufactured under pressure and temperature from particles of wood or other lignocellulosic fibrous materials and a binder. It is used widely in the manufacture of furniture, floor underlayment, and interior decoration (wall and ceiling panelling) (Anonymus 1996). The primary lignocellulosic materials used in the particleboard industry are woods, but non-woods plant fibers and agro-based residues have also been investigated for producing particleboard. The use of agricultural residues as a raw material in the forest industry dates back to 1900s for pulp and panel industry (Çopur et al. 2007). The literature review by Youngquist and co-workers (1994) cited 1165 research reports worldwide on use of non-wood plant fibers for building materials and panels from 1913 to 1993. In the last decade, research has been carried out on a wide variety of annual plants and agricultural residues such as: wheat straw (Han et al. 1998; Mo et al. 2003), rice husk (Ciannamea et al. 2010), cotton carpel (Alma et al. 2005), cotton stalks (Guler and Ozen 2004), peanut shell flour (Batalla et al. 2005), peanut hull (Guler et al. 2008), almond shell (Gürü et al. 2006), flax shiv (Papadopoulos and Hague 2003), sunflower stalks (Guler et al. 2006; Khristova et al. 1998), eggplant stalks (Guntekin and Karakus 2008), date palm (Nemli et al. 2001), vine prunings (Ntalos and Grigoriou 2002), kenaf (Grigoriou et al. 2000), hazelnut husk (Çöpur et al., 2008), bamboo chips (Papadopoulos et al, 2004), and sugar cane bagasse-bamboo (Lee et al. 2005).

García-Ortuño et al. (2011). "Particleboards from Giant reed," *BioResources* 6(1), 477-486. 477

Clara Eugenia Ferrández García

PEER-REVIEWED ARTICLE

bioresources.com

In the last decade, European agricultural research has focused much attention on the search for new, non-food crops with regard to their industrial utilisation. The grass *Arundo donax* L. (giant reed) (Poacea) has been considered as one of the more-promising crops (EC FAIR-CT96-2028 Project, 2001) (Shatalov and Pereira 2005). Giant reed is a perennial, herbaceous species growing in grasslands and wetlands, and is an invasive, riparian plant and potential bioenergy crop (Lewandowski et al. 2003; Graziani and Steinmaus 2009). Giant reed is thought to have originated from Asia, but it is also considered as a native species in the countries surrounding the Mediterranean Sea. From this area, it has become widely dispersed by man into all of the subtropical and warm-temperate areas of the world because of its multiple uses (Lewandowski et al. 2003). In the Southeast of Spain, giant reed was used as a building material (walls, frameworks, roofs, fences) for livestock and housing and for erosion control until the beginning of the 20th century. Giant reed has invaded the River Segura Basin (Southern Spain), consuming water from this river that is needed for agricultural use. Large clumps alter stream flow patterns, increase flood damage (Frandsen and Jackson, 1994; Moran and Goolsby 2009), and displace populations of native plants and animals (Bell 1997; Herrera and Dudley 2003). Physical (burning), mechanical (mowing or mulching), and chemical control (Tracy and DeLoach 1999) are the methods commonly used to solve these problems, but they do not have sufficient impact. In this research giant reed culms were used to manufacture particleboard panels in order to give added value to the residue.

Many reports appear in the literature on studies concerned with the effect of particle geometry and alignment on the resultant particleboard strength properties (Kelly 1977). Lee et al. (2006) investigated the influence of fiber morphology, slenderness ratios, and fiber mixing combinations on the mechanical and physical properties of agro-based MDF. They concluded that the material geometry and fiber refinement influenced the mechanical properties of agro-based MDF. Pan et al. (2007) studied the effect of the particle size on the physical and mechanical properties of particleboard made from saline eucalyptus. They found differences in the properties of the resultant particleboards; those that had been manufactured with the medium-sized particles had better qualities.

To the best of our knowledge there have been no other studies to investigate the feasibility of manufacturing particleboards from giant reed. Therefore, the objectives of this study are to use particles from giant reed culms, of different sizes, as a raw material for laboratory-made particleboard panels and to test the properties of such boards to determine if they are comparable to particleboards made from other species.

EXPERIMENTAL

Materials

Giant reed culms (*Arundo donax* L.), were purchased from a commercial factory in Alicante (Spain) and were dried for 6 months under ambient conditions, to 8.6% moisture content, before use. The average culm height and diameter were 5.5 m and 2 cm, respectively. After removing any remains of plumes and leaves, the culms were manually cut into slices (ca. 40cm long) and chipped in a laboratory-scale ring-knife chipper, equipped with a screen having 10-mm openings. The particles were then

García-Ortuño et al. (2011). "Particleboards from Giant reed," *BioResources* 6(1), 477-486. 478

Clara Eugenia Ferrández García

PEER-REVIEWED ARTICLE [bioresources.com](http://www.bioresources.com)

classified, using a horizontal screen shaker with sieves of 8-4-2-1-0.25 mm to remove oversize and undersize (dust) particles. A combination of the fractions retained on each sieve was used for the panel manufacture (Table 1). A sample of the different sizes of the particles can be seen in Fig. 1.

Table 1. Combination of Particles used for Particleboard Manufacture

Board Type	Fractions retained on the sieves			
	0.25 mm	1.00 mm	2.00 mm	4.00 mm
A	50.0%	50.0%		
B	33.3%	33.3%	33.3%	
C		50.0%	50.0%	
D		33.3%	33.3%	33.3%
E			50.0%	50.0%



Fig 1. Giant reed particles (from left to right fractions retained on the following sieves 0.25,1,2,4 and 8 mm).

Particles were blended with urea formaldehyde (UF) resin with a solid content of 64 to 66 %, at the level of 8%, based on the weight of particles (8.6% moisture content). As a hardener, 0.4% of ammonium sulphate, based on the weight of particles (8.6% moisture content), was used. Some chemical and anatomical characteristics of giant reed are shown in Table2.

Methods

Five types of panel were made. Pre-weighed raw material was placed into a laboratory drum glue blender (Model LGB 100; IMAL S.r.l., Modena, Italy). Before spraying the resin, the hardener was dissolved at a 4% concentration in water and immediately mixed with the adhesive. The glue mixture was then sprayed onto the particles with pneumatic nozzles and blended for 5 min at ambient temperature to obtain a homogenized mixture. No wax or other hydrophobic substances were used. The mat configuration was single layer. Boards measuring 50 cm x 35 cm were manually formed and pressed in a hot press at 3.5 N/mm², at 120° C, for 6 min. The experimental design is shown in Table 3.

Clara Eugenia Ferrández García

PEER-REVIEWED ARTICLE

bioresources.com

Table 2. Chemical and Anatomical Characteristics of *Arundo donax* Stems

Component	Shatalov et al. (2001)		Ververis et al. (2004)		Pascoal Neto et al. (1997)		Caparrós et al. (2006)
	Node	Internode	Node	Internode	Node	Internode	
Ash (% o.d. reed)	4.77	6.14	5.33	4.53	3.03	3.80	3.00
Silicates	1.31	1.16					
Extractives (% o.d. reed)	13.04	11.16			18.07	18.30	
Dichlorometane	0.46	0.37					
Ethanol	5.88	4.18					9.10
Hot water	6.70	6.61					
Lignin (% o.d. reed)	20.92	21.31			17.70	19.40	23.00
Klason	19.03	19.60	18.30	18.33			
Acid-soluble	1.89	1.71					
Holocellulose	61.21	61.41			57.70	62.17	64.50
α -Cellulose	29.18	32.93	32.43	36.27	30.80	34.63	34.80
Hemicelluloses	32.03	28.48					
Parenchyma (%)	55.80	59.80					
Fibre (%)	37.90	33.90					
Vascular tissue (%)	6.40	6.20					
Fibre length (mm)	1.20	1.20	1.18	1.22			
Fibre width (μ m)	16.90	14.60					
Fibre wall thickness (μ m)	5.30	4.60	5.60	4.40			
Fibre diameter (μ m)			18.80	17.30			
Lumen diameter (μ m)			8.60	8.50			

Table 3. Production Parameters of Single-Layer Particleboards

Parameter	Value
Press temperature ($^{\circ}$ C)	120
Pressing time (min)	6
Press pressure (N/mm ²)	3.5
Dimensions (mm)	500x350
Thickness (mm)	7.25-10.61
Number of boards of each type	2

Two replicate panels were made for each board type. After pressing, the particleboards were conditioned at 20 $^{\circ}$ C and 65% relative humidity for four weeks in a vertical position (Fig. 2). The finished particleboards were trimmed to avoid edge effects to a final size of 50 cm x 35 cm, and then cut into various sizes for property evaluation according to EN 326-1 (1999) (Fig. 3).

García-Ortuño et al. (2011). "Particleboards from Giant reed," *BioResources* 6(1), 477-486. 480

Clara Eugenia Ferrández García

PEER-REVIEWED ARTICLE

bioresources.com



Fig 2. (left) Finished particleboards during conditioning at 20 °C and 65% relative humidity;
Fig 3. (right) Particleboard samples stored after the assessment

Some physical properties were determined in accordance with appropriate EN standards: moisture content (MC) (EN 322, 1993), density (EN 323, 1993), water absorption (WA), and thickness swelling (TS) after a 24-hour immersion (EN 317, 1993). The mechanical properties determined were: modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) (EN 310, 1993), internal bond strength (IB) (EN 319, 1993), and screw holding strength (SH) (EN 320, 1993). Each panel was cut to get one MC sample (rectangular and 20 g in weight), six density samples (50 mm x 50 mm), three WA/TS samples (70 mm x 70 mm), six MOR/MOE samples (different lengths, depending on the thickness, x 50 mm width), three IB samples (50 mm x 50 mm), and three SH samples (50 mm x 50 mm).

Tests for mechanical properties, WA, TS, and density were conducted on an Imal universal testing machine (Model IB600, Modena, Italy).

Data for each test were analysed statistically. Analysis of variance (ANOVA) and *t*-test calculations were used to test ($\alpha = 0.05$) for significant difference between factors and levels. When the ANOVA indicated a significant difference among factors and levels, a comparison of the means was performed, employing Duncan's test to identify which groups were significantly different at the 95% confidence level.

RESULTS AND DISCUSSION

Physical Properties

The density ranged from 628.33 to 758.11 kg/m³. The thickness of the produced particleboards ranged 7.25 to 10.61 mm. And the moisture content ranged from 6.25 to 10.61 %. Water absorption and thickness swelling test results are shown in Table 4. Particleboards should have a maximum thickness swelling value of 16% for 24-h immersions, for load bearing (EN 312, 2003). Average thickness swelling of the specimens following a 24-h immersion ranged from 15.04% to 35.9 %. Panels C and D were found to comply with thickness swelling values for load bearing and had the highest densities. The TS values increased with decreasing the board density, except for panel E.

Clara Eugenia Ferrández García

PEER-REVIEWED ARTICLE

bioresources.com

Table 4. Mean Values of Physical Properties of Particleboards

Type	D (kg/m ³)	MC (%)	Thickness (mm)	TS (%) 24 h	WA (%) 24 h
A	687.43 (30.22)b	7.01	9.87 (0.40)	27.85 (4.69)b	67.79 (5.56)b
B	682.79 (89.38)b	6.25	7.25 (1.78)	35.91 (5.06)a	79.23 (8.19)a
C	738.52 (16.95)a	7.09	8.85 (0.33)	15.04 (0.54)c	42.82 (3.58)d
D	758.11 (17.93)a	7.06	8.50 (0.58)	15.95 (1.36)c	42.31 (0.91)d
E	628.33 (45.56)c	7.45	10.61 (1.16)	28.71 (4.56)b	61.23 (3.73)c

Requirements ^A

16.00

Values with the same letter in the same column are not significantly different based on Duncan's multiple-range test at the 0.05 significance level.

Values in parentheses are standard deviations.

^A Maximum requirement for load bearing under dry conditions, according to EN 312 (2003) standard.

Panel E had the lowest density, the highest thickness, and was manufactured with the biggest particle size. These properties may be attributable to an insufficient application of pressure during the compression of the mat. Kelly (1977) reported that a higher pressure was required to reach a desired specific gravity for narrower and thicker flakes as opposed to wider and thinner flakes.

Mechanical Properties

The average values of modulus of rupture, modulus of elasticity, internal bond, and screw-holding strength are given in Table 5.

Table 5. Mean Values of Mechanical Properties of Particleboards

Type	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	IB (N/mm ²)	SH (N/mm)
A	13.67 (1.66)b	2394.74 (495.74)b	0.258 (0.177)d	42.19 (10.59)d
B	13.67 (1.61)b	2812.08 (360.35)a	0.350 (0.155)cd	41.69 (25.21)d
C	17.67 (2.10)a	3025.90 (290.92)a	1.026 (0.232)b	95.37 (4.54)b
D	17.10 (1.36)a	2997.51 (357.60)a	1.309 (0.148)a	120.43 (6.63)a
E	9.93 (2.93)c	1467.86 (50.19)c	0.543 (0.079)c	63.21 (9.05)c

Requirements ^A

12.5

N/A

0.28

N/A

Requirements ^B

13.0

1800.00

0.40

N/A

Requirements ^C

15.0

2300.00

0.45

N/A

Values with the same letter in the same column are not significantly different based on Duncan's multiple-range test at the 0.05 significance level.

Values in parentheses are standard deviations.

^A For general uses according to EN 312 (2003) standard.

^B For interior grade type (including furniture), according to EN 312 (2003) standard.

^C For load bearing under dry conditions, according to EN 312 (2003) standard.

Clara Eugenia Ferrández García

PEER-REVIEWED ARTICLE

bioresources.com

Based on EN standards, 12.5 N/mm² and 13 N/mm² are the minimum requirements for MOR of particleboards for general uses and furniture manufacturing, respectively (EN 312, 2003). There is no minimum requirement for MOE for general uses, and for furniture manufacturing the value is 1800 N/mm² (EN 312, 2003). The values of MOR ranged from 9.93 to 17.67 N/mm². The values of MOE lay between 1467.86 and 3025.90 N/mm². Particleboards made from smaller particles (types A and B) had MOR and MOE values that are sufficiently high to meet the requirements for general uses and furniture manufacturing. Panels C and D exceeded the requirements for load bearing, while panel type E had lower MOR and MOE values than those specified. Panels having the greatest densities had the greatest values of MOR and MOE, suggesting that the particleboard density plays a very-important role on the bending strength, as expected.

The IB strength values obtained ranged from 0.258 to 1.309 N/mm². Particleboards types C, D, and E had IB values that met the requirements for load bearing. Panel type B achieved the level of internal bond required for general purposes, while type A had the worst IB value. This indicates that the IB strength increases with increasing particle size.

CONCLUSIONS

The results presented here suggest that it is completely feasible to manufacture acceptable or high-quality particleboard using giant reed as an alternative lignocellulosic raw material. Since particleboards produced with particles of sizes from 1 to 2 mm and 1 to 4 mm had the most desirable quality, the production of such sizes is recommended for the milling of the culms.

Particle size was found to have a great effect on the properties of UF-bonded giant reed particleboards manufactured from particles of five different sizes.

Since boards are considered high-value, long-life products - they have life expectancies of several decades - productive giant reed systems could be considered a carbon sink. The use of renewable materials such as giant reed for manufacturing particleboards could help to alleviate the scarcity of raw material for the particleboard industry.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to acknowledge Dr. David J. Walker for his revision of the written English. This work has been financed by the Ministerio de Ciencia e Innovación of Spain (MICCIN, BIA 2009-11605).

REFERENCES CITED

García-Ortuño et al. (2011). "Particleboards from Giant reed," *BioResources* 6(1), 477-486. 483

Clara Eugenia Ferrández García

PEER-REVIEWED ARTICLE

bioresources.com

- Alma, M. H., Kalaycioglu, H., Bektas, A., and Tutus, A. (2005). "Properties of cotton carpel-based particleboards," *Ind. Crops Prod.* 22, 141-149.
- Anonymous (1996). *Particleboard – From Start to Finish*, National Particleboard Association. Gaithersburg, Maryland, USA
- Batalla, L., Nuñez, A. J., and Marcovich, N. E. (2005). "Particleboards from peanut-shell flour," *J. Appl. Polym. Sci.* 97, 916-923.
- Bell, G. P. (1997). "Ecology and management of *Arundo donax*, and approaches to riparian habitat restoration in Southern California," In: Brock, J. H., Wade, M., Pysek P., and Green D. (eds.), *Plant Invasions: Studies from North America and Europe*, Blackhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, 103-113.
- Caparrós, S., Ariza, J., Hernanz, D., and Díaz, M. J. (2006). "*Arundo donax* L. valorization under hydrothermal and pulp processing," *Ind. Eng. Chem. Res.* 45, 2940-2948.
- Ciannamea, E. M., Stefani, P. M, and Ruseckaite, R. A. (2010). "Medium-density particleboards from modified rice husks and soybean protein concentrate-based adhesives," *Biores. Technol.* 101, 818-825.
- Çöpur, Y., Guler, C., Tasçioglu, C., and Tozluoglu, A. (2008). "Incorporation of hazelnut shell and husk in MDF production," *Bioresour. Technol.* 99, 7402-7406.
- Çöpur, Y., Guler, C., Akgül, M., and Tasçioglu, C., (2007). "Some chemical properties of hazelnut husk and its suitability for particleboard production," *Build. Environ.* 42 2568-2572.
- EN 310 (1993). "Wood-based panels. Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength."
- EN 312 (2003). "Particleboards. Specifications."
- EN 317 (1993). "Particleboards and fibreboards. Determination of swelling in thickness after immersion in water."
- EN 319 (1993). "Particleboards and fibreboards. Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board."
- EN 320 (1993). "Fibreboards. Determination of resistance to axial withdrawal of screws."
- EN 322 (1993). "Wood-based panels. Determination of moisture content."
- EN 323 (1993). "Wood-based panels. Determination of density."
- EN 326-1(1994). "Wood-based panels. Sampling and cutting of test pieces and expression of test results."
- Frandsen, P., and Jackson, N. (1994). "The impact of *Arundo donax* on flood control and endangered species," In: Jackson, N. E., Frandsen, P., and Duthoit, S. (Compilers), *Arundo donax* Workshop Proceedings, 19 November 1993, Ontario, California, USA. Team Arundo and California Exotic Pest Plant Council, Pismo Beach, CA, pp. 13-16.
- Graziani, A., and Steinmaus, S. J. (2009). "Hydrothermal and thermal time models for the invasive grass, *Arundo donax*," *Aquatic Botany* 90, 78-84.
- Grigoriou, A., Passialis, C., and Voulgaridis, E. (2000). "Experimental particleboards from kenaf plantations grown in Greece," *Holz als Roh- und Werkstoff* 58, 309-314.
- Guler, C., and Ozen, R. (2004). "Some properties of particleboards made from cotton stalks (*Gossypium hirsutum* L.)," *Holz als Roh- und Werkstoff* 62, 40-43.

García-Ortuño et al. (2011). "Particleboards from Giant reed," *BioResources* 6(1), 477-486. 484

Clara Eugenia Ferrández García

PEER-REVIEWED ARTICLE

bioresources.com

- Guler, C., Bektas, I., and Kalaycioglu, H. (2006). "The experimental particleboard manufacture from sunflower stalks (*Helianthus annuus* L.) and calabrian pine (*Pinus brutia* ten.)," *Forest Prod. J.* 56(4), 56-60.
- Guler, C., Copur, Y., and Tascioglu, C. (2008). "The manufacture of particleboards using mixture of peanut hull (*Arachis hypogaea* L.) and European Black pine (*Pinus nigra* Arnold) wood chips," *Biores. Technol.* 99, 2893-2897.
- Guntekin, E., and Karakus, B. (2008). "Feasibility of using eggplant (*Solanum melongena*) stalks in the production of experimental particleboard." *Ind. Crops Prod.* 27(3), 354-358.
- Gürü, M., Tekeli, S., and Bilici, I. (2006). "Manufacturing of urea-formaldehyde-based composite particleboard from almond shell," *Mater. Des.* 27, 1148-1151.
- Han, G., Zhang, C., Zang, D., Umamura, K., and Hawai, S. (1998). "Upgrading of urea formaldehyde-bonded reed and wheat straw particleboards using silane coupling agents," *J. Wood Sci.* 44, 282-286.
- Herrera, A. M., and Dudley, T. L. (2003). "Reduction of riparian arthropod abundance and diversity as a consequence of giant reed (*Arundo donax*) invasion," *Biological Invasions* 5, 167-177.
- Kelly, M. W. (1977). "Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboard," Gen. Tech. Rept. FPL-10. USDA Forest Serv., Forest Prod. Lab., Madison, Wisconsin. USA
- Khristova, P., Yossifov, N., Gabir, S., Glavche, I., and Osman, Z. (1998). "Particleboards from sun flower stalks and tannin-modified UF resin," *Cellul. Chem. Technol.* 32, 327-337.
- Lee, S., Shupe, T. F., and Hse, C. Y. (2006). "Mechanical and physical properties of agro-based fibreboard," *Holz als Roh- und Werkstoff* 64, 74-79.
- Lewandowski, I., Scurlock, J. M. O., Lindvall, E., and Christou, M. (2003). "The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe," *Biomass Bioenerg.* 25, 335-361.
- Mo, X., Cheng, E., Wang, D., and Sun, X. S. (2003). "Physical properties of medium density wheat straw particleboard using different adhesives," *Ind. Crops Prod.* 18, 47-53.
- Moran, P. J., and Goolsby, J. A. (2009). "Biology of the galling wasp *Tetramesa romana*, a biological control agent of giant reed," *Biological Control* 49 (2), 169-179.
- Nemli, G., Kalaycioglu, H., and Alp, T. (2001). "Suitability of date palm branches for particleboard production," *Holz als Roh- und Werkstoff* 59, 411-412.
- Ntalos, G. A., and Grigoriou, A. H. (2002). "Characterization and utilisation of vine prunings as a substitute for particleboard production," *Ind. Crops Prod.* 16, 59-68.
- Pan, Z., Zheng, Y., Zhang, R., and Jenkins, B. M., (2007). "Physical properties of thin particleboard made from saline eucalyptus," *Ind. Crops Prod.* 26, 185-194.
- Papadopoulos, A. N., and Hague, J. R. B., (2003). "The potential use of *Linum usitatissimum* (flax) chips as a raw lignocellulosic material for particleboards," *Ind. Crops Prod.* 17(2), 143-147.
- Papadopoulos, A. N., Hill, C. A. S., Gkaraveli, A., Ntalos, G. A., and Karastergiou, S. P. (2004). "Bamboo chips (*Bambusa vulgaris*) as an alternative lignocellulosic raw material for particleboard manufacture," *Holz als Roh – und Werkstoff* 62, 36-39.

García-Ortuño et al. (2011). "Particleboards from Giant reed," *BioResources* 6(1), 477-486. 485

Clara Eugenia Ferrández García

PEER-REVIEWED ARTICLE

bioresources.com

- Pascoal Neto, C., Seca, A., Nunes, A. M., Coimbra, M. A., Domínguez, F., Evtuguin, D., Silvestre, A., and Cavaleiro, J. A. S. (1997). "Variations in chemical composition and structure of macromolecular components in different morphological regions and maturity stages of *Arundo donax*," *Ind. Crops Prod.* 6, 51-58.
- Shatalov, A. A., Quilho, T., and Pereira, H. (2001) "*Arundo donax* L. reed: New perspectives for pulping and bleaching -1. Raw material characterization," *TAPPI J.* 84(11), 1-12.
- Shatalov, A. A., and Pereira, H. (2005). "Kinetics of organosolv delignification of fibre crop *Arundo donax* L.," *Ind. Crops Prod.* 21 (2), 203-210.
- Tracy, J. L., and DeLoach, C. J. (1999). "Suitability of classical biological control for giant reed (*Arundo donax*) in the United States," In: Bell C., (ed.), *Arundo and Saltcedar Management Workshop Proceedings*, 17 June, 1998, Ontario, California. University of California Cooperative Extension, Holtville, California.
- Ververis, C., Georghiou, K., Christodoulakis, N., Santas, P., and Santas R. (2004). "Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their suitability for paper production," *Ind. Crops Prod.* 19, 245-254.
- Youngquist, J. A., English, B. E., Scharmer, R. C., Chow, P., and Shook, S. R. (1994). "Literature review on use of nonwood plant fibers for building materials and panels," Gen. Tech. Rept. FPL-GTR-80. USDA Forest Serv., Forest Prod. Lab., Madison, Wisconsin. USA.

Article submitted: October 7, 2010; Peer review completed: November 30, 2010; Revised version received and accepted: December 20, 2010; Published: December 26, 2010.

García-Ortuño et al. (2011). "Particleboards from Giant reed," *BioResources* 6(1), 477-486. 486

Valorización agroindustrial de residuos lignocelulósicos (*Arundo donax* L.,
Washingtonia robusta H. Wendl)

3. Publicaciones

Clara Eugenia Ferrández García



Communications in Soil Science and Plant Analysis

Publication details, including instructions for authors and subscription information:

<http://www.tandfonline.com/loi/lcss20>

Agricultural and Industrial Valorization of *Arundo donax* L.

Javier Andreu-Rodríguez ^a, Eva Medina ^b, M. Teresa Ferrandez-García ^a, Manuel Ferrandez-Villena ^a, Clara Eugenia Ferrandez-García ^a, Concepción Paredes ^b, M. Angeles Bustamante ^b & Joaquín Moreno-Caselles ^b

Clara Eugenia Ferrández García

Communications in Soil Science and Plant Analysis, 44:598–609, 2013
Copyright © Taylor & Francis Group, LLC
ISSN: 0010-3624 print / 1532-2416 online
DOI: 10.1080/00103624.2013.745363



Agricultural and Industrial Valorization of *Arundo donax* L.

JAVIER ANDREU-RODRIGUEZ,¹ EVA MEDINA,²
M. TERESA FERRANDEZ-GARCIA,¹
MANUEL FERRANDEZ-VILLENA,¹
CLARA EUGENIA FERRANDEZ-GARCIA,¹
CONCEPCIÓN PAREDES,² M. ANGELES BUSTAMANTE,²
AND JOAQUÍN MORENO-CASELLES²

¹Department of Engineering, Miguel Hernandez University, Orihuela, Alicante, Spain

²Department of Agrochemistry and Environment, Miguel Hernandez University, Orihuela, Alicante, Spain

*Some agricultural and industrial characteristics of different parts of the giant reed (*Arundo donax* L.) were studied in this work to evaluate their capacity as growing media and for the manufacturing of the insulating board employed in the building sector. Three different particle sizes (>0.25, 1–2, and 2–4 mm) of the stem and rhizome of *Arundo donax* L. (SAD and RAD, respectively) were evaluated on bulk density (BD), total pore space (TPS), air capacity, easily available water (EAW), water buffering capacity (WBC), total water-holding capacity (TWHC), shrinkage, total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), and macro- and microelements. Moreover, density, bending strength, internal bond strength, screw-holding strength, and thermal conductivity were determined in boards manufactured with three different particle sizes (>0.25, 1–2, and 2–4 mm) of the stem of *Arundo donax*. The manufacturing conditions of these boards were three different press pressures (15.7, 21.0, and 26.0 kg cm⁻²) and two press temperatures (120 and 140 °C). With respect to the agricultural value of this vegetative species, most of physical properties were not inside the interval of values for an ideal substrate. Bulk density, TPS, air capacity, and EAW values were greater in SAD substrates than those of RAD-based media. In general, the particle size of different parts of the giant reed had a significant effect on the physical parameters studied. The macro- and microelement contents were low in comparison to peat, except in the cases of K in both substrates types (SAD and RAD) and TN in RAD substrates. In general, no great differences were observed in the chemical properties related to the particle size of media used. On the other hand, the physical and mechanical properties of the fiberboards from giant reed were comparable to those of the wood-based composites, and the thermal conductivity of these boards was similar to that of other environmentally friendly fiberboards. Mechanical and physical properties of the boards were more significantly affected by the particle size and press pressure than by the press temperature.*

Keywords *Arundo donax* L., fiberboard, giant reed, growing media

Address correspondence to Concepción Paredes, Department of Agrochemistry and Environment, Miguel Hernandez University, EPS-Orihuela, Ctra Beniel Km 3.2, 03312 Orihuela, Alicante, Spain. E-mail: c.paredes@umh.es

Clara Eugenia Ferrández García

Introduction

Giant reed (*Arundo donax* L.) belongs to the subfamily *Arundinoideae* of the Gramineae family (Tucker 1990). This plant is native to Asia (Boose and Holt 1999), and it has been widely planted and naturalized in the mild temperate, subtropical, and tropical regions of both hemispheres, especially in the Mediterranean (Lewandowski et al. 2003). It forms dense stands and can grow to 8–9 m, with hollow stems 2 to 3 cm and a growth rate of 0.3–0.7 m week⁻¹ during several months in ideal conditions (Perdue 1958). This vegetative species can grow in different habitats such as disturbed sites, sand dunes, wetlands, and riparian zones.

Arundo donax L. has been cultivated for thousands of years to satisfy local necessities, such as training stakes, baskets, mats, walking sticks, and fishing canes. It also came to be used for roof thatching and cultivated for the production of reeds for musical instruments (Mariani et al. 2010), paper (Abrantes, Maria, and Costa 2007), and energy feedstock (Angelini, Ceccarini, and Bonari 2005). Nowadays, because the majority of these uses have been abandoned or they are not very widespread, this plant is considered an “unwanted organism” in many countries (Thornby, Spencer, and Hanan 2007).

In the Mediterranean countries, usually greenhouse horticulture is developed. Most of these nurseries base their growing media on peat. However, peat is imported from countries of northern and central Europe and has recently become more and expensive. Moreover, peat lands are being rapidly depleted, causing environmental concerns that have led to these countries to limit the extent of peat mining. In addition, environmental constraints and recycling requirements of organic wastes have suggested possible uses of wastes of organic origin, such as their use as substrate or substrate component instead of peat (Abad, Noguera, and Bures 2001). Thus, the giant reed not only could be considered as an appreciable low-priced organic ingredient for horticultural substrates, but also its use can constitute a suitable way to protect the environment and to conserve natural resources such as peat.

Several studies have been carried out in relation to the substitution for peat with green wastes, such as grape marc, rice hull, pine bark (Ingelmo et al. 1998; Hernández-Apaolaza et al. 2005), coconut coir dust (Abad et al. 2002; Hernández-Apaolaza et al. 2005), and almond shell waste (Urrestarazu, Martínez, and Salas 2005). However, there is a lack of data on the giant reed use as growing media.

On the other hand, the manufacture of fiberboard uses wood as a raw material, particularly softwood, hardwood, and mixtures of different wood species. However, the shortage of wood, forestry regulations, and the presumed lower cost of nonwood materials have encouraged board makers all over the world to research alternative sources of lignocellulose fiber. Different organic wastes have been employed as raw material of fiberboard such as wheat–cereal straws (Sain and Panthapulakkal 2006), rice husks (Leiva et al. 2007), tobacco (Ntalos and Grigoriou 2002), bagasse (Widyorini et al. 2005), sunflower stalks (Nemli 2003), kenaf (Kalaycioglu and Nemli 2006), bamboo (Sudin and Swamy 2006), oil palm (Abdul Khalil et al. 2007), and cotton carpel (Alma et al. 2005). However, there is also a lack of data on the giant reed as raw material for fiberboard production.

Therefore, the aim of this work was to carry out the characterization of some agricultural and industrial parameters in different parts of the giant reed to evaluate its capacity as horticultural substrate and the manufacture of insulating board employed in the building sector.

Materials and Methods

Raw Materials

The stem and rhizome of giant reed (*Arundo donax* L.) were used as raw materials in this experiment. These raw materials were collected from the River Segura (Alicante). The stems and rhizomes were dried under ambient conditions. The average stem height and diameter were 6 m and 2 cm, respectively. The stems were manually cut in pieces of 40 cm. The stems and rhizomes were ground to 10 mm by a laboratory-scale ring-knife chipper. The particles were then classified, using a horizontal screen shaker with sieves of 4–2–1–0.25 mm, to remove oversize and undersize (dust) particles. Three different particle sizes of the giant reed stems were used for panel manufacturing (2–4, 1–2, and 0.25–1 mm), whereas for substrate preparing, the stems and rhizomes with particle sizes of 0.25–4, 2–4, 1–2, and 0.25–1 mm were employed.

Analytical Methods for Growing Media Characterization

In the giant reed stems and rhizomes with different particle sizes, selected physical properties [bulk density (BD), total pore space (TPS), air capacity, easily available water (EAW), water buffering capacity (WBC), total water-holding capacity (TWHC), and shrinkage] were measured according to the methods of De Boodt (1975). Total nitrogen (NT) and total organic carbon (TOC) were determined by automatic microanalysis (Navarro et al. 1991) and dry matter was determined by drying at 105 °C for 12 h. After nitric acid (HNO₃)–perchloric acid (HClO₄) digestion, sodium (Na), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), iron (Fe), copper (Cu), manganese (Mn), zinc (Zn), molybdenum (Mo), and boron (B) were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry. The analyses were done in triplicate.

Board Manufacture

Eighteen types of boards were made. Preweighed raw material was placed into a laboratory drum glue blender (model LGB 100; IMAL, Modena, Italy). The adhesive used was urea formaldehyde (UF) resin at a level of 10% (based on oven-dry particle weight) with a solid content of 64–66%. Ammonium nitrate (NH₄NO₃) was used as a hardener at a level of 4%. Before spraying the resin, the hardener was dissolved at a 4% concentration in water and immediately mixed with the adhesive. The glue mixture was then sprayed onto the particles with pneumatic nozzles and blended for 5 min at ambient temperature to obtain a homogenized mixture. No wax or other hydrophobic substances were used. The mat configuration was single layer. Boards measuring 60 cm × 40 cm were manually formed in a forming box and pressed in a hot press at three different pressures (15.7, 21.0, and 26.0 kg cm⁻²) and at two temperatures (120 and 140 °C) for 5 min. The experimental design is shown in Table 1. Four replicate panels were made for each board type. A total of 72 particleboards were manufactured. After pressing, the particleboards were conditioned at 20 °C and 65% relative humidity for 4 weeks in a vertical position. The finished particleboards were trimmed to avoid edge effects and then cut into various sizes for property evaluation according to the standards of the European Union (1994).

Table 1
Experimental design

Panel type	Particle size (mm)	Press temperature (°C)	Press pressure (kg cm ⁻²)
A	0.25–1.00	120	15.7
B	0.25–1.00	140	15.7
C	0.25–1.00	120	21.0
D	0.25–1.00	140	21.0
E	0.25–1.00	120	26.0
F	0.25–1.00	140	26.0
G	1.00–2.00	120	15.7
H	1.00–2.00	140	15.7
I	1.00–2.00	120	21.0
J	1.00–2.00	140	21.0
K	1.00–2.00	120	26.0
L	1.00–2.00	140	26.0
M	2.00–4.00	120	15.7
N	2.00–4.00	140	15.7
O	2.00–4.00	120	21.0
P	2.00–4.00	140	21.0
Q	2.00–4.00	120	26.0
R	2.00–4.00	140	26.0

Board Testing

The properties determined were density (European Union 1993c), bending strength [modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE)] (European Union 1993d), internal bond strength (IB) (European Union 1993b), and screw-holding strength (SH) (European Union 1993a). Thermal conductivity was also determined with the method of the heat flow meter (European Union 2001).

Each panel was cut to get six samples (50 mm × 50 mm), six samples (different lengths, depending on the thickness, × 50 mm width), three samples (50 mm × 50 mm), three samples (50 mm × 50 mm), and one sample (300 mm × 300 mm) for density, MOR/MOE, IB, SH, and thermal conductivity determination, respectively.

Tests for mechanical properties were conducted with an Imal universal testing machine (Model IB600, Modena, Italy). Tests for the thermal conductivity were performed with a heat flow meter (Netzsch Instruments, Burlington, Mass.).

Statistical Analysis

The statistical analysis was based on the one-way analysis of variance (ANOVA) of the mean values of each parameter for each growing media and each board type to test the statistically significant differences. Normality and homogeneity of the variances were checked using the Shapiro-Wilk and Levene tests, respectively, before ANOVA. To compare the differences between specific growing media or board type, the Duncan test at $P < 0.05$ was used. The standard deviation of the mean values of each board parameter was also determined. All statistical tests were carried out using the SPSS v. 18.0 statistical software package (SPSS Inc., Chicago, Ill.).

Results and Discussion

Characteristics of the Growing Media

All substrates showed BD values inside the interval of values of this parameter for an ideal substrate (Abad, Noguera, and Bures 2001) (Table 2). The SAD-based substrates had greater BD values than those of the growing media with RAD. The effect of the particle size was not clear, because SAD3 treatment had the greatest BD value (0.30 g cm^{-3}), whereas RAD3 treatment showed the lowest value of this parameter (0.22 g cm^{-3}).

On the other hand, all growing media had suitable values of TPS, within the optimal range ($>85\%$ vol) (Abad, Noguera, and Bures 2001) (Table 2). In both substrate types (SAD and RAD), this parameter decreased, in general, with the reduction of the substrate particle size. This fact was also found by Urrestarazu, Martínez, and Salas (2005) in growing media elaborated with different textures of almond shell waste. However, none of the media used in this study fell inside the interval of values of the air capacity for an ideal substrate (Abad, Noguera, and Bures 2001) (Table 2). The values of this property in the media with SAD were significantly greater than those of the media with RAD. In general, this parameter was greater in the SAD-based substrates with fine particle size (1–2 and 0.25–1 mm), whereas the particle-size effect in RAD treatment was not clear, because RAD2 and RAD3 had the least and greatest air capacity values, respectively. The increase of air capacity in media with fine texture, observed in SAD substrates, has been also reported by others authors in an experiment of substitution of rockwool for agricultural waste (Urrestarazu, Martínez, and Salas 2005).

Most substrates had low EAW, WBC, and TWHC values in comparison to the values suggested for an ideal substrate (Abad et al. 1992; Abad, Noguera, and Bures 2001)

Table 2
Physical properties of the substrates used

Substrates	BD (g cm^{-3})	TPS (% vol)	Air capacity (% vol)	EAW (% vol)	WBC (% vol)	TWHC (ml L^{-1})	Shrinkage (% vol)
IS ^a	<0.4	>85	20–30	20–30	4–10	600–1000	<30
SAD1	0.29g	98.6f	88.6f	13.5b	1.6a	100c	18.9d
SAD2	0.28f	98.8g	85.2e	7.3a	4.0d	136d	8.3b
SAD3	0.30h	98.3d	89.7g	30.1c	3.0bc	87b	27.6f
SAD4	0.26e	97.2b	89.9h	11.6b	5.2e	73a	19.0d
RAD1	0.23b	98.0c	77.1b	8.8a	1.5a	209g	28.8g
RAD2	0.25d	98.5e	75.9a	12.6b	2.6b	225h	24.9e
RAD3	0.22a	98.4dc	84.5d	7.8a	3.7cd	140c	12.8c
RAD4	0.24c	96.8a	77.7c	6.6a	4.8e	192f	4.2a
F ANOVA	12179***	261***	15854***	98***	36***	107163***	2300***

^aAccording to Abad et al. (1992) and Abad et al. (2001).

Notes. IS, ideal substrate; SAD1, SAD2, SAD3, and SAD4, stem of *Arundo donax* with particle sizes 0.25–4, 2–4, 1–2, and 0.25–1 mm, respectively. RAD1, RAD2, RAD3, and RAD4, rhizome of *Arundo donax* with particle sizes 0.25–4, 2–4, 1–2, and 0.25–1 mm, respectively. BD, bulking density; TPS, total pore space; EAW, easily available water; WBC, water buffering capacity; and TWHC, total water-holding capacity. Values followed by the same letter are not statistically different according to the Duncan test at $P < 0.05$.

***Significant at $P < 0.001$.

Clara Eugenia Ferrández García

(Table 2). This fact will negatively influence the nutrient-holding capacity of these media during the fertigation program, water having been applied frequently and in small amounts (Medina et al. 2009). In general, all the substrates prepared with the different particle sizes of SAD had greater EAW, similar WBC, and lower TWHC in comparison to the respective particle size of RAD. Moreover, in most cases, the media with coarse texture had greater EAW and TWHC values, whereas WBC values were greater in the media with particle size 0.25–1 mm. All media elaborated with different particle sizes of SAD and RAD had suitable values of shrinkage, within acceptable limit for an ideal substrate (<30% vol) (Abad, Noguera, and Bures 2001) (Table 2). The values of this parameter were greater in the SAD substrates with fine texture, whereas the opposite was observed in the RAD-based substrates.

Total organic C, macro- and micronutrients, and sodium contents were greater in RAD substrates than in SAD substrates (Table 3). In most cases, no great differences were observed in the chemical properties related to the particle size of SAD or RAD in the media studied. The SAD and RAD media had higher and lower C/N ratio values, respectively, than that of peat (Abad, Noguera, and Bures 2002; Bustamante et al. 2008), probably due to low N content of SAD-based substrates and high concentration of this nutrient in the case of RAD media. Regarding the fertilizing capacity of the media studied, all substrates showed low macro- and micronutrient contents compared to the peat, except in the case of K (Bustamante et al. 2008). The notable K concentration of the green wastes has been also observed by other authors (Lewandowski et al. 2003).

Characteristics of the Particleboard

The average values of density, MOR, MOE, IB, SH, and thermal conductivity of the experimental panels are presented in Table 4. The particleboard density values ranged from 567.2 to 842.7 kg m⁻³, these densities being greater than those of the raw materials (data not shown). In general, a conventional particleboard with a density lower than the density of the wood furnish will be mechanically unsatisfactory. The compacting of the mat to an average density greater than the density of the furnish will allow better surface contact between the component particles of the mat (Kelly 1977). Panels D, E, and F had the greatest density values, whereas panels M and N have the lowest values of this parameter. In general, no significant differences in the density values were observed that were due to the press temperatures (120 or 140 °C), but a significant increase of this parameter was observed with the particle-size reduction and the press pressure increase.

Based on European Union standards, 12.5 N mm⁻² and 13.0 N mm⁻² are the minimum requirements for MOR of particleboards for general uses and furniture manufacturing, respectively (European Union 2003) (Table 4). There is no minimum requirement for MOE for general uses, and for furniture manufacturing the value is 1800 N mm⁻² (European Union 2003). The values of MOR ranged from 3.46 to 15.15 N mm⁻². The values of MOE were between 566.94 and 2358.45 N-mm⁻². In general, particleboards made from smaller particles and with higher pressures (types C to F) had MOR and MOE values within acceptable limits for general uses and interior grade (including furniture). The rest of the panels did not satisfy the requirements for MOR and MOE for general uses and for furniture manufacturing. These mechanical properties were greater, in general, in particle board with fine particle size and greater press pressure. No significant differences were observed in the bending strength values of particle boards due to the press temperature.

The IB strength values obtained ranged from 0.52 to 1.19 N mm⁻² (Table 4). Based on European Union standards, 0.28, 0.40, and 0.45 N mm⁻² are the minimum requirements for

Clara Eugenia Ferrández García

Downloaded by [Universitario Miguel Hernandez], [Concepción Paredes] at 02:22 20 February 2013

Table 3
Chemical characteristics of the substrates used

Substrates	TOC (%)	TN (%)	C/N	K (g kg ⁻¹)	Ca (g kg ⁻¹)	Mg (g kg ⁻¹)	Na (g kg ⁻¹)	B (mg kg ⁻¹)	Fe (mg kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	Mn (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)
SAD1	46.8cd	0.60b	79b	6.3a	0.98a	0.54a	0.08a	93a	28a	1.40a	3.1a	9.0ab
SAD2	46.5bc	0.60b	79b	8.1a	0.70a	0.46a	0.06a	99a	18a	1.40a	2.7a	6.0a
SAD3	46.2ab	0.43a	109c	6.3a	0.67a	0.44a	0.05a	93a	27a	1.35a	2.8a	6.5ab
SAD4	45.9a	0.47ab	99c	7.4a	1.38a	0.53a	0.06a	128b	41a	1.55a	4.4b	12.5b
RAD1	47.1d	2.01d	24a	15.9b	2.37b	1.75bc	0.49b	101a	168b	3.35b	7.4d	25.5cd
RAD2	46.9cd	1.83c	26a	21.4c	2.22b	1.95c	0.54c	103a	159b	3.65b	6.3c	30.0cd
RAD3	47.8f	1.80c	27a	16.5b	2.66b	1.73b	0.48b	108ab	167b	3.65b	7.6d	24.5c
RAD4	47.5e	1.67c	28a	15.5b	5.83c	1.96c	0.47b	110ab	535c	4.90c	13.9e	31.0d
F ANOVA	22***	227***	135***	59***	46***	128***	301***	4*	48***	45***	207***	35***

Notes. SAD1, SAD2, SAD3, and SAD4, stem of *Arundo donax* with particle sizes 0.25–4, 2–4, 1–2, and 0.25–1 mm, respectively. RAD1, RAD2, RAD3, and RAD4, rhizome of *Arundo donax* with particle sizes 0.25–4, 2–4, 1–2, and 0.25–1 mm, respectively. Values followed by the same letter are not statistically different according to the Duncan test at $P < 0.05$. TOC, total organic carbon; TN, total nitrogen.

***Significant at $P < 0.001$.

*Significant at $P < 0.05$.

Clara Eugenia Ferrández García

Downloaded by [Universitario Miguel Hernandez], [Concepción Paredes] at 02:22 20 February 2013

Table 4
Average values of density, bending strength [modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE)], internal bond (IB), screw holding strength (SH), and thermal conductivity

Boardtype	Density(kg m ⁻³)	MOR(N mm ⁻²)	MOE (N mm ⁻²)	IB(N mm ⁻²)	SH(N mm ⁻¹)	Thermal conductivity (W mK ⁻¹)
A	737.5 (9.6) c	8.69 (1.82) de	1271.16 (115.15) gh	0.61 (0.36) a	68.75 (3.40) e	0.087 (0.019) a
B	722.0 (50.3) c	8.83 (1.80) de	1443.78 (230.00) fg	0.52 (0.25) a	70.33 (13.01) de	0.090 (0.024) a
C	790.5 (13.9) b	13.22 (0.96) ab	1778.13 (211.21) cd	1.13 (0.12) a	80.50 (8.18) bcde	0.059 (0.010) a
D	838.7 (34.0) a	14.93 (1.84) a	2057.52 (406.46) bc	0.96 (0.36) a	78.00 (12.44) bcde	0.059 (0.006) a
E	842.7 (60.6) a	15.15 (2.51) a	2176.01 (127.58) ab	1.19 (0.57) a	102.00 (6.88) abc	0.081 (0.031) a
F	842.0 (38.3) a	14.84 (2.24) a	2358.45 (238.49) a	0.93 (0.25) a	98.75 (12.70) abcd	0.081 (0.028) a
G	654.0 (32.6) de	6.90 (0.77) ef	988.38 (138.27) hi	0.90 (0.17) a	79.25 (11.84) bcde	0.082 (0.008) a
H	634.0 (22.5) de	6.29 (0.91) ef	1090.26 (229.93) hi	0.78 (0.10) a	126.75 (50.17) a	0.085 (0.007) a
I	734.0 (6.7) c	10.51 (0.87) cd	1525.98 (113.95) defg	0.94 (0.37) a	73.75 (14.22) cde	0.064 (0.004) a
J	749.0 (17.5) bc	10.29 (2.59) cd	1461.10 (430.19) efg	0.89 (0.36) a	78.00 (25.50) bcde	0.060 (0.003) a
K	749. (43.4) bc	11.20 (0.22) cd	1705.35 (68.15) def	0.96 (0.37) a	102.75 (13.10) abc	0.087 (0.027) a
L	772.5 (39.5) bc	11.80 (2.46) bc	1760.29 (53.50) cde	1.11 (0.20) a	113.25 (9.36) a	0.084 (0.027) a
M	567.2 (11.3) f	3.63 (0.84) g	566.94 (54.82) k	0.72 (0.30) a	68.50 (15.41) e	0.090 (0.011) a
N	571.5 (35.6) f	3.46 (0.59) g	604.76 (175.99) jk	0.59 (0.28) a	69.25 (15.13) e	0.094 (0.007) a
O	623.2 (28.6) e	6.19 (1.95) ef	880.60 (146.87) ij	0.91 (0.46) a	63.00 (15.87) e	0.070 (0.007) a
P	627.0 (24.7) de	5.84 (1.41) fg	947.87 (204.54) i	0.80 (0.36) a	66.50 (20.68) e	0.069 (0.007) a
Q	676.0 (31.9) d	6.80 (1.61) ef	1131.70 (112.13) hi	1.07 (0.32) a	107.00 (3.37) ab	0.087 (0.019) a
R	664.2 (15.6) de	6.77 (1.06) ef	1104.71 (27.98) hi	1.14 (0.33) a	103.50 (8.43) ab	0.086 (0.019) a

Notes. Values with the same letter in the same column are not significantly different based on Duncan's multiple-range test at the 0.05 significance level. Values in parentheses are standard deviations.

Table 5
 Thermal conductivity of giant reed particleboards compared
 with other insulation materials

Materials	Density (kg m ⁻³)	Thermal conductivity (W mK ⁻¹)	Source
Giant reed particleboard	567–843	0.059–0.094	Present study
Bagasse insulation board	250–350	0.049–0.055	Panyakaew and Fotios (2011)
Kenaf insulation board	150–200	0.051–0.058	Xu et al. (2004)
Cotton stalk insulation board	150–450	0.058–0.081	Zhou et al. (2010)
Wood particleboard	600–900	0.120–0.180	European Union (2004)

IB of particleboards for general uses, furniture manufacturing, and load bearing, respectively (European Union 2003). All particleboards had IB values above the requirements for different uses. No one variable factor studied (particle size, press temperature, and pressure) affected significantly the IB values of the panels.

The SH values were between 63.00 and 126.75 N mm⁻¹ (Table 4). In general, no great differences were found in the values of this parameter due to particle size, press temperature, and pressure.

Thermal conductivity is the time rate of steady state heat flow (W) through a unit area of 1-m-thick homogeneous material in a direction perpendicular to isothermal planes, induced by a unit (1-K) temperature difference across the sample. Thermal conductivity, *k* value, is a measure of the effectiveness of a material in conducting heat. Hence, the knowledge of the thermal conductivity values allows for comparisons between the effectiveness of different thermal insulation materials (Al-Homoud 2005). The thermal conductivity values ranged from 0.059 to 0.094 W mK⁻¹ (Table 4). These values are similar to those of other nonwood boards (Table 5). The thermal conductivity depends on the board density; the boards with high density have also high thermal conductivity (Xu et al. 2004; Zhou et al. 2010). In the present study there were no statistical differences in the values of this physical property as a consequence of the particle size, press temperature, and pressure. To find the relation between density and thermal conductivity, particleboards with lower densities should be investigated. The panels of this experiment could be considered as insulating boards because of their low thermal conductivity values.

Conclusions

From the results obtained it was possible to conclude that the growing media with different particle sizes of *Arundo donax* L. stem and rhizome had suitable values of physical properties such as bulk density, total pore space, and shrinkage. Therefore, these substrates will not limit the root elongation and will have adequate porosity. However, the substrates studied did not present optimal values of the properties related to air/water ratio, such as air capacity, easily available water, water buffering capacity, and total water-holding capacity. Moreover, these substrates had low nutrient contents, except in the case of K in both substrate types (*Arundo donax* L. stem and rhizome) and N in *Arundo donax* L. rhizome-based substrates. The particle size had more effect on physical properties than on chemical properties of substrates studied. Also, the experimental investigation indicated that the use

Clara Eugenia Ferrández García

of *Arundo donax* L. to manufacture particleboards with low thermal conductivity is feasible. Optimal mechanical properties of particleboards can be obtained by the selection of adequate particle size of raw material and the press pressure.

Acknowledgment

This work has been financed by the Ministerio de Ciencia e Innovación of Spain (MICCIN, BIA 2009-11605).

References

- Abad, M., P. F. Martínez, M. D. Martínez, and J. Martínez. 1992. Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. *Actas de Horticultura* 11:141–154.
- Abad, M., P. Noguera, and S. Bures. 2001. National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant production: Case study in Spain. *Bioresource Technology* 77:197–200.
- Abad, M., P. Noguera, R. Puchades, A. Maquieira, and V. Noguera. 2002. Physico-chemical and chemical properties of some coconut coir dusts for use as a peat substitute for containerized ornamental plants. *Bioresource Technology* 82:241–245.
- Abdul Khalil, H. P. S., A. M. Issam, M. T. Ahmad Shakri, R. Suriani, and A. Y. Awang. 2007. Conventional agro-composites from chemically modified fibers. *Industrial Crops and Products* 26:315–323.
- Abrantes, S., E. Maria, and A. P. Costa. 2007. Evaluation of giant reed as a raw-material for paper production. *Appita Journal* 60:410–415.
- Al-Homoud, M. S. 2005. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and Environment* 40:353–366.
- Alma, M. H., H. Kalaycıođlub, I. Bektas, and A. Tutus. 2005. Properties of cotton carpel-based particleboards. *Industrial Crops and Products* 22:141–149.
- Angelini, L. G., L. Ceccarini, and E. Bonari. 2005. Biomass yield and energy balance of giant reed (*Arundo donax* L.) cropped in central Italy as related to different management practices. *European Journal of Agronomy* 22:375–389.
- Boose, A. B., and J. S. Holt. 1999. Environmental effects on asexual reproduction in *Arundo donax*. *Weed Research* 39:117–127.
- Bustamante, M. A., C. Paredes, R. Moral, E. Agulló, M. D. Pérez-Murcia, and M. Abad. 2008. Composts from distillery wastes as peat substitutes for transplant production. *Resources Conservation and Recycling* 52:792–799.
- De Boodt, H. 1975. Caractères physiques et disponibilité en eau des substrats. *Annales de Gembloux* 81:59–72.
- European Union. 1993a. *Fibreboards: Determination of resistance to axial withdrawal of screws* (EN 320). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- European Union. 1993b. *Particleboards and fiberboards: Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board* (EN 319). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- European Union. 1993c. *Wood-based panels: Determination of density* (EN 323). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- European Union. 1993d. *Wood-based panels: Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength* (EN 310). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- European Union. 1994. *Wood-based panels: Sampling and cutting of test pieces and expression of test results* (EN 326–1). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- European Union. 2001. *Thermal performance of building materials and products: Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods: Products of*

Clara Eugenia Ferrández García

608

J. Andreu-Rodriguez et al.

- high and medium thermal resistance (EN 12667). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- European Union. 2003. *Particleboards: Specifications* (EN 312). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- European Union. 2004. *Wood-based panels for use in construction: Characteristics, evaluation of conformity and marking* (EN 13986). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- Hernández-Apaolaza, L., A. M. Gascó, J. M. Gascó, and F. Guerrero. 2005. Reuse of waste materials as growing media for ornamental plants. *Bioresource Technology* 96:125–131.
- Ingelmo, F., R. Canet, M. A. Ibañez, F. Pomares, and J. García. 1998. Use of MSW compost, dried sewage sludge, and other wastes as partial substitutes for peat and soil. *Bioresource Technology* 63:123–129.
- Kalaycioglu, H., and G. Nemli. 2006. Producing composite particleboard from kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) stalks. *Industrial Crops and Products* 24:177–180.
- Kelly, M. W. 1977. *Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboard* (General Technical Report FPL-10). Madison, Wisc.: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Leiva, P., E. Ciannamea, R. A. Ruseckaitė, and P. M. Stefani. 2007. Medium-density particleboards from rice husks and soybean protein concentrate. *Journal of Applied Polymer Science* 106:1301–1306.
- Lewandowski, I.; J. M. O. Scurlockb, E. Lindvallc, and M. Christoud. 2003. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass and Bioenergy* 25:335–361.
- Mariani, C., R. Cabrini, A. Danin, P. Piffanelli, A. Fricano, S. Gomasasca, M. Dicandilo, F. Grassi, and C. Soave. 2010. Origin, diffusion, and reproduction of the giant reed (*Arundo donax* L.): A promising weedy energy crop. *Annals of Applied Biology* 157:191–202.
- Medina, E., C. Paredes, M. D. Pérez-Murcia, M. A. Bustamante, and R. Moral. 2009. Spent mushroom substrates as component of growing media for germination and growth of horticultural plants. *Bioresource Technology* 100:4227–4232.
- Navarro, A. F., J. Cegarra, A. Roig, and M. P. Bernal. 1991. An automatic microanalysis method for the determination of organic carbon in wastes. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 22:2137–2144.
- Nemli, G. 2003. Effects of some manufacturing factors on the properties of particleboard manufactured from alder (*Alnus glutinosa* subsp. *Barbata*). *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 27:99–104.
- Ntalos, G. A., and A. H. Grigoriou. 2002. Characterization and utilization of vine pruning as a wood substitute for particleboard production. *Industrial Crops and Products* 16:59–68.
- Panyakaew, S., and S. Fotios. 2011. New thermal insulation boards made from coconut husk and bagasse. *Energy and Buildings* 43:1732–1739.
- Perdue, R. E. 1958. *Arundo donax*: Source of musical reeds and industrial cellulose. *Economic Botany* 12:368–404.
- Sain, M., and S. Panthapulakkal. 2006. Bioprocess preparation of wheat straw fibers and their characterization. *Industrial Crops and Products* 23:1–8.
- Sudin, R., and N. Swamy. 2006. Bamboo and wood fiber cement composites for sustainable infrastructure regeneration. *Material Science* 41:6917–6924.
- Thornby, D., D. Spencer, and J. Hanan. 2007. L-DONAX, a growth model of the invasive weed species, *Arundo donax* L. *Aquatic Botany* 87:275–284.
- Tucker, G. C. 1990. The genera of Arundinoideae (Graminae) in the southeastern United States. *Journal of the Arnold Arboretum* 71:145–177.
- Urrestarazu, M., G. A. Martínez, and M. C. Salas. 2005. Almond shell waste: Possible local rockwool substitute in soilless crop culture. *Scientia Horticulturae* 103:453–460.

Clara Eugenia Ferrández García

Agricultural and Industrial Valorization of Arundo donax L.

609

- Widyorini, R., J. Xu, K. Umemura, and S. Kawai. 2005. Manufacture and properties of binderless particleboard from bagasse, I: Effects of raw material type, storage methods, and manufacturing process. *Journal of Wood Science* 51:648–654.
- Xu, J., R. Sugawara, R. Widyorini, G. Han, and S. Kawai. 2004. Manufacture and properties of low-density binderless particleboard from kenaf core. *Journal of Wood Science* 50:62–67.
- Zhou, X., F. Zheng, H. Li, and C. Lu. 2010. An environmentally friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. *Energy and Buildings* 42:1070–1074.

Clara Eugenia Ferrández García



Communications in Soil Science and Plant Analysis

Publication details, including instructions for authors and subscription information:

<http://www.tandfonline.com/loi/lcss20>

Evaluation of the Different Uses of *Washingtonia robusta* Pruning Waste

Teresa García-Ortuño ^a, Javier Andreu-Rodríguez ^a, M. Teresa Ferrandez-García ^a, Clara Eugenia Ferrandez-García ^a, Eva Medina ^b, Concepción Paredes ^b, M. Dolores Perez-Murcia ^b & Joaquín Moreno-Caselles ^b

Clara Eugenia Ferrández García

Communications in Soil Science and Plant Analysis, 44:623–631, 2013
Copyright © Taylor & Francis Group, LLC
ISSN: 0010-3624 print / 1532-2416 online
DOI: 10.1080/00103624.2013.745371



Evaluation of the Different Uses of *Washingtonia robusta* Pruning Waste

TERESA GARCIA-ORTUÑO,¹ JAVIER ANDREU-RODRIGUEZ,¹ M. TERESA FERRANDEZ-GARCIA,¹ CLARA EUGENIA FERRANDEZ-GARCIA,¹ EVA MEDINA,² CONCEPCIÓN PAREDES,² M. DOLORES PEREZ-MURCIA,² AND JOAQUÍN MORENO-CASELLES²

¹Department of Engineering, Miguel Hernandez University, Orihuela, Alicante, Spain

²Department of Agrochemistry and Environment, Miguel Hernandez University, Orihuela, Alicante, Spain

This research work was conducted to investigate the possibility of using Washingtonia robusta H. Wendl. pruning waste as growing media and raw material for particleboard production. In the growing media experiment, variable factors were the particle size (0.25–4, 2–4, 1–2, and 0.25–1 mm), and in the particleboard experiment, the variables were the particle size (2–4, 1–2, and 0.25–1 mm), press temperature (120 and 140 °C), and press pressure (15.7 and 21.0 kg cm⁻²). The main physical and chemical properties of the growing media were determined and the experimental panels were tested for their mechanical and physical properties according to the procedures defined by European Union (EN) standards. With respect to agricultural value, the W. robusta pruning waste had low macro- and microelement contents [except in the case of potassium (K)] and high carbon (C) / nitrogen (N) ratio values (C/N ratio >130), and the majority of the studied physical properties were not inside the interval of values for an ideal substrate. On the other hand, in general, the physical and mechanical properties of the particleboards from the W. robusta pruning waste were appropriate according to the EN standards for particleboards. These properties were more significantly affected by the particle size than by the board manufacturing conditions.

Keywords Particleboard, pruning waste, soilless substrate, *Washingtonia robusta*

Introduction

Washingtonia robusta H. Wendl. (Mexican fan palm or Mexican *Washingtonia*) belongs to the Arecaceae family. This palm tree is native to northwestern Mexico (western Sonora and Baja California Sur) (Felger, Johnson, and Wilson 2001). It can grow to 30 m tall; its leaves have petioles up to 1 m long and the palmate fans of leaflets are up to 2 m long. *Washingtonia robusta* requires full sun for its growth and permeable soils with high nutrient content. However, this plant can also grow in poor soil and tolerates low temperatures

Address correspondence to Concepción Paredes, Department of Agrochemistry and Environment, Miguel Hernandez University, EPS Orihuela, Ctra Beniel Km 3.2, 03312 Orihuela, Alicante, Spain. E-mail: c.paredes@umh.es

Clara Eugenia Ferrández García

624

T. Garcia-Ortuño et al.

(hardy to -5°C) and water deficit (Roberts 1989). *Washingtonia robusta* has been exploited for thatch and wood (Roberts 1989), and it has widespread use in horticulture (Simon, Nieves-Cordones, and Nieves 2010). This plant is often pruned every 3 to 4 months, which induces a faster growth rate (Downer, Hodel, and Mochizuki 2009). This agricultural practice generates a great volume of pruning waste, which is generally disposed of in landfills.

In recent decades, the use of soilless substrates in horticulture has become common, not only for growing seedlings and propagation of plants but also for vegetable production. The peat is imported from northern and central Europe and recently has become more expensive and its properties more variable. So, it is important to look for good-quality and locally available low-cost substitutes for peat. Furthermore, the need to recycle wastes and the increasing environmental pressures against peat extraction lead to increasing interest in the feasibility of substituting peat with organic wastes and by-products. A number of potential alternatives have been identified (Abad, Noguera, and Bures 2001), and different organic wastes, especially green wastes, are very promising (Ingelmo et al. 1998; Abad et al. 2002; Hernández-Apaolaza et al. 2005; Urrestarazu, Martínez, and Salas 2005). So, the use of the *W. robusta* pruning waste as growing media is an economically and ecologically acceptable way to dispose of it.

Also, particleboard consumption has significantly increased during recent years, especially in the sectors of housing construction, furniture manufacturing, and interior decoration (wall and ceiling paneling) (Sellers 2000; Pan, Cathcart, and Wang 2006). On one hand, deforestation and forest degradation, and on the other hand, increasing demand for wood-based panels have caused raw material shortages in the sector for a long time (Çolak et al. 2007). As a result of these concerns, alternative fibers could play an important role in the manufacture of composite panels such as particleboard. Environmentally sustainable lignocellulosic resources are available in different forms of non-wood-based fibers and agricultural residues. Non-wood commercial fibers include jute, sisal, kapok, kenaf, hemp, and ramie. Agriculture residues include stalks of most cereal crops, rice husks, coconut fibers, and other wastes (Ndazi, Tesha, and Bisanda 2006). Moreover, different research has been conducted on the use of the oil palm empty fruit bunch fiber for particleboard production (Nemli, Kalaycıoğlu, and Alp 2001; Ashori and Nourbakhsh 2008). However, there is also a lack of data on the use of *W. robusta* pruning waste as raw material for particleboard manufacturing.

Therefore, the aim of this work was to characterize some agricultural and industrial parameters in the *W. robusta* pruning waste, in order to evaluate their capacity as horticultural substrate and for the manufacture of particleboard employed in the building sector.

Materials and Methods

Raw Materials

The raw material was the rachises of the *Washingtonia robusta* H. Wendl. The leaves used in this study were collected from the gardens of the University Miguel Hernandez in Orihuela (Alicante, Spain) on May 2010. The leaves were manually cut to obtain the rachises and then stacked in vertical position for 5 months, under ambient conditions. The dried rachises were grounded to 10 mm by a laboratory-scale ring-knife chipper. The particles were then classified using a horizontal screen shaker with sieves of 4–2–1–0.25 mm to remove oversize and undersize (dust) particles. Four different particle sizes

Clara Eugenia Ferrández García

were used for substrate preparation (0.25–4, 2–4, 1–2, and 0.25–1 mm), whereas for panel manufacturing, the raw materials with particle sizes of 2–4, 1–2, and 0.25–1 mm were employed.

Analytical Methods for Growing Media Characterisation

In the raw materials, selected physical properties [bulk density (BD), total pore space (TPS), air capacity, easily available water (EAW), water buffering capacity (WBC), total water-holding capacity (TWHC), and shrinkage] were measured according to the methods of De Boodt (1975). Total nitrogen (NT) and total organic carbon (TOC) were determined by automatic microanalysis (Navarro et al. 1991), and dry matter was determined by drying at 105 °C for 12 h. After nitric acid (HNO₃)–perchloric acid (HClO₄) digestion, sodium (Na), K, calcium (Ca), magnesium (Mg), iron (Fe), copper (Cu), manganese (Mn), zinc (Zn), molybdenum (Mo), and boron (B) were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry. The analyses were done in triplicate.

Board Manufacture

Single-layer particleboards were manufactured using the method described by García-Ortuño, Bernal, and Roig (2011). Particles were blended with urea formaldehyde (UF) resin with a solid content of 64–66%, at a level of 10%, based on an oven-dry particle weight basis. As a hardener, 0.4% ammonium nitrate (NH₄NO₃) predissolved in water was used. The particles were blended with the binder in a rotary-drum type mixer with nozzles for 5 min. The mat was manually formed and hot pressed for 4 min. The fabrication conditions can be observed in Table 1. Three replicate panels were made for each board type. After pressing, the particleboards were conditioned at 20 °C and 65% relative humidity for 4 weeks in a vertical position. The finished particleboards were trimmed to avoid edge effects to a final size of 60 cm × 40 cm and then cut into various sizes for property evaluation according to EN 326-1 (European Committee for Standardization 1994).

Table 1
 Experimental design

Panel type	Particle size (mm)	Press temperature (°C)	Press pressure (kg cm ⁻²)
A	0.25–1.00	120	15.7
B	0.25–1.00	140	15.7
C	0.25–1.00	120	21.0
D	0.25–1.00	140	21.0
E	1.00–2.00	120	15.7
F	1.00–2.00	140	15.7
G	1.00–2.00	120	21.0
H	1.00–2.00	140	21.0
I	2.00–4.00	120	15.7
J	2.00–4.00	140	15.7
K	2.00–4.00	120	21.0
L	2.00–4.00	140	21.0

Board Testing

The mechanical properties determined were bending strength [modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) (European Committee for Standardization 1993c)], internal bond strength (IB) (European Committee for Standardization 1993b), and screw-holding strength (SH) (European Committee for Standardization 1993a). Thermal conductivity was also determined with the method of the heat flow meter (European Committee for Standardization 2001).

Each panel was cut to get six samples (different lengths, depending on the thickness, \times 50 mm width), three samples (50 mm \times 50 mm), three samples (50 mm \times 50 mm), and one sample (300 mm \times 300 mm) for MOR/MOE, IB, SH and thermal conductivity determination, respectively.

Tests for mechanical properties were conducted on an Imal universal testing machine (model IB600, Modena, Italy). Tests for the thermal conductivity were performed on a heat flow meter (Netzsch Instruments, Burlington, Mass.).

Statistical Analysis

The statistical analysis was based on the one-way analysis of variance (ANOVA) of the mean values of each parameter for each raw material (growing media) and each board type, in order to test the statistically significant differences. Normality and homogeneity of the variances were checked using the Shapiro–Wilk and Levene test, respectively, before ANOVA. To compare the differences between specific raw material or board type, the Duncan test at $P < 0.05$ was used. The standard deviation of the mean values of each board parameter was also determined. All statistical tests were carried out using the SPSS v. 18.0 statistical software package (SPSS Inc., Chicago, Ill.).

Results and Discussion

Characteristics of the Growing Media

The main physical properties of the different substrates used in this study compared to the values established for an “ideal” substrate (Abad et al. 1992; Abad, Noguera, and Bures 2001) are shown in Table 2. All media elaborated with different particle sizes of *Washingtonia robusta* pruning waste had suitable values of BD, TPS, and shrinkage, within the optimal ranges. However, all these media showed a high air capacity and low EAW, WBC, and TWHC. Urrestarazu, Martínez, and Salas (2005) reported in a study on the physical and chemical properties of almond shell waste that both easily available water and total water-holding capacity presented values below limit established for an ideal substrate (IS), whereas the air capacity percentages exceeded the acceptable limit for an IS. The high aeration found in the present study means that water should be applied frequently and in small amounts, as leaching may easily occur (García-Gómez, Bernal, and Roig 2002). With respect to particle size of *W. robusta* pruning waste, this factor significantly influenced ($P < 0.05$) all physical properties studied. In general, the substrate with particle size 2–4 mm had lower values of TPS, air capacity, EAW, and WBC. However, the substrates with particle sizes 0.25–4 and 0.25–1 mm had the greatest values of most physical properties.

On the other hand, no significant differences were observed in general in the chemical properties related to the particle size of *W. robusta* pruning waste in the media studied (Table 3). According to Abad et al. (2002) and Bustamante et al. (2008), all substrates

Table 2
Physical properties of the substrates used

Substrates	(% vol)						
	BD (g cm ⁻³)	TPS	Air capacity	EAW	WBC	TWHC (ml L ⁻¹)	Shrinkage (% vol)
IS^a	<0.4	>85	20–30	20–30	4–10	600–1000	<30
WRPW1	0.22ab	94.5b	80.6b	12.9b	1.4a	140d	12.8d
WRPW2	0.28c	92.6a	79.1a	8.0a	1.8a	137c	8.6b
WRPW3	0.23b	95.5c	87.7c	15.7c	2.2b	77b	11.7c
WRPW4	0.20a	97.0d	93.5d	9.3a	3.1c	35a	5.1a
F ANOVA	23**	217***	2393***	31**	51**	20575***	157***

^aAccording to Abad et al. (1992, 2001).

Notes. IS, ideal substrate; WRPW1, WRPW2, WRPW3, WRPW4, *Washingtonia robusta* pruning waste with particle sizes 0.25–4, 2–4, 1–2, and 0.25–1 mm, respectively; BD, bulking density; TPS, total pore space; EAW, easily available water; WBC, water buffering capacity; and TWHC, total water-holding capacity. Values followed by the same letter are not statistically different according to the Duncan test at $P < 0.05$.

*Significant at $P < 0.05$.

**Significant at $P < 0.01$.

***Significant at $P < 0.001$.

studied had greater C/N ratio values than that of peat, probably because of their low N content. This high C/N ratio could cause immobilization of soluble N when *W. robusta* pruning waste was used as a growing medium for containerized plant production. Moreover, the macro- and micronutrient contents in this waste were low in comparison to those of peat (Bustamante et al. 2008), except in the case of potassium (K). Abad et al. (2002) also found in different coconut coir dust samples high K contents. Therefore, fertilizers added when *W. robusta* pruning waste was being used as a container medium could contain less than the normal K levels required for other organic horticultural substrates.

Characteristics of the Particleboard

The average values of MOR, MOE, IB, SH, and thermal conductivity of the experimental panels are presented in Table 4. Based on European Union Standards, 12.5 N mm⁻² and 13.0 N mm⁻² are the minimum requirements for MOR of particleboards for general uses and furniture manufacturing, respectively (European Committee for Standardization 2003). The values of MOR ranged from 7.31 to 19.27 N mm⁻². Particleboards made from smaller particles (types A to D) had MOR values that were sufficiently high to reach the requirements for general use and interior grade (including furniture). Panels B and C exceeded the requirements for load bearing. Panels with particle sizes 1–2 or 2–4 mm (types E to L) did not satisfy, in general, the requirements for MOR. No significant differences in the MOR values were observed that resulted from the conditions of particleboard fabrication (press temperature and press pressure), and we only found a significant decrease of this parameter ($P < 0.05$) with the increase of the particle size. There are no minimum requirements for MOE for general use and the value of this parameter is 1800.00 N mm⁻² for furniture manufacturing (European Committee for Standardization 2003). The values of MOE were between 611.1 and 1530.6 N mm⁻², which did not exceed the minimum limits for interior grade. The increase of particle size significantly decreased the MOE values; this

Table 3
 Chemical characteristics of the substrates used

Substrates	TOC (%)	TN (%)	C/N	K (g kg ⁻¹)	Ca (g kg ⁻¹)	Mg (g kg ⁻¹)	Na (g kg ⁻¹)	B (mg kg ⁻¹)	Fe (mg kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	Mn (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)
WRPW1	43.0b	0.26a	171a	18.6a	2.47a	1.79a	0.12a	97a	15.5b	1.20a	11.8a	10.5a
WRPW2	41.0a	0.30a	138a	18.6a	2.97c	2.00a	0.15a	94a	12.5a	0.95a	10.1a	12.0a
WRPW3	42.5b	0.28a	156a	18.0a	2.53b	1.87a	0.12a	95a	15.5b	1.20a	10.5a	9.5a
WRPW4	43.0b	0.30a	143a	16.3a	2.45a	1.95a	0.11a	99a	28.5c	1.30a	11.8a	11.5a
F ANOVA	9*	2 ^{NS}	2 ^{NS}	1 ^{NS}	308****	3 ^{NS}	4 ^{NS}	4 ^{NS}	204****	4 ^{NS}	1 ^{NS}	1 ^{NS}

Notes. WRPW1, WRPW2, WRPW3, WRPW4, *Washingtonia robusta* pruning waste with particle sizes 0.25–4, 2–4, 1–2, and 0.25–1 mm, respectively. TOC, total organic carbon; TN, total nitrogen; and NS, not significant. Values in columns followed by the same letter are not statistically different according to the Duncan test at $P < 0.05$.

* Significant at $P < 0.05$.

****Significant at $P < 0.001$.

Table 4
Average values of bending strength [modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE)], internal bond (IB), screw-holding strength (SH), and thermal conductivity

Board type	Bending strength			IB (N mm ⁻²)	SH (N mm ⁻¹)	Thermal conductivity k (W mK ⁻¹)
	MOR (N mm ⁻²)	MOE (N mm ⁻²)				
A	14.86 (3.39)a	1402.1(323.8)a		0.842 (0.139)b	60.77 (4.66)a	0.0575 (0.0055)
B	15.84 (3.21)a	1321.1 (412.8)a		0.990 (0.200)ab	72.54 (21.78)a	0.0804 (0.0248)
C	19.27 (2.74)a	1530.6 (262.6)a		1.280 (0.140)a	68.83 (9.82)a	0.0594 (0.0048)
D	14.72 (2.31)a	1227.6 (320.7)a		0.657 (0.160)c	74.07 (12.98)a	0.0839 (0.0277)
E	11.12 (2.21)b	1101.0 (362.2)b		0.993 (0.150)ab	59.98 (10.94)ab	0.0715 (0.0107)
F	12.71 (2.43)b	1291.2 (241.2)a		1.004 (0.197)a	83.53 (15.56)a	0.0672 (0.0100)
G	11.56 (1.60)b	939.8 (117.5)b		1.003 (0.142)a	54.36 (10.61)ab	0.0809 (0.0382)
H	10.38 (1.72)b	1312.0 (225.5)a		1.135 (0.142)a	73.63 (3.64)a	0.0818 (0.0273)
I	9.59 (2.57)c	811.7 (260.8)c		1.217 (0.242)a	45.53 (9.14)b	0.0772 (0.0193)
J	7.31 (1.45)c	670.7 (188.1)c		1.044 (0.292)ab	40.83 (13.36)b	0.0770 (0.0178)
K	8.25(1.57)c	611.1(137.5)c		1.182(0.112)a	46.05(7.50)b	0.0790(0.0196)
L	7.89 (1.40)c	695.0 (154.4)c		0.886 (0.457)b	42.95 (7.00)b	0.0736 (0.0154)
Requirements A	12.5	N/A		0.28	N/A	N/A
Requirements B	13.0	1800.00		0.40	N/A	N/A
Requirements C	15.0	2300.00		0.45	N/A	N/A

Notes. Values with the same letters in the same columns are not significantly different based on Duncan's multiple-range test at the 0.05 significance level. Values in parentheses are standard deviations. N/A, not applicable; for other abbreviations, see Table 3. Requirement A, general uses according to EN 312 (2003) standard; requirement B, interior grade type (including furniture), according to EN 312 (2003) standard; and requirement C, load bearing under dry conditions, according to EN 312 (2003) standard.

was the only parameter significantly lower in the board with particle size 1–2 mm, when the temperature was higher (140 °C).

The IB strength values obtained ranged from 0.657 to 1.280 N mm⁻². All particleboards had IB values that reached the requirements for general uses, interior grade, and load bearing. The lowest IB value was achieved by the particleboard with smaller particle size and manufacturing conditions of 140 °C for press temperature and 21.0 kg cm⁻² for press pressure. The SH values were between 40.83 and 83.53 N mm⁻¹. This parameter significantly diminished ($P < 0.05$) with the increase of particle size of the boards.

The thermal conductivity values ranged from 0.0575 to 0.0839 W mK⁻¹. These values were similar to those of some commercialized materials, like vermiculite. There were no statistical differences in the results obtained, possibly because of the relationship of this parameter with the thickness of the particleboard.

Conclusions

According to the results obtained, it can be concluded that, in general, the substrates with different particle sizes of *Washingtonia robusta* pruning waste showed suitable values of physical properties related to substrate porosity and low wetting capacity, as observed in the low values of EAW, WBC, and TWHC. Moreover, these substrates had high C/N ratio values and low nutrient contents, except in the case of K, in comparison to the peat. These data indicated that the fertilization of the growing media from *W. robusta* pruning waste is necessary for the adequate seedling growth.

On the other hand, the manufacture of particleboards from *W. robusta* pruning waste by using UF was technically feasible. Half of the experimental panels reached the requirements for general use. These particleboards have low thermal conductivity and they can be used as insulating boards.

Therefore, all these conclusions show that the use of *W. robusta* pruning waste in professional horticulture and in the particleboard manufacturing contributes to their disposal in environmentally friendly ways and reduces the need for both peat and wood.

Acknowledgment

This work was financed by the Ministerio de Ciencia e Innovación of Spain (MICCIN, BIA 2009-11605).

References

- Abad, M., P. F. Martínez, M. D. Martínez, and J. Martínez. 1992. Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. *Actas de Horticultura* 11:141–154.
- Abad, M., P. Noguera, and S. Bures. 2001. National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant production: Case study in Spain. *Bioresource Technology* 77:197–200.
- Abad, M., P. Noguera, R. Puchades, A. Maquieira, and V. Noguera. 2002. Physico-chemical and chemical properties of some coconut coir dusts for use as a peat substitute for containerized ornamental plants. *Bioresource Technology* 82:241–245.
- Ashori, A., and A. Nourbakhsh. 2008. Effect of press cycle time and resin content on physical and mechanical properties of particleboard panels made from the underutilized low-quality raw materials. *Industrial Crops and Products* 28:225–230.
- Bustamante, M. A., C. Paredes, R. Moral, E. Agulló, M. D. Pérez-Murcia, and M. Abad. 2008. Composts from distillery wastes as peat substitutes for transplant production. *Resources Conservation and Recycling* 52:792–799.

Clara Eugenia Ferrández García

Uses of Washingtonia robusta Pruning Waste

631

- Çolak, S., G. Çolakoğlu, I. Aydın, and H. Kalaycioğlu. 2007. Effects of steaming process on some properties of eucalyptus particleboard bonded with UF and MUF adhesives. *Building and Environment* 42:304–309.
- De Boodt, H. 1975. Caractères physiques et disponibilité en eau des substrats. *Annales de Gembloux* 81:59–72.
- Downer, A. J., D. R. Hodel, and M. J. Mochizuki. 2009. Pruning landscape palms. *HortTechnology* 19:695–699.
- European Committee for Standardization. 1993a. *Fibreboards: Determination of resistance to axial withdrawal of screws* (EN 320). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- European Committee for Standardization. 1993b. *Particleboards and fibreboards: Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board* (EN 319). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- European Committee for Standardization. 1993c. *Wood-based panels: Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength* (EN 310). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- European Committee for Standardization. 1994. *Wood-based panels: Sampling and cutting of test pieces and expression of test results* (EN 326-1). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- European Committee for Standardization. 2001. *Thermal performance of building materials and products: Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods: Products of high and medium thermal resistance* (EN 12667). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- European Committee for Standardization. 2003. *Particleboards: Specifications* (EN 312). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- Felger, R. S., M. B. Johnson, and M. F. Wilson. 2001. *Trees of Sonora, Mexico*. New York: Oxford University Press.
- García-Gomez, A., M. P. Bernal, and A. Roig. 2002. Growth of ornamental plants in two composts prepared from agroindustrial wastes. *Bioresource Technology* 83:81–87.
- García-Ortuño, T., J. Andréu-Rodríguez, M. T. Ferrández-García, M. Ferrández-Villena, and C. E. Ferrández-García. 2011. Evaluation of the physical and mechanical properties of particleboard made from giant reed (*Arundo donax* L.). *BioResources* 6:477–486.
- Hernández-Apaolaza, L., A. M. Gascó, J. M. Gascó, and F. Guerrero. 2005. Reuse of waste materials as growing media for ornamental plants. *Bioresource Technology* 96:125–131.
- Ingelmo, F., R. Canet, M. A. Ibañez, F. Pomares, and J. García. 1998. Use of MSW compost, dried sewage sludge, and other wastes as partial substitutes for peat and soil. *Bioresource Technology* 63:123–129.
- Navarro, A. F., J. Cegarra, A. Roig, and M. P. Bernal. 1991. An automatic microanalysis method for the determination of organic carbon in wastes. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 22:2137–2144.
- Ndazi, B., J. V. Tesha, and E. T. N. Bisanda. 2006. Some opportunities and challenges of producing bio-composites from non-wood residues. *Journal of Materials Science* 41:6984–6990.
- Nemli, G., H. Kalaycioğlu, and T. Alp. 2001. Suitability of date palm branches for particleboard production. *Holz als Roh und Werkstoff* 59:411–412.
- Pan, Z., A. Cathcart, and D. Wang. 2006. Properties of particleboard bond with rice bran and polymeric methylene diphenyl diisocyanate adhesives. *Industrial Crops and Products* 23:40–45.
- Roberts, N. C. 1989. *Baja California plant field guide*. La Jolla, Calif.: Natural History Publishing.
- Sellers, T. 2000. Growing markets for engineered products spurs research. *Wood Technology* 127:40–43.
- Simon, M. D., M. Nieves-Cordones, and M. Nieves. 2010. Differences in growth and ornamental parameters between young *Chamaerops humilis* L. and *Washingtonia robusta* H. Wendl palm trees in response to salinity. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 85:7–11.
- Urrestarazu, M., G. A. Martínez, and M. C. Salas. 2005. Almond shell waste: Possible local rockwool substitute in soilless crop culture. *Scientia Horticulturae* 103:453–460.

Valorización agroindustrial de residuos lignocelulósicos (*Arundo donax* L.,
Washingtonia robusta H. Wendl)

3. Publicaciones

Clara Eugenia Ferrández García



PANELS MADE FROM GIANT REED BONDED WITH NON-MODIFIED STARCHES

Clara E. Ferrández-García,* Javier Andreu-Rodríguez, María T. Ferrández-García,
Manuel Ferrández-Villena, and Teresa García-Ortuño

Clara Eugenia Ferrández García

PEER-REVIEWED ARTICLE

bioresources.com

PANELS MADE FROM GIANT REED BONDED WITH NON-MODIFIED STARCHES

Clara E. Ferrández-García,* Javier Andreu-Rodríguez, María T. Ferrández-García, Manuel Ferrández-Villena, and Teresa García-Ortuño

Panels were made from *Arundo donax* L. particles bonded with different non-modified starches as adhesive without chemical additives by hot-pressing at a low temperature (110 °C) and pressure (2.6 N/mm²). The experimental panels were tested for their physical and mechanical properties according to the procedures defined by the European Union (EN) Standard. The microstructure of samples was observed by scanning electron microscopy (SEM). Panels manufactured with potato starch had the highest modulus of rupture and modulus of elasticity, meeting the standard for load bearing (grade P4 for indoor use in dry ambient) (EN 312: 2003). Panels made with corn starch and wheat flour, at a 10% level and three pressing cycles met the standard for general uses (grade P1). Panel bonded with rye bran flour achieved the best internal bond strength. The water resistance was poor and needs to be improved.

Keywords: Giant reed; SEM; Eco-friendly particleboard; Formaldehyde-free; Starch; Microstructure; Silica bodies

Contact information: Departament of Engineering, Escuela Politécnica Superior de Orihuela, Universidad Miguel Hernández de Elche, Ctra. Beniel Km 3.2, 03312 Orihuela (Alicante), Spain; *Corresponding author: cferrandez@umh.es

INTRODUCTION

Particleboard is a composite product manufactured under elevated pressure and temperature from particles of wood or other lignocellulosic fibrous materials and a binder (EN 309, 2005). Particleboard is widely used in furniture, where it is typically overlaid with other materials for decorative purposes. It is the predominant material used in ready-to-assemble furniture, flooring systems, manufactured houses, and underlayment. Since most applications are interior, particleboard is usually bonded with a urea-formaldehyde (UF) resin (Stark *et al.* 2010). However, UF adhesive can release low concentrations of formaldehyde gas from bonded wood-based products. When the products are new, high indoor temperatures or humidity can cause increased release of formaldehyde. In the European Union, formaldehyde is considered a high-priority pollutant. Therefore, there is much interest in developing more environmentally friendly adhesives. Many researchers have investigated the use of natural polymers obtained from plants and animals such as starch, proteins, lignins, tanins, *etc.* (Imam *et al.* 2001; El-Wakil *et al.* 2007; Ciannamea *et al.* 2010; Moubarik *et al.* 2010; Wang *et al.* 2011; Treusch and Petutschnigg 2012).

Starch is a relatively inexpensive and renewable product from plants (Kennedy 1989). Annual starch production from cereals is approximately 2050 million tonnes, and from roots and tubers, approximately 679 million tonnes (Tester and Karkalas 2002; Burrell 2003). In addition to being the main source of energy in the human diet, starch is also used for a wide variety of industrial processes: as an adhesive in paper making, as

Clara Eugenia Ferrández García

PEER-REVIEWED ARTICLE

bioresources.com

additive in cement, and as a binder in gypsum plaster and gypsum fiber board (Burrell 2003). It is also used as natural filler in traditional plastics, and more recently, as a main component in polymer blends, and composites in the form of thermoplastic starch (TPS) (Kaseem *et al.* 2012). However, the bonding capacity of native starches has been characterized as not being strong enough to glue wood (Imam *et al.* 2001). To solve this problem, physical, chemical, and/or enzymatic modifications have been considered (Kennedy 1989; Singh *et al.* 2010). The chemical modifications are usually alkali or acid treatments (Stofko 1982; Moubarik *et al.* 2010; Wang *et al.* 2011) or oxidation (Singh *et al.* 2010). Physical modifications are produced by cooking, extrusion, spray drying, and annealing, *etc.*

The two major components of starch are amylose and amylopectin. These two molecules are assembled together to form semi-crystalline granules. The proportions of the two molecules and the size and shape of the granule vary between species. The granules must be opened through processing to obtain adhesive bonding. When native starch granules are heated in water, they are gradually disrupted, resulting in phase transition from an ordered granular structure into a disordered state in water, which is known as “gelatinization” (Lelievre 1974; Atwell *et al.* 1988; Ratnayake and Jackson 2008; Xie *et al.* 2012). Full gelatinization of starch under shearless conditions requires an excess of water (Xie *et al.* 2012). If the water concentration is limited, the complete gelatinization will not occur in the usual temperature range. But if the temperature is increased, the crystalline regions will be destructured and will eventually melt (Donovan 1979).

The gelatinization/melting behavior of starch is different when the granules are subjected to shear treatment. For example, in extrusion processing, shear forces can physically tear apart the starch granules, allowing faster transfer of water into the interior molecules (Burros *et al.* 1987; Xie *et al.* 2012).

The objective of this study was to manufacture particleboards from giant reed (*Arundo donax* L.) particles as a low-cost lignocellulosic substrate and adhesives based on non-modified starches and cereal flours. The hypothesis to be proven is that the adhesive capability of native starch for bonding lignocellulosic materials can be enhanced if gelatinization/melting of starch is produced during the hot-pressing process. The performance of such panels was evaluated following the procedures defined by the European Union (EN) Standard. The bonding mechanism was observed by scanning electron microscopy (SEM).

EXPERIMENTAL

Materials

Giant reed culms (*Arundo donax* L.) were purchased from a commercial factory in Alicante (Spain) and were dried under ambient conditions for 12 months until reaching 8% moisture content before use. The culms were manually cut into slices (*ca.* 40 cm long) and chipped in a laboratory scale ring knife chipper equipped with a screen of 10 mm openings. The particles were then classified using a horizontal screen shaker. The particles used for this study were the fines that passed through a sieve of 0.25 mm. The particles did not undergo a previous treatment.

As the adhesive, different commercial-grade cereal flours (rice flour, bran rye flour, and wheat flour) and unmodified commercial-grade starches (corn and potato) were

Clara Eugenia Ferrández García

PEER-REVIEWED ARTICLE

bioresources.com

used at 5 and 10% level based on the weight of particles (with an 8% moisture content). No other additives or chemicals were used.

Methods

Seventeen types of panels were made. Pre-weighed raw material was placed into a laboratory drum glue blender (Model LGB 100; IMAL S.r.l., Modena, Italy). The adhesive was mixed with 20% water (based on the weight of particles) at 20 °C, obtaining a suspension, and then added to the blender. The mixture was blended for 5 min at ambient temperature to obtain a homogenized mixture. No wax or any other hydrophobic substances were used. The mat configuration was single layer. Every panel was made with 2000 g of chips, 100 g or 200 g of adhesive (5% or 10%, respectively), and 400 g of water.

Boards measuring 600 mm x 400 mm were manually formed in a mold and pressed in a hot-press under 2.6 N/mm² at 110 °C for 15 min. After pressing, the boards stayed in the mold while cooling down for 1 hour under ambient conditions. During the cooling down, the pressure was not maintained. After that, the particleboards were brushed with distilled water at a rate of 12 g /1000 cm² on the upper surface and then they were hot pressed for a second time under the same pressing conditions. The panels with a 10% level of adhesive were subjected to a third pressing cycle. Two binderless particleboards were manufactured following the same procedure for comparison. The experimental design is shown in Table 1.

Table 1. Manufacturing Conditions of Particleboards

Type	Adhesive	Adhesive content	Pressing cycles	Pressing Temperature (°C)	Pressing Pressure (N/mm ²)	Pressing time (min)
A1	corn starch	5%	2	110	2.6	15 + 15
A2	corn starch	10%	2	110	2.6	15 + 15
A3	corn starch	10%	3	110	2.6	15 + 15 + 15
B1	rice flour	5%	2	110	2.6	15 + 15
B2	rice flour	10%	2	110	2.6	15 + 15
B3	rice flour	10%	3	110	2.6	15 + 15 + 15
C1	rye bran flour	5%	2	110	2.6	15 + 15
C2	rye bran flour	10%	2	110	2.6	15 + 15
C3	rye bran flour	10%	3	110	2.6	15 + 15 + 15
D1	potato starch	5%	2	110	2.6	15 + 15
D2	potato starch	10%	2	110	2.6	15 + 15
D3	potato starch	10%	3	110	2.6	15 + 15 + 15
E1	wheat flour	5%	2	110	2.6	15 + 15
E2	wheat flour	10%	2	110	2.6	15 + 15
E3	wheat flour	10%	3	110	2.6	15 + 15 + 15
Reed 1	-	-	2	110	2.6	15 + 15
Reed 2	-	-	3	110	2.6	15 + 15 + 15

Ferrández-García et al. (2012). "Starch-bonded panels," *BioResources* 7(4), 5904-5916. 5906

Clara Eugenia Ferrández García

PEER-REVIEWED ARTICLE

bioresources.com

Two replicate panels were made for each board type. Once finished, the particleboards were conditioned at a temperature of 20 °C and 65% relative humidity for four days. The finished particleboards were trimmed to avoid edge effects and then cut into various sizes for property evaluation according to EN 326-1 (1999).

Physical and Mechanical Properties

The physico-mechanical properties of particleboard are an indication of quality and suitability in relation to the proposed use of the boards (García Fernández *et al.* 2008). Some physical properties were determined in accordance with the appropriate EN Standards: density (EN 323, 1993), water absorption (WA), and thickness swelling (TS) after 2 and 24-hour immersion (EN 317, 1993). The mechanical properties determined were: modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE) (EN 310, 1993), and internal bond (IB) (EN 319, 1993). Each panel was cut to get six samples for determining density (50 mm x 50 mm), three samples for determining WA/TS (70 mm x 70 mm), six specimens for the measurement of MOR/MOE (different lengths, depending on the thickness, x 50 mm width), and three specimens for the measurement of IB (50 mm x 50 mm). Tests for mechanical properties, WA, TS, and density were conducted on an Imal universal testing machine (Model IB600, Modena, Italy).

Scanning Electron Microscopy (SEM)

The microstructure of the particleboards of the giant reed and the interfacial bonding of the experimental panels were observed using a Hitachi S3000N microscope equipped with an X-ray detector for microanalysis (EDS), model Bruker XFlash 3001.

Statistical Analyses

Data for each test were statistically analyzed. Analysis of variance (ANOVA) and the *t*-test were used to test ($\alpha = 0.05$) for significant difference between factors and levels. When the ANOVA indicated a significant difference among factors and levels, a comparison of the means was done employing a Tukey HSD and a Duncan's test to identify which groups were significantly different from others at a 95% confidence level.

RESULTS AND DISCUSSION

The panels obtained with only one pressing cycle were not sufficiently bonded, and their edges broke up partially when demolding. These panels were not evaluated. It is obvious that the temperature of the hot press and the water content of the mat did not suffice to disrupt the granules of starch during the first hot-pressing, resulting in particleboards with very poor qualities. The particleboards tested were manufactured with two and three pressing cycles. In these, water was brushed on the surface prior to hot-pressing. According to Kelly (1977), moisture at the mat surface vaporizes when the press closes and the resultant steam flows to a cooler region (toward the mat centre) where it condenses. It seems that when this condensed hot water contacts the granules of starch that are under pressure, the gelatinization/melting is produced and the bonding capability is enhanced.

Clara Eugenia Ferrández García

PEER-REVIEWED ARTICLE

bioresources.com

Physical Properties

The results of thickness, density, thickness swelling, and water absorption tests of the produced particleboards are shown in Table 2.

Table 2. Mean Values of Some Physical Properties of Panels

Type	Thickness (mm)	Density (Kg/m ³)	TS (%) 2 h	TS (%) 24 h	WA (%) 24 h
A1	14.24 (1.56)	883.06 (72.88)	25.95 (8.05)	27.03 (8.01)	96.94 (11.97)
A2	13.54 (0.02)	927.94 (17.05)	27.39 (5.88)	38.68 (6.29)	75.39 (0.54)
A3	13.01 (0.92)	929.80 (33.60)	38.18 (1.85)	49.21 (0.10)	71.51 (14.69)
B1	13.56 (1.32)	812.28 (45.20)	25.68 (2.04)	28.23 (1.50)	115.45 (2.44)
B2	13.02 (1.56)	825.66 (26.07)	28.60 (1.65)	42.06 (5.89)	106.75 (14.90)
B3	13.04 (1.96)	830.37 (13.48)	51.46 (0.01)	58.83 (2.40)	98.66 (2.63)
C1	13.78 (0.50)	873.86 (47.79)	27.79 (4.14)	33.12 (7.84)	94.68 (5.23)
C2	13.00 (0.44)	915.30 (11.60)	18.28 (6.63)	18.45 (5.31)	54.92 (6.53)
C3	13.00 (0.02)	932.30 (12.58)	32.69 (12.09)	41.91 (14.45)	78.37 (28.52)
D1	13.04 (0.68)	913.55 (1.77)	42.11 (9.34)	49.22 (8.66)	96.71 (16.15)
D2	13.02 (0.02)	920.76 (7.07)	54.86 (4.98)	62.41 (7.07)	92.53 (7.30)
D3	14.25 (1.56)	914.61 (29.91)	41.24 (0.02)	48.68 (1.25)	108.07 (22.64)
E1	13.58 (1.46)	883.50 (3.53)	39.42 (3.87)	52.80 (13.38)	70.69 (2.34)
E2	14.96 (1.22)	885.55 (76.28)	48.16 (7.65)	66.26 (16.74)	82.37 (3.03)
E3	13.80 (0.76)	897.15 (26.42)	38.72 (12.43)	49.67 (24.53)	86.63 (25.30)
Reed 1	14.72 (0.76)	856.84 (32.99)	57.34 (4.12)	74.54 (6.06)	135.99 (1.68)
Reed 2	14.54 (0.56)	845.69 (16.37)	61.49 (2.43)	80.01 (1.59)	133.73 (4.05)

Values in parentheses are standard deviations.

Thickness swelling

Particleboards should have a maximum thickness swelling value of 15% for 24 h immersion for load bearing (P4 grade EN 312, 2003). Average thickness swelling of the specimens for 2 h immersion ranged from 18.28 to 61.49%. For 24 h immersion, the results lay between 18.45 and 80.01%. There is no minimum value of TS in the standards for general uses and furniture manufacturing in dry ambient (P1 and P2 grades, respectively). None of the panels met the standard value of TS for load bearing (grade P4), but they could be used, if their mechanical properties meet the standards for general uses and indoor fitment. As can be seen in Fig. 1, in general, the TS values increased with increasing the adhesive content. This is due to the high affinity that the starches have for water. The binderless particleboards had the highest TS values. These particleboards were manufactured without adhesives, and the pressure and temperature applied during the compression of the mats were not sufficiently high to produce the self-bonding of the lignocellulosic particles, resulting in particleboards with very poor qualities. The binderless particleboards that have been reported in the literature were produced with steam injection during the hot pressing at pressing temperatures above 175 °C and pressure around 10 MPa (Panyakaew and Fotios 2011; Umemura *et al.* 2009; Okuda *et al.* 2006; Velásquez *et al.* 2002; Angles *et al.* 1999; Suchsland *et al.* 1987). The panels bonded with bran rye flour had the lowest TS values. This may be due to the presence of

Clara Eugenia Ferrández García

PEER-REVIEWED ARTICLE

bioresources.com

lipids in the bran flour. Copeland *et al.* (2009) reported that complexes between amylase and lipids reduce the solubility of starch in water, decreasing the swelling capacity and increasing the gelatinisation temperature.

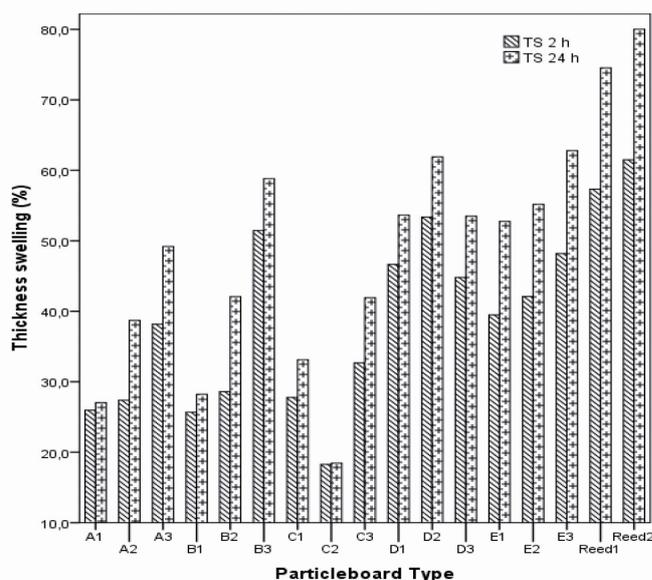


Fig. 1. Average results of thickness swelling (TS) of the produced particleboards. A: cornstarch; B: rice flour; C: rye bran flour; D: potato starch; E: wheat flour; Reed: binderless. The minimum TS value for P4 grade (load bearing) is 15%.

Mechanical properties

Based on EN standards (EN 312, 2003), the minimum requirement of MOR for general uses is 11.5 N/mm² and an IB value of 0.24 N/mm²; these are the minimum requirements for general uses in dry ambient (P1 grade). A MOR value of 13 N/mm², a MOE value of 1600 N/mm², and an IB value of 0.35 N/mm² are the minimum requirements for furniture manufacturing (P2 grade). For load bearing (P4 grade), the values of MOR, MOE, and IB are 15 N/mm², 2300 N/mm², and 0.35 N/mm², respectively. The values of MOR ranged from 3.20 to 16.67 N/mm².

Samples A3 and E3 (made with 10% corn starch and wheat flour, respectively, and three pressing cycles) had a MOR sufficiently high to meet the requirements for general uses as can be observed in Fig 2. Panel D2 (10% potato starch) exceeded the MOR requirement for indoor fitment (including furniture manufacturing). Panel D3 met the MOR requirement for load bearing. The MOR significantly increased when the adhesive usage was increased from 5% to 10%, independently of the type of adhesive used. The third pressing cycle affected the MOR, improving it for corn starch, potato starch, and wheat flour. The best results were achieved by potato starch, followed by wheat flour and corn starch.

Clara Eugenia Ferrández García

PEER-REVIEWED ARTICLE

bioresources.com

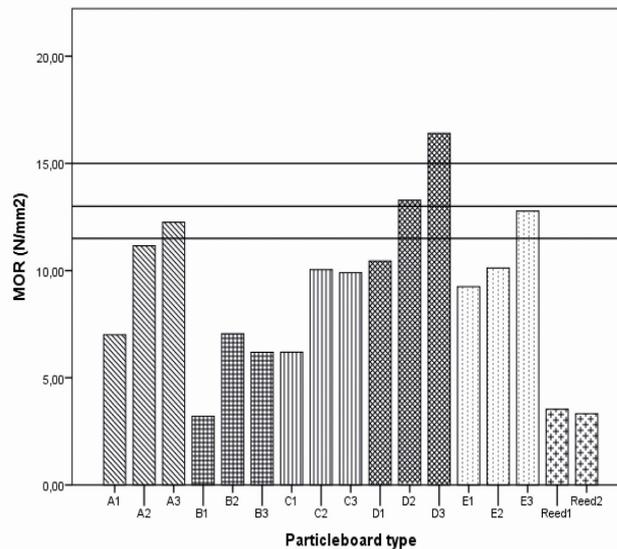


Fig. 2. Average values of modulus of rupture (MOR) of the produced particleboards. The horizontal lines are the minimum values of MOR: 11.5 N/mm² for particleboards for general uses in dry ambient (P1 grade); 13 N/mm² for furniture manufacturing (P2 grade); and 15 N/mm² for load bearing (P4 grade).
A: corn starch; B: rice flour; C: rye bran flour; D: potato starch; E: wheat flour; Reed: binderless

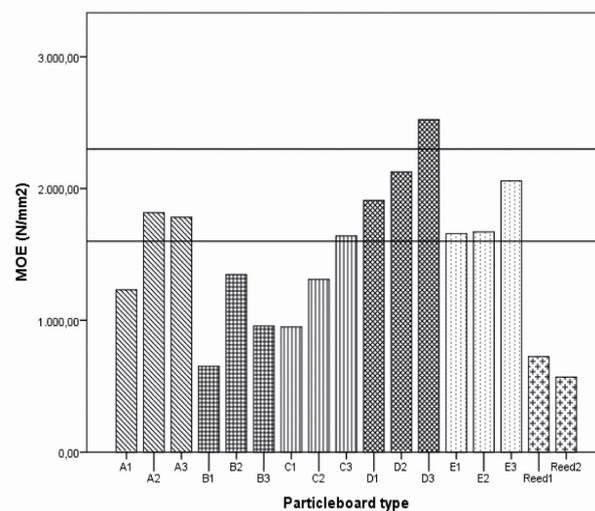


Fig. 3. Average values of modulus of elasticity (MOE) of the particleboards. The horizontal lines represent the minimum values to meet the standard for P2 and P4 grades: 1600 N/mm², indoor applications including furniture manufacturing in dry ambients (P2), and 2300 N/mm² for load bearing (P4).
A: corn starch; B: rice flour; C: rye bran flour; D: potato starch; E: wheat flour; Reed: binderless

Clara Eugenia Ferrández García

PEER-REVIEWED ARTICLE

bioresources.com

The values of MOE lay between 569.09 and 2520.97 N/mm². There is no minimum requirement of MOE for general uses. Particleboards A2, A3, C3, D1, D2, D3, E1, E2, and E3 met the requirements for grade P2 (indoor fitment, including manufacture). Panel D3 exceeded the standard for grade P4 (load bearing in dry ambient). Generally, the MOE significantly increased when the adhesive usage was increased from 5% to 10%, independently of the type of adhesive used. A third pressing cycle influenced the MOE in different ways: improving the panels made with bran rye flour, potato starch, and wheat flour, and decreasing its value for the rest of adhesives and the binderless panels.

The results of IB ranged between 0.04 to 0.40 N/mm² (Fig. 4). Panels A2, A3, C2, C3, D1, D2, D3, and E3 met the standard for grade P1 (general uses in dry ambient).

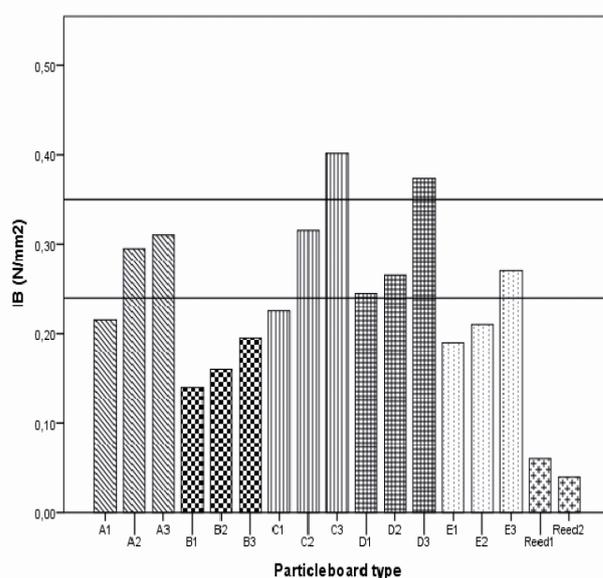


Fig. 4. Average values of internal bond strength (IB) of the particleboards.

The horizontal lines represent the requirements to meet the standard for P1, P2, and P4 grade (P1: 0.24 N/mm² for general uses in dry ambient; P2: 0.35 N/mm² for indoor fitments including furniture manufacturing; P4: 0.35 N/mm² for load bearing).

A: corn starch; B: rice flour; C: rye bran flour; D: potato starch; E: wheat flour; Reed: binderless

Panels C3 and D3 achieved the requirement for grades P2 and P4 (indoor fitment and load bearing, respectively). Panel C3 had the highest IB strength value. The IB was influenced by the level of adhesive used, improving with increasing the level from 5% to 10%. The third pressing cycle had a profound effect on this property, increasing the IB for all the adhesives.

Considering the three mechanical properties studied together, it can be said that particleboards A3 and E3 (made with 10% corn starch and wheat flour, respectively, and three pressing cycles) had a MOR, MOE, and IB sufficiently high to meet the requirements for general uses as can be observed in Figs. 2 and 3. Panel D2 (10% potato starch) exceeded the MOR and MOE requirements for indoor fitment (including furniture

Clara Eugenia Ferrández García

PEER-REVIEWED ARTICLE

bioresources.com

manufacturing) but failed to achieve the IB requirement. Panel D3 met the requirements for load bearing (MOR, MOE, and IB).

All this suggests that potato starch and wheat flour are the better adhesives for producing particleboards under these conditions. Potato starch is rich in esterified phosphorus and exhibits higher swelling power and solubility than cereal starches. On the other hand, wheat flour has, beside starch, proteins, which include gluten that has been used as adhesive for particleboard manufacturing (El-Wakil *et al.* 2007). The presence of lipids in the bran rye flour reduced the solubility of starch, resulting in panels with worse mechanical properties. Panels B1, B2, B3, Reed 1, and Reed 2 had the lowest MOR, MOE, and IB values (rice flour and binderless). These panels had the lowest densities, thus suggesting that the density of particleboard plays a very important role on the bending strength as expected. The rice flour may need a higher temperature or pressure for the complete gelatinization/melting of its starch.

In order to improve the general properties of these particleboards, substances such as NaOH and tannins can be added to the adhesives. Tondi *et al.* (2012) demonstrated that adding these substances to starch increased the mechanical properties of experimental particleboard samples.

SEM Observations

Pieces of samples from the particleboards tested were fractured and then observed by SEM in order to elucidate the mechanism of bonding. Another panel was made placing the components separated in the mold before the hot-pressing: potato starch in one side and particles on the other side, to view how the starch gelatinized or melted.

Figures 5A and 5B show the fractured surfaces of panels bonded with potato starch at a 5% level and two pressing cycles, and at a 10% level and three pressing cycles, panels D1 and D3, respectively.

- In micrograph A, the granules of native potato starch are evident. Some granules look bigger than the others. Some granules look damaged (see the black arrows). This is due to the thermopressing process. Gaps were also visible, meaning that the consolidation of the mat had not been totally achieved. This is consistent with the results of the mechanical properties.
- In micrograph B, the granules are no longer visible, and there are areas where the starch has been gelatinized, appearing like a polymer matrix (see the white arrows). This particleboard (D3) had better mechanical properties than panel D1. This suggests that the bonding capability of potato starch is enhanced when the gelatinization/melting is produced while in contact with the lignocellulosic particles during the consolidation of the mat in the hot press, after three pressing cycles. In the center of micrograph 5B, a piece of tissue of the outer skin of giant reed stems can be seen. The white spots are silica bodies, also known as phytoliths.

Figure 6 shows a micrograph taken from a fractured piece of the panel manufactured with potato starch as a polymer matrix on one side and particles of giant reed on the other side. It can be seen that the gelatinized/melted starch looks like plastic. The white spots that can be seen here are crystals of potassium chloride.

Clara Eugenia Ferrández García

PEER-REVIEWED ARTICLE

bioresources.com



A



B

Fig. 5. SEM micrographs: (A) fractured surface of particleboard D1 manufactured with 5% of potato starch and two hot-pressings; (B) fractured surface of panel D3 made with 10% of potato starch and three hot-pressings

Clara Eugenia Ferrández García

PEER-REVIEWED ARTICLE

bioresources.com

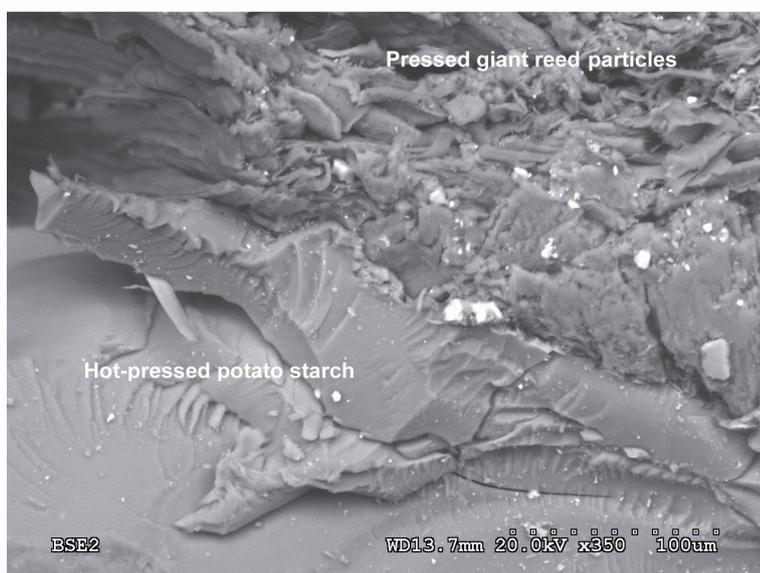


Fig. 6. SEM micrograph of the fractured surface of potato starch as a polymer matrix on one side and particles of giant reed on the other side.

CONCLUSIONS

1. Panels of giant reed particles were produced using different nonmodified cereal flours and native starches as binders without the addition of chemicals by hot pressing at low pressing temperature (110 °C) and pressure (2.6 N/mm²).
2. The best performance in terms of mechanical properties was obtained using potato starch. With 10% of potato starch and three pressing cycles, panels exceeded the MOR, MOE, and IB values for the P4 grade (load bearing in dry conditions) standard, but failed to achieve the requirement of thickness swelling after 24 h. Particleboards obtained with a 10% of potato starch and two pressing cycles met the requirements for general uses and indoor fitment, including furniture manufacture (in dry ambients).
3. Panels made with corn starch and wheat flour met the standards for general uses (in dry conditions).
4. The SEM observations confirm that gelatinization of the starch is achieved during the hot pressing of the mats.
5. Since the particles were not pre-treated, the starches were not modified, and the pressing conditions were very low; this method can be considered to be a low-cost procedure to manufacture environmentally friendly particleboards.

Clara Eugenia Ferrández García

PEER-REVIEWED ARTICLE

bioresources.com

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful for the support of the Ministerio de Economía y Competitividad of Spain (MINECO, ref. BIA 2009-11605).

REFERENCES CITED

- Anglès, M. N., Reguant, J., Montané, D., Ferrando, F., Farriol, X., and Salvadó, J. (1999). "Binderless composites from pretreated residual softwood," *J. Appl. Polym. Sci.* 73, 2485-2491.
- Anonymus (1996). *Particleboard – From Start to Finish*, National Particleboard Association, Gaithersburg, Maryland, USA
- Atwell, W.A., Hood, L.F., Lineback, D.R., Varriano-Marston, E., and Zobel, H. F. (1988). "The terminology and methodology associated with basic starch phenomena," *Cereal Food World* 33, 306-311.
- Burrell, M. M. (2003). "Starch: The need for improved quality or quantity - An overview," *J. Experimental Botany* 54(382), 451-456
- Burros, B. C., Young, L. A., and Carroad, P. A. (1987). "Kinetics of corn meal gelatinization at high temperature and low moisture," *J. Food Sci.* 52, 1372-1376.
- Ciannamea, E. M., Stefani, P. M., and Ruseckaite, R. A. (2010). "Medium-density particleboards from modified rice husks and soybean protein concentrate-based adhesives," *Bioresour. Technol.* 101, 818-825.
- Copeland, L., Blazek, J., Salman, H., and Tang, M. C. (2009). "Form and functionality of starch," *Food Hydrocolloids* 23, 1527-1534.
- Donovan, J. W. (1979). "Phase transitions of the starch-water system," *Biopolym.* 18, 263-275.
- El-Wakil, N. A., Abou-Zeid, R. E., Fahmy, Y., and Mohamed, A. Y. (2007). "Modified wheat gluten as a binder in particleboard made from reed," *J. Appl. Polym. Sci.* 106(6), 3592-3599.
- EN 310, (1993). "Wood-based panels. Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength."
- EN 312, (2003). "Particleboards. Specifications."
- EN 317, (1993). "Particleboards and fibreboards. Determination of swelling in thickness after immersion in water."
- EN 319, (1993). "Particleboards and fibreboards. Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board."
- EN 323, (1993). "Wood-based panels. Determination of density."
- EN 326-1, (1994). "Wood-based panels. Sampling and cutting of test pieces and expression of test results."
- García Fernández, F., García Esteban, L., de Palacios, P., Navarro, N., and Conde, M. (2008). "Prediction of standard particleboard mechanical properties utilizing an artificial neural network and subsequent comparison with a multivariate regression model," *Investigación agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 17(2), 178-187.
- Imam, S. H., Gordon, S. H., Mao, L., and Chen, L. (2001). "Environmentally friendly wood adhesive from a renewable plant polymer: Characteristics and optimization," *Polym. Degrad. Stab.* 73(3), 529-533.
- Kaseem, M., Hamad, K., and Deri, F. (2012). "Thermoplastic starch blends: A review of

Ferrández-García et al. (2012). "Starch-bonded panels," *BioResources* 7(4), 5904-5916. 5915

Clara Eugenia Ferrández García

PEER-REVIEWED ARTICLE

bioresources.com

- recent works," *Polym. Sci.* 54(2), 165-176.
- Kelly, M. W. (1977). "Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboard," Gen. Tech. Rept. FPL-10. USDA forest Serv., Forest Prod. Lab., Madison, Wisconsin. USA
- Kennedy, H. M. (1989). "Starch- and dextrin-based adhesives," *Adhesives from Renewable Resources*. ACS Symposium Series, (385) 326-336.
- Lelievre, J. (1974). "Starch gelatinization," *J. Appl. Polym. Sci.* 18, 293-296.
- Moubarik, A., Allal, A., Pizzi, A., Charrier, F., and Charrier, B. (2010). "Preparation and mechanical characterization of particleboard made from maritime pine and glued with bio-adhesives based on cornstarch and tannins," *Mader. Cienc. Tecnol.* 12(3), 189-197.
- Okuda, N., Hori, K., and Sato, M. (2006). "Chemical changes of kenaf core binderless boards during hot pressing (II): effects on the binderless board properties," *J. Wood Sci.* DOI 10.1007/s10086-005-0744-5.
- Panyakaew, S., and Fotios, S. (2011). "New thermal insulation boards made from coconut husk and bagasse," *Ener. Build.* 43, 1732-1739.
- Ratnayake, W. S., and Jackson, D. S. (2008). "Starch gelatinization," *Adv. Food Nutr. Res.* 55, 221-268.
- Singh, A. V., Nath, L. K., and Singh, A. (2010). "Pharmaceutical, food and non-food applications of modified starches: A critical review," *EJEAFChe* 9 (7), 1214-1221.
- Stark, N. M., Cai, Z., and Carll, C. (2010). "Wood-based composite materials: Panel products, glued-laminated timber, structural lumber, and wood-nonwood composite materials," General Technical Report FPL-GTR-190, Madison, WI: USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory: 11-1 - 11-28, Chapter 11.
- Stofko, J. 1982. "Steam bonding of solid lignocellulosic material," U.S. Patent 4,357,194.
- Suchsland, O., Woodson, G. E., and McMillin, C. W. (1987). "Effect of cooking conditions on fiber bonding in dry formed binderless hardboard," *Forest Product J.* 37, 65-69.
- Tester, R. F., and Karkalas, J. (2002). "Polysaccharides. II. Polysaccharides from eukaryotes," In: Vandamme, E. J., De Baets, S., and Steinbuchel, A. (eds.), *Starch in Biopolymers*, Wiley-VCH, Weinheim, Vol. 6, pp. 381-438.
- Tondi, G., Wieland, S., Wimmer, T., Schnabel, T., and Petutschnigg, A. (2012). "Starch-sugar synergy in wood adhesion science: basic studies and particleboard production," *Eur. J. Wood Prod* 70, 271-278.
- Treusch, O., and Petutschnigg, A. (2012). "A combination of polyethylene and phenolic resin as an adhesive for wood-based panels," *BioResources* 7(1), 789-798.
- Umemura, K., Kaiho, K., and Kawai, S. (2009). "Characterization of bagasse-rind particleboard bonded with chitosan," *J. Appl. Polym. Sci.* 113(4), 2103-2108.
- Velásquez, J. A., Ferrando, F., and Salvadó, J. (2002). "Binderless from steam exploded *Miscanthus sinensis*: The effect of a grinding process," *Holz Roh Werks.* 60, 297-302.
- Wang, Z., Gu, Z., Hong, Y., Cheng, L., and Li, Z. (2011). "Bonding strength and water resistance of starch-based wood adhesive improved by silica nanoparticles," *Carbohydr. Polym* 86(1), 72-76.
- Xie, F., Halley, P. J., and Avérous, L. (2012). "Rheology to understand and optimize processibility, structures and properties of starch polymeric materials," *Progr. Polym. Sci.* 37, 595-623.

Article submitted: July 4, 2012; Peer review completed: October 15, 2012; Revised version received and accepted: October 23, 2012; Published: October 26, 2012.

Ferrández-García et al. (2012). "Starch-bonded panels," *BioResources* 7(4), 5904-5916. 5916

4.- RESULTADOS

4. RESULTADOS.

EVALUATION OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF PARTICLEBOARD MADE FROM GIANT REED (*ARUNDO DONAX* L.)

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS TABLEROS DE PARTÍCULAS DE CAÑA COMÚN (*ARUNDO DONAX* L.)

Los objetivos de este trabajo fueron:

- Utilizar la caña común como materia prima para elaborar tableros de partículas y así ayudar al control de esta planta invasora, dándole un valor añadido.
- Evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los tableros elaborados para averiguar si son comparables a los tableros tradicionales de partículas de madera. Y de esta forma ofrecer una alternativa como material lignocelulósico a la industria de la madera.

Para conseguir los objetivos planteados se siguió el siguiente método de trabajo:

La principal materia prima fueron cañas de 5.5 m de longitud media y 2 cm de diámetro, adquiridas en una fábrica en Albufera (Alicante). Una vez en el laboratorio de construcción de la EPSO (UMH), se mantuvieron secándose al aire libre durante 6 meses hasta que su contenido en humedad fue del 8,6 %. Para obtener las partículas, primero se eliminaron los restos de hojas e inflorescencias y se trocearon manualmente en segmentos de unos 40 cm. Posteriormente, se introdujeron en una trituradora de cuchillas que lleva acoplada una rejilla con aberturas de 10 mm. Después se cribaron en una tamizadora-vibradora con cribas de 8-4-2-1-0.25 mm, para clasificar las partículas. Se utilizaron diferentes proporciones y tamaños de partículas (0.25 a 1, 0.5 a 2, 1 a 4, y 2 a 4 mm) en la elaboración de los tableros.

El adhesivo utilizado fue urea-formaldehído con un porcentaje de sólidos solubles del 64-66 %. Se usó un 8 %, basado en el peso de las partículas. Como acelerador se utilizó un 0.4 % de sulfato amónico.

Clara Eugenia Ferrández García

Se hicieron cinco tipos de paneles. Las partículas de caña, previamente pesada, se colocaron en una encoladora rotativa de eje horizontal (Modelo LGB 100; IMAL Srl, Modena, Italia). Antes de pulverizar la resina, el endurecedor se disolvió a una concentración de 4% en agua y se mezcló inmediatamente con ésta. La mezcla adhesiva se pulverizó después sobre las partículas con boquillas neumáticas y se mezcló durante 5 min a temperatura ambiente para obtener una mezcla homogeneizada. No se añadió cera ni otras sustancias hidrófobas. La configuración de la manta fue de una sola capa. La manta se formó manualmente en un molde y se prensó en una prensa de platos calientes a una presión de 3,5 N/mm², a 120 ° C, durante 6 min. Se hicieron dos tableros de cada tipo.

Después del prensado, los tableros de partículas se acondicionaron a 20 ° C y 65% de humedad relativa durante cuatro semanas en una posición vertical. Posteriormente los tableros se cortaron, para evitar los efectos de los bordes a un tamaño final de 50 cm x 35 cm, y se obtuvieron las probetas de varios tamaños para la evaluación de propiedades de acuerdo con la norma EN 326-1 (1999).

Las propiedades físicas que se determinaron fueron: contenido de humedad (MC) (EN 322, 1993), densidad (EN 323, 1993), absorción de agua (WA) e hinchamiento en espesor (TS) después de inmersión de 24-horas (EN 317, 1993). Las propiedades mecánicas determinadas fueron: resistencia a flexión (MOR) y módulo de elasticidad (MOE) (EN 310, 1993), resistencia a tracción perpendicular (IB) (EN 319, 1993), y fuerza de arranque de tornillo (SH) (EN 320, 1993).

El tratamiento estadístico de los datos obtenidos se realizó mediante un análisis estadístico de la varianza (ANOVA) que permitía evaluar los valores medios de cada parámetro para los distintos tipos de tableros y para cada tratamiento (tamaños de partícula). Cuando el ANOVA indicó una diferencia significativa entre los factores y niveles, se realizó la comparación de las medias empleando la prueba de Duncan para identificar qué grupos fueron significativamente diferentes a un nivel de confianza del 95%.

Clara Eugenia Ferrández García

Propiedades físicas.

Los tableros obtenidos tuvieron una densidad desde 628,33 hasta 758,11 kg/m³ y un espesor de 7,25 a 10,61 mm. El contenido en humedad varió de 6,25 a 10,61%. Los tableros de partículas deben tener un valor máximo de hinchamiento en espesor (TS) de 16% tras 24-h de inmersión en agua, para ser considerados paneles estructurales (EN 312, 2003). Los valores medios de hinchamiento en espesor de las probetas ensayadas fueron de 15,04% a 35,9%. Los paneles tipo C y D (elaborados con tamaños de partículas de 1 a 2 mm, y de 1 a 4 mm, respectivamente) cumplieron con el citado valor máximo de hinchamiento en espesor pudiéndose considerar paneles estructurales. Estos paneles presentaron las densidades más altas. Se observó que los valores de TS aumentaban con la disminución de la densidad, excepto para el panel tipo E (tamaño de partícula de 2 a 4 mm).

Los paneles tipo E fueron los menos densos, de mayor grosor, y fueron fabricados con el tamaño de partícula más grande. Estas propiedades pueden ser debidas a una aplicación insuficiente de la presión durante la compresión de la manta. Kelly (1977) informó que se requiere una presión mayor, para alcanzar una gravedad específica deseada, para partículas más estrechas y gruesas que la presión requerida para partículas más anchas y delgadas.

Propiedades Mecánicas.

Basándose en las normas de la Unión Europea aplicables a los tableros de partículas se requiere una resistencia a flexión (MOR) mínima de 12,5 N/mm² (no hay requisito para el módulo de elasticidad) para usos generales. Se requiere un valor mínimo de resistencia a la flexión de 13 N/mm² y un módulo de elasticidad de 1800 N/mm² para uso interior, incluyendo fabricación de mobiliario. Los requisitos para clasificar los paneles como estructurales son un mínimo de resistencia a flexión de 15 N/mm² y de módulo de elasticidad de 2300 N/mm² (EN 312, 2003).

Los valores medios de resistencia a flexión de los tableros obtenidos fluctuaron entre 9,93 y 17,67 N/mm² y los de MOE entre 1467,86 y 3025,90 N/mm². Los tableros de partículas elaborados a partir de partículas más pequeñas (tipos A y B) obtuvieron valores

Clara Eugenia Ferrández García

de MOR y MOE lo suficientemente altos para cumplir con los requisitos para usos generales y fabricación de muebles. Los paneles tipo C y D superaron los requisitos de tablero estructural, mientras que los paneles tipo E tuvieron valores inferiores de MOR y MOE de los especificados. Los paneles con mayores densidades tuvieron los mayores valores de resistencia a flexión y módulo de elasticidad, lo que sugiere que la densidad de partículas juega un papel muy importante en la resistencia a la flexión, como se esperaba.

En cuanto a la resistencia a la tracción perpendicular, la norma establece unos valores mínimos de $0,28 \text{ N/mm}^2$ (tableros para usos generales), $0,40 \text{ N/mm}^2$ (tableros para uso interior, incluida la fabricación de muebles) y $0,45 \text{ N/mm}^2$ (tableros para uso estructural).

Los valores de resistencia a la tracción (IB) oscilaron entre $0,258$ y $1,309 \text{ N/mm}^2$. Los tableros tipo C, D y E tuvieron valores de IB que cumplieron con los requisitos de tableros estructurales. Los paneles tipo B alcanzaron el nivel de IB necesaria para usos generales, mientras que los de tipo A tuvieron el peor valor de IB. Esto indica que la resistencia a tracción perpendicular aumenta con el incremento del tamaño de partícula.

Conclusiones

Los resultados presentados sugieren que es completamente factible usar la caña común como materia prima lignocelulósica sustituta de la madera para la fabricación de tableros de partículas con propiedades aceptables y/o de alta calidad.

Dado que los tableros producidos con partículas de tamaños de 1 a 2 mm y 1 a 4 tuvieron la calidad más deseable, la producción de tales tamaños se recomienda para la molienda de las cañas.

El tamaño de partícula resultó tener un gran efecto sobre las propiedades de los tableros de elaborados con urea-formaldehído con cinco tamaños distintos de partículas. Dado que los tableros de partículas se consideran productos de alto valor y larga duración - tienen una esperanza de vida de varias décadas - los sistemas productivos de caña común podrían ser considerados como un sumidero de carbono. El uso de materiales renovables

Clara Eugenia Ferrández García

como la caña común para la fabricación de tableros de partículas podría ayudar a aliviar la escasez de materias primas para la industria de los tableros de partículas.

Clara Eugenia Ferrández García

AGRICULTURAL AND INDUSTRIAL VALORISATION OF *ARUNDO DONAX* L.

VALORIZACIÓN AGRÍCOLA E INDUSTRIAL DE *ARUNDO DONAX* L.

Los objetivos de este trabajo fueron:

-Caracterizar algunos parámetros agrícolas e industriales de diferentes partes de la caña común para evaluar su potencial como sustrato hortícola y como materia prima para la elaboración de paneles aislante para el sector de la construcción.

Para conseguir los objetivos de este estudio se utilizaron distintos tamaños de partículas de caña común y de su rizoma.

Los métodos analíticos utilizados para caracterizar los medios de cultivo consistieron en: determinar algunas propiedades físicas (densidad aparente (BD), espacio poroso total (TPS) , capacidad de aireación, agua fácilmente disponible (EAW), agua de reserva (WBC), capacidad de retención del agua (TWHC), y contracción de volumen), y parámetros químicos (nitrógeno total (NT), carbono orgánico total (TOC), materia seca, sodio (Na), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), hierro (Fe), cobre (Cu), manganeso (Mn), zinc (Zn), molibdeno (Mo), y boro (B). Los análisis se hicieron por triplicado.

Por otro lado, se hicieron 18 tipos de tableros con los distintos tamaños de partícula y un 10% de Urea-Formaldehído (UF). No se añadió ninguna sustancia hidrófoba a la mezcla. La configuración de la manta fue monocapa. Las mantas se formaron manualmente en unos moldes de medidas 60 x 40 cm. Se prensaron a tres presiones (15.7, 21.0 y 26 kg/cm²) y a dos temperaturas (120 y 140°C) durante 5 min. Los paneles se hicieron por cuatriplicado. Las propiedades determinadas fueron: densidad, Resistencia a flexión (módulo de ruptura (MOR) y módulo de elasticidad (MOE)), resistencia a la tracción perpendicular (cohesión interna IB), fuerza de arranque de tornillo (SH) y la conductividad térmica.

Se realizó el análisis de la varianza (ANOVA) de los valores medios de cada parámetro de cada medio de cultivo y de cada tipo de tablero para probar si había diferencias estadísticamente significativas. La normalidad y homogeneidad de las varianzas se comprobaron usando las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente, antes del

Clara Eugenia Ferrández García

ANOVA. Para comparar las diferencias entre los medios de cultivo y los tableros se utilizó el test de Duncan a $P < 0.05$. También se determinó la desviación estándar de los valores medios de cada parámetro de los tableros. Todos los test estadísticos se llevaron a cabo usando el programa informático SPSS versión 18.0 (SPSS Inc., Chicago, Ill).

Características de los Medios de Cultivo.

Todos los sustratos mostraron unos valores de densidad aparente (BD) dentro del intervalo de valores de este parámetro para un sustrato ideal (Abad, Noguera, y Burés 2001). Los sustratos hechos con partículas del tallo de la caña (SAD) tuvieron valores mayores de que los de los medios de cultivo hechos con partículas procedentes del rizoma de la caña (RAD). El efecto del tamaño de partícula no estaba claro, porque el tratamiento SAD3 tuvo el mayor valor de BD ($0,30 \text{ g/cm}^3$), mientras que el tratamiento RAD3 mostró el valor más bajo de este parámetro ($0,22 \text{ g/cm}^3$).

Por otra parte, todos los medios de cultivo tenían valores adecuados de espacio de poros totales (TPS), dentro del rango óptimo ($> 85\% \text{ vol}$) (Abad et al., 2001). En ambos tipos de sustrato (SAD y RAD), este parámetro disminuye, en general, con la reducción del tamaño de partícula del sustrato. Urrestarazu et al., (2005) también informaron de este hecho en medios de cultivo elaborados con diferentes texturas de residuos de cáscara de almendra. Sin embargo, ninguno de los medios utilizados en este estudio cayeron dentro del intervalo de valores de la capacidad de aireación para un sustrato ideal (Abad et al. 2001).

Los valores de esta propiedad en los medios de cultivo SAD fueron significativamente mayores que los de los medios de cultivo RAD. En general, este parámetro fue mayor en los sustratos a base de SAD con tamaño de partícula fino (1-2 y 0.25-1 mm), mientras que el efecto del tamaño de partícula en el tratamiento RAD no estaba claro, porque RAD2 y RAD3 tenían los valores de capacidad de aireación mayor y menor, respectivamente. El aumento de la capacidad de aireación en medios con textura fina, observada en sustratos SAD, ha sido observado por otros autores en un experimento de sustitución de lana de roca por residuos agrícolas (Urrestarazu et al., 2005).

La mayoría de los sustratos mostraron valores de EAW, WBC y TWHC bajos en comparación con los valores sugeridos para un sustrato ideal (Abad et al 1992; Abad, et al

Clara Eugenia Ferrández García

2001). Este hecho influye negativamente en la capacidad de retención de nutrientes de estos medios de cultivo durante un programa de fertirrigación, aplicándose agua frecuentemente y en pequeñas cantidades (Medina et al. 2009). En general, todos los sustratos preparados con los diferentes tamaños de partículas de SAD poseían mayor agua fácilmente disponible (EAW), similar agua de reserva (WBC), y capacidad de retención de agua (TWHC) inferior en comparación con el tamaño de partícula respectiva de RAD. Además, en la mayoría de los casos, los medios de cultivo con textura gruesa tenían valores mayores de EAW y TWHC, mientras que los valores RGB fueron mayores en los medios con tamaño de partícula 0.25-1 mm. Todos los medios elaborados con diferentes tamaños de partículas de SAD y RAD alcanzaron valores adecuados de la contracción de volumen, dentro de un límite aceptable para un sustrato ideal (<30% vol) (Abad et al 2001). Los valores de este parámetro fueron mayores en los sustratos con textura fina, observándose lo contrario en los sustratos basados en RAD.

El contenido en carbono orgánico total (TOC), macro y micronutrientes, y el contenido de sodio fueron mayores en los sustratos RAD que en los sustratos SAD. En la mayoría de los casos, no se observaron grandes diferencias en las propiedades químicas relacionadas con el tamaño de partícula de SAD o RAD en los medios estudiados. Los medios de cultivo SAD y RAD tuvieron mayores y menores valores de la relación C / N, respectivamente, que la de turba (Abad, Noguera, y Bures 2002;. Bustamante et al 2008), probablemente debido al bajo contenido de N en los sustratos SAD y alta concentración de este nutriente en el caso de los medios RAD. En cuanto a la capacidad de fertilización de los medios estudiados, todos los sustratos mostraron bajos contenidos en macro y micronutrientes en comparación con la turba, excepto en el caso de K (Bustamante et al. 2008). La alta concentración de K presente en los residuos vegetales también ha sido observado por otros autores (Lewandowski et al. 2003).

Características de los tableros de partículas.

Los valores de densidad de los tableros variaron desde 567,2 hasta 842,7 kg/m³, siendo estas densidades mayores que las de las materias primas. En general, un tablero de

Clara Eugenia Ferrández García

partículas convencional con una densidad menor que la densidad de las partículas de madera de las que está constituido es mecánicamente insatisfactorio. La compactación de la manta a una densidad media mayor que la densidad de sus partículas permitirá una mejor superficie de contacto entre las partículas componentes de la misma (Kelly, 1977). Los paneles D, E, y F tuvieron los valores más grandes de densidad, mientras que los paneles tipo M y N alcanzaron los valores más bajos de este parámetro. En general, no hubo diferencias significativas en los valores de densidad debidos a las temperaturas de prensa (120 ó 140 °C), pero sí se observó un aumento significativo de este con la reducción del tamaño de partículas y el aumento de la presión de la prensa. Según las normas europeas, los requisitos mínimos de resistencia a flexión (MOR) de los tableros de partículas son 12,5 N/mm² y 13,0 N/mm² son para ser aptos para usos generales (grado P1) y la fabricación de muebles (grado P2), respectivamente (Unión Europea 2003). No existe un requisito mínimo de módulo de elasticidad (MOE) para usos generales, y para la fabricación de muebles el valor es de 1800 N/mm² (Unión Europea, 2003).

Los valores de MOR variaron desde 3,46 hasta 15,15 N/mm². Los valores de MOE fluctuaron desde 566,94 hasta 2358,45 N/mm². En general, los tableros hechos con partículas más pequeñas y con presiones más altas (tipos C a F) alcanzaron valores de MOR y MOE dentro de los límites aceptables para usos generales y montajes de interior (incluyendo mobiliario). El resto de los paneles no cumplió con los requisitos para MOR y MOE para usos generales y para la fabricación de muebles. Estas propiedades mecánicas fueron mayores, en general, en los tableros de partículas con tamaño de partícula fino y una mayor presión de la prensa. No se observaron diferencias significativas en los valores de resistencia a la flexión de los tableros de partículas debido a la temperatura de la prensa.

Los valores de resistencia a la tracción perpendicular (IB) obtenidos variaron desde 0,52 hasta 1,19 N/mm². Según las normas europeas, 0,28, 0,40 y 0,45 N/mm² son los requisitos mínimos de IB para tableros de partículas aptos para usos generales, fabricación de muebles y paneles estructurales, respectivamente (Unión Europea, 2003). Todos los tableros de partículas alcanzaron valores por encima de los requisitos de IB para usos

Clara Eugenia Ferrández García

generales. Ninguna de las variables estudiadas (tamaño de partícula, temperatura de la prensa, y presión) afectó significativamente a los valores de IB de los paneles.

Los valores de fuerza al arranque de tornillo (SH) oscilaron entre 63,00 y 126,75 N/mm. En general, no se encontraron grandes diferencias en los valores de este parámetro debido al tamaño de partícula, temperatura de la prensa, y la presión.

La conductividad térmica es la tasa de tiempo de flujo de calor en régimen estacionario (W) a través de una unidad de superficie de material homogéneo de 1 m de espesor en una dirección perpendicular a los planos isotérmicos, inducidos por una diferencia de temperatura de un grado kelvin (K) a través de la muestra. El valor de conductividad térmica, valor k, es una medida de la eficacia de un material en la transmisión de calor. Por lo tanto, el conocimiento de los valores de conductividad térmica permite realizar comparaciones entre la eficacia de los diferentes materiales de aislamiento térmico (Al-Homoud, 2005). Los valores de conductividad térmica oscilaron desde 0,059 hasta 0,094 W/m K. Estos valores son similares a los de otros paneles aislantes de partículas no madereras. La conductividad térmica depende de la densidad del tablero; los paneles con alta densidad tuvieron también una alta conductividad térmica (Xu et al., 2004; Zhou et al., 2010). En el presente estudio no se observaron diferencias estadísticas en los valores de esta propiedad física, como consecuencia del tamaño de partícula, temperatura de la prensa, y la presión.

Para investigar la relación entre la densidad y la conductividad térmica, se debería hacer tableros de partículas con menores densidades. Los paneles de este estudio podrían ser considerados como paneles aislantes debido a sus bajos valores de conductividad térmica.

Conclusiones

De los resultados obtenidos se pudo concluir que los medios de cultivo con diferentes tamaños de partículas de la caña y el rizoma de *Arundo donax* L. alcanzaron valores adecuados de propiedades físicas tales como densidad aparente, el espacio total de poros, y la contracción. Por lo tanto, estos sustratos no limitan la elongación de las raíces y

Clara Eugenia Ferrández García

tendrán una porosidad adecuada. Sin embargo, los sustratos estudiados no presentaron valores óptimos de las propiedades relacionadas con la relación de aire / agua, tales como la capacidad de aireación, agua fácilmente disponible, capacidad de tamponamiento de agua, y la capacidad total de retención de agua. Además, éstos sustratos tenían bajo contenido de nutrientes, salvo en el caso de K en ambos tipos de sustratos (caña y rizoma de *Arundo donax* L.) y N en los sustratos de rizoma. El tamaño de partícula tuvo un mayor efecto sobre las propiedades físicas que sobre las propiedades químicas de los sustratos estudiados. Además, la investigación experimental indica que el uso de *Arundo donax* L. para fabricar tableros de partículas con baja conductividad térmica es factible. Se pueden conseguir tableros de partículas con óptimas propiedades mecánicas seleccionando el tamaño de partícula y la presión de la prensa.

Clara Eugenia Ferrández García

**EVALUATION OF THE DIFFERENT USES OF *WASHINGTONIA*
ROBUSTA PRUNING WASTE**
**EVALUACIÓN DE DIFERENTES USOS DE LOS RESTOS DE PODA DE
*WASHINGTONIA ROBUSTA***

Los objetivos de este trabajo fueron:

-Caracterizar algunos parámetros agrícolas e industriales de los residuos de poda de *Washingtonia robusta* para evaluar su potencial como sustrato hortícola y como materia prima para la elaboración de tableros de partículas para el sector de la construcción.

Para conseguir los objetivos de este estudio se utilizaron distintos tamaños de partículas del raquis de la palma de washingtonia.

Los métodos analíticos utilizados para caracterizar los medios de cultivo consistieron en: determinar algunas propiedades físicas (densidad aparente (BD), espacio poroso total (TPS) , capacidad de aireación, agua fácilmente disponible (EAW), agua de reserva (WBC), capacidad de retención del agua (TWHC), y contracción de volumen), y parámetros químicos (nitrógeno total (NT), carbono orgánico total (TOC), materia seca, sodio (Na), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), hierro (Fe), cobre (Cu), manganeso (Mn), zinc (Zn), molibdeno (Mo), y boro (B). Los análisis se hicieron por triplicado.

Por otro lado, se hicieron tableros de partículas monocapa, siguiendo el método de García-Ortuño et al (2011). Las partículas se mezclaron con un 10% de Urea-Formaldehído (UF). Se usó como endurecedor nitrato amónico (NH_4NO_3) disuelto en agua al 0,4 %. Las partículas se mezclaron con el adhesivo en una encoladora rotatoria con boquillas pulverizadoras, durante 5 min. Las mantas se formaron manualmente y se prensaron durante 4 min, a dos presiones (15.7, 21.0 kg/cm^2) y a dos temperaturas (120 y 140°C). Se utilizaron 4 tipos de partículas: 0,25 a 1, 1 a 2, y 2 a 4. El experimento se hizo por triplicado. Las propiedades determinadas fueron: Resistencia a flexión (módulo de ruptura (MOR) y módulo de elasticidad (MOE)), resistencia a la tracción perpendicular (cohesión interna IB), fuerza de arranque de tornillo (SH) y la conductividad térmica.

Clara Eugenia Ferrández García

Se realizó el análisis de la varianza (ANOVA) de los valores medios de cada parámetro de cada materia prima (medio de cultivo) y de cada tipo de tablero para probar si había diferencias estadísticamente significativas. La normalidad y homogeneidad de las varianzas se comprobaron usando las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente, antes del ANOVA. Para comparar las diferencias entre los medios de cultivo y los tableros se utilizó el test de Duncan a $P < 0.05$. También se determinó la desviación estándar de los valores medios de cada parámetro de los tableros. Todos los test estadísticos se llevaron a cabo usando el programa informático SPSS versión 18.0 (SPSS Inc., Chicago, Ill)

Características de los Medios de Crecimiento.

Todos los medios elaborados con diferentes tamaños de partículas de restos de poda de *Washingtonia robusta* (WRPW) presentaron valores adecuados de densidad aparente (BD), espacio poroso total (TPS), y la contracción de volumen, dentro de los rangos óptimos. Sin embargo, todos estos medios de cultivo mostraron una alta capacidad de aireación y valores bajos de agua fácilmente disponible (EAW), agua de reserva (WBC), y capacidad de retención de agua (TWHC). Urrestarazu, y col. (2005) informaron en un estudio sobre las propiedades físicas y químicas de los residuos de cáscara de almendra que tanto el agua fácilmente disponible como la capacidad total de retención de agua presentaron valores por debajo del límite establecido para un sustrato ideal (SI), mientras que los porcentajes de capacidad de aireación superaron el límite aceptable para un SI. La elevada aireación encontrada en el presente estudio significa que el agua debe ser aplicada con frecuencia y en pequeñas cantidades, debido a que ésta se puede lixiviar fácilmente (García-Gómez y col. 2002). Con respecto al tamaño de partícula de los residuos de poda de *W. robusta*, este factor influyó significativamente ($P < 0,05$) en todas las propiedades físicas estudiadas. En general, el sustrato con tamaño de partícula 2-4 mm tenían valores más bajos de TPS, capacidad de aireación, EAW, y WBC. Sin embargo, los sustratos con tamaños de partícula 0.25-4 y 0.25-1 mm obtuvieron los mayores valores de la mayoría de las propiedades físicas.

Clara Eugenia Ferrández García

Por otra parte, no se observaron diferencias significativas en general en las propiedades químicas relacionadas con el tamaño de partícula de los residuos de poda de *W. robusta* en los medios estudiados. Según Abad y col. (2002) y Bustamante y col. (2008), todos los sustratos tuvieron valores mayores de la relación C/N que los de las turbas, probablemente debido a su bajo contenido en N. Esta alta relación C/N podría provocar la inmovilización de N soluble cuando los restos de poda de *W. robusta* fueran utilizados como medio de cultivo para la producción de planta en contenedor. Además, el contenido de macro y micronutrientes en estos residuos fueron bajos en comparación con los de turba (Bustamante et al. 2008), excepto en el caso del potasio (K). Abad et al. (2002) también encontraron altos contenidos de K en diferentes muestras de polvo de fibra de coco. Por lo tanto, cuando se utilice residuos de poda de *washingtonia*, los fertilizantes que se deben pueden contener niveles de K menores que los requeridos para otros sustratos hortícolas orgánicos.

Características de los tableros de partículas.

Según las normas europeas los requisitos mínimos de resistencia a flexión (MOR) de los tableros de partículas son 12,5 N/mm² y 13,0 N/mm² son para ser aptos para usos generales (grado P1) y la fabricación de muebles (grado P2), respectivamente (Unión Europea 2003). Los valores de MOR variaron desde 7,31 hasta 19,27 N/mm². Tableros de partículas hechos de partículas más pequeñas (tipos A a D) tenían valores de MOR que eran lo suficientemente altos para alcanzar los requisitos de uso general y de grado interior (incluyendo mobiliario). Los paneles B y C superaron los requisitos para panel estructural (grado P4). Los paneles con tamaños de partícula 1-2 o 2-4 mm (tipos E a L) no cumplieron, en general, los requisitos de MOR. No se observaron diferencias significativas en los valores de MOR con respecto a las condiciones de fabricación de los tableros de partículas (temperatura de la prensa y presión de la prensa), y sólo se encontró una disminución significativa de este parámetro ($P < 0,05$) con el aumento del tamaño de partícula. No hay requisitos mínimos de MOE para uso general y el valor de este parámetro es 1800,00 N/mm² para la fabricación de muebles (Comité Europeo de

Clara Eugenia Ferrández García

Normalización 2003). Los valores de MOE fluctuaron entre 611,1 y 1530,6 N/mm², lo que significa que no alcanzaron los límites mínimos para ser aptos para montajes de interior (incluyendo la fabricación de muebles). El aumento de tamaño de partícula disminuyó significativamente los valores de MOE; este fue el único parámetro significativamente menor en el tablero con tamaño de partículas 1-2 mm, cuando la temperatura fue mayor (140 °C).

Los valores medios de resistencia a la tracción perpendicular (IB) obtenidos oscilaron desde 0,657 hasta 1,280 N/mm². Todos los tableros de partículas tenían valores de IB que alcanzaron los requisitos para usos generales, de interior, y paneles estructurales (grados P1, P2 y P4, respectivamente). El valor más bajo de IB lo presentó el tipo de tablero con un tamaño de partícula más pequeño y condiciones de fabricación de 140 °C de temperatura de prensa y 21,0 kg/cm² de presión. Los valores SH fluctuaron entre 40,83 y 83,53 N/mm. Este parámetro disminuyó significativamente (P <0,05) con el aumento de tamaño de las partículas de los tableros.

Los valores de conductividad térmica variaron de 0,0575 a 0.0839 W/mK. Estos valores fueron similares a los de algunos materiales comercializados, como la vermiculita. No hubo diferencias estadísticas en los resultados obtenidos, posiblemente debido a la relación de este parámetro con el espesor de las partículas.

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede concluir que, en general, los sustratos con diferentes tamaños de partículas de residuos de poda de *Washingtonia robusta* mostraron valores adecuados de propiedades físicas relacionadas con la porosidad del sustrato y de una capacidad de humectación bajo, como se observa en los bajos valores de EAW, WBC, y TWHC. Además, estos sustratos tenía altos valores de relación C / N y bajo contenido de nutrientes, salvo en el caso de K, en comparación con la turba. Estos datos indicaron que la fertilización de los medios de cultivo a partir de residuos de poda de *W. robusta* era necesaria para el crecimiento adecuado de las plántulas.

Por otra parte, la fabricación de tableros de partículas a partir de residuos de poda de

Clara Eugenia Ferrández García

W. robusta mediante el uso de UF fue técnicamente viable. La mitad de los paneles experimentales alcanzaron los requisitos de uso general. Estos tableros de partículas tienen una baja conductividad térmica y pueden ser utilizados como paneles aislantes.

Por lo tanto, todas estas conclusiones muestran que el uso de los residuos de poda de *W. robusta* en la horticultura profesional y en la fabricación de tableros de partículas contribuye a su eliminación de forma ecológica y reduce la necesidad tanto de turba como de madera.

Clara Eugenia Ferrández García

PANELS MADE FROM GIANT REED BONDED WITH NON-MODIFIED STARCHES **PANELES DE CAÑA COMÚN AGLOMERADOS CON ALMIDONES NO MODIFICADOS**

Los objetivos del presente estudio fueron:

- Elaborar paneles utilizando partículas de caña común (*Arundo donax* L.) como sustrato lignocelulósico, de bajo coste y adhesivos basados en almidones no modificados y harinas de cereales.
- Evaluar el comportamiento mecánico de tales paneles siguiendo los procedimientos definidos en la normativa de la Unión Europea.
- Asimismo, se observó el mecanismo de aglomerado por medio de microscopía electrónica de barrido (SEM).

La hipótesis a corroborar es que la capacidad adhesiva de los almidones nativos para aglomerar material lignocelulósico puede verse incrementada si la gelatinización/derretimiento del almidón se produce durante el proceso de prensado en caliente.

Las cañas utilizadas en este estudio se secaron durante 12 meses al aire libre hasta un contenido en humedad del 8 %. Se cortaron en trozos y se trituraron. A continuación se tamizaron y clasificaron las partículas por tamaños. Las partículas utilizadas fueron las que pasaron por el tamiz de 0,25 mm. Las partículas no se sometieron ningún tratamiento previo.

Como adhesivos se utilizaron diferentes harinas de cereales comerciales (harina de arroz, salvado de harina de centeno y harina de trigo) y almidones no modificados de calidad comercial (maíz y patata). La cantidad de aglomerante empleada fue de 5 y 10% en peso respecto al peso de las partículas. No se usó ningún otro aditivo o producto químico.

Se elaboraron 17 tipos de paneles. El material previamente pesado se colocó en una encoladora de eje horizontal (LGB Modelo 100; IMAL Srl, Modena, Italia). El adhesivo se mezcló con 20% de agua (basado en el peso de las partículas) a 20 ° C y luego se añadieron a la encoladora. Las partículas y el adhesivo se mezclaron durante 5 min a temperatura ambiente para obtener una mezcla homogénea. No se añadieron ceras ni sustancias hidrófobas a la mezcla. La configuración de la manta fue de una sola capa. Los paneles se

Clara Eugenia Ferrández García

formaron manualmente en un molde de medidas de 600 mm x 400 mm. Posteriormente se introdujo cada molde a la prensa de platos calientes y se prensaron a 2,6 N/mm², a una temperatura de 110 ° C, durante 15 min. Después del prensado, los tableros se mantuvieron en el molde mientras se enfriaban, durante 1 hora en condiciones ambientales. Después, se añadieron 12g /1000 cm² agua destilada con una brocha en la superficie superior de los tableros y fueron prensados en caliente por una segunda vez en las mismas condiciones de presión, temperatura y tiempo. Algunos paneles, los que tienen un nivel de 10% de adhesivo, se sometieron a un tercer ciclo de prensado. Dos tableros de partículas sin aglomerante se fabricaron siguiendo el mismo procedimiento como control. Se realizaron dos paneles de cada tipo. Posteriormente, los tableros de partículas se acondicionaron a una temperatura de 20 ° C y 65% de humedad relativa durante cuatro días, y se cortaron las probetas para la evaluación de sus propiedades de acuerdo con la norma EN 326-1 (1999). Se determinaron algunas propiedades físicas y mecánicas de acuerdo a las normas europeas correspondientes. La morfología de la superficie de la caña común y la unión interfacial de los paneles experimentales se observaron por microscopía SEM.

Los datos de cada ensayo se analizaron estadísticamente. Se realizó el análisis de la varianza (ANOVA) y t-test para probar ($\alpha = 0,05$) una diferencia significativa entre los factores y niveles. Cuando el ANOVA indicó una diferencia significativa entre éstos, se realizó una comparación de las medias empleando la prueba HSD de Tukey y la prueba de Duncan para determinar qué grupos fueron significativamente diferentes de los otros a un nivel de confianza del 95%.

Los paneles obtenidos tras un solo ciclo de prensado no se unieron suficientemente y sus bordes se rompieron parcialmente durante el desmoldeo. Estos paneles no se evaluaron. Es obvio que la temperatura de la prensa caliente y el contenido de agua de la manta no fueron suficientes para romper los gránulos de almidón durante el primer prensado en caliente, obteniéndose paneles con calidades muy pobres. Los tableros analizados fueron los que se fabricaron con dos y tres ciclos de prensado. En éstos, se

Clara Eugenia Ferrández García

aplicó agua sobre la superficie antes del prensado en caliente. De acuerdo con Kelly (1977), la humedad en la superficie de la manta se evapora cuando la prensa se cierra y el vapor resultante fluye a una región más fría (hacia el centro de la manta), donde se condensa. Aparentemente, cuando el agua caliente condensada contacta con los gránulos de almidón, que están sometidos a presión, se produce la gelatinización y, de esa forma, la capacidad de adhesiva se incrementa.

Propiedades físicas.

La densidad media de los tableros elaborados varió desde 865 hasta 930 kg/m³ y el espesor fue de 13,90 a 14,02 mm.

Hinchamiento en espesor.

Los tableros de partículas deben tener un valor máximo de hinchamiento en espesor de 15% tras 24 h de inmersión en agua para ser clasificados como tableros estructurales (grado P4; EN 312, 2003). Los valores medios de hinchamiento en espesor (TS) de las muestras tras 2 h de inmersión en agua variaron desde 18,28 hasta 61,49%. Los valores medios de TS tras 24 h de inmersión los resultados se encuentran entre 18,45 y 80,01%. No hay requisitos de TS en las normas para usos generales y fabricación de muebles en ambiente seco (grado P1 y P2, respectivamente). Ninguno de los paneles alcanzó el valor máximo de TS para ser clasificado panel estructural (grado P4). En general, los valores de TS se vieron incrementados con el aumento del contenido de adhesivo y el tiempo de prensado. Esto es debido a la gran afinidad que los almidones tienen para el agua. Los tableros de partículas sin aglomerante (tableros control) tuvieron los valores más altos de TS. Estos tableros de partículas se fabricaron sin adhesivos y la presión y la temperatura aplicada durante la compresión de las mantas no fueron lo suficientemente alta para producir la auto-uniión de las partículas lignocelulósicas. Los tableros de partículas sin aglomerante que aparecen en la literatura se produjeron con inyección de vapor durante el prensado en caliente a temperaturas de prensado por encima de 175 ° C y una presión de alrededor de 10 MPa (Panyakaew y Fotios., 2011; Umemura et al., 2009; Okuda et al., 2006; Velásquez et al., 2002; Angles et al., 1999; Suchsland et al., 1987). Los paneles

Clara Eugenia Ferrández García

aglomerados con harina integral de centeno tuvieron los valores de TS más bajos. Esto puede ser debido a la presencia lípidos en la harina integral. Copeland et al. (2009) comunicaron que los complejos entre la amilasa y los lípidos reducen la solubilidad del almidón en agua, descendiendo su capacidad de absorber agua e incrementando la temperatura a la que ocurre la gelatinización.

Propiedades Mecánicas.

Según la norma EN 312 (1993), los requisitos mínimos para clasificar los tableros como apto para usos generales en ambiente seco (grado P1) son un valor de resistencia a la flexión (MOR) de 11,5 N/mm², y un valor de 0,24 N/mm² de resistencia a tracción perpendicular (IB). Los requisitos mínimos para clasificar los tableros como aptos para uso en montajes de interior (incluida la fabricación de mobiliario) (grado P2) son un valor de MOR de 13 N/mm², un valor de MOE de 1600 N/mm² y un valor de 0,35 N/mm² de IB. Para paneles estructurales (grado P4), los valores de MOR, MOE, e IB son de 15 N/mm², 2300 N/mm², y 0,35 N/mm², respectivamente. Los valores medios de MOR variaron desde 3,20 hasta 16,67 N/mm².

. Los paneles tipo A3 y E3 (hechos con un 10% de almidón de maíz y harina de trigo, respectivamente, y tres ciclos de prensado) obtuvieron unos valores de MOR suficientemente altos para cumplir los requisitos para usos generales. Los paneles tipo D2 (hechos con un 10% de fécula de patata) excedieron el mínimo MOR necesario para montajes interiores (incluida la fabricación de mobiliario). Los paneles tipo D3 alcanzaron los valores de MOR para su uso como paneles estructurales. El valor de MOR se vio incrementado significativamente cuando la cantidad de adhesivo usado se incrementó del 5 al 10%, en todos los casos, independientemente del tipo de adhesivo. El tercer ciclo de prensado afectó a la resistencia a la flexión (MOR), mejorando en el caso del almidón de maíz, la fécula de patata y la harina de trigo. Los mejores resultados se obtuvieron con la fécula de patata, seguida de la harina de trigo y el almidón de maíz.

Los valores de MOE oscilaron entre 569,09 y 2.520,97 N/mm². No hay requerimiento mínimo de MOE para usos generales. Los tableros tipo A2, A3, C3, D1, D2,

Clara Eugenia Ferrández García

D3, E1, E2, y E3 alcanzaron los valores mínimos de MOE requeridos para su uso interior (grado P2). Los paneles D3 excedieron el nivel mínimo establecido para ser clasificados paneles estructurales (grado P4). En general, el valor de MOE aumentó significativamente cuando el nivel de adhesivo aumentó del 5 al 10%, independientemente del tipo de adhesivo usado. El tercer ciclo de presión influyó de manera distinta en los valores de MOE: mejorando los paneles hechos con harina integral de centeno, fécula de patata, y harina de trigo, y decreciendo su valor en el resto de casos.

Los valores de IB fluctuaron entre 0,04 y 0,40 N/mm². Los paneles tipo A2, A3, C2, C3, D1, D2, D3, y E3 cumplieron con el valor mínimo de IB para ser clasificados como P1 (usos generales en ambiente seco). Los paneles tipo C3 y D3 cumplieron el requerimiento de los grados P2 y P4 (montaje de interior y panel estructural, respectivamente) Los paneles C3 fueron los más resistentes a tracción perpendicular. En general los valores de IB se vieron influenciados por el nivel de adhesivo usado, mejorando con el incremento del 5 al 10%. El tercer ciclo de prensado tuvo un efecto acentuado en esta propiedad, incrementándose para todos los adhesivos.

Teniendo en cuenta las tres propiedades mecánicas estudiadas juntas, se puede decir que los tableros A3 y E3 (hechos con un 10% de almidón de maíz y harina de trigo, respectivamente, y tres ciclos de prensado) obtuvieron unos valores de MOE, MOR, e IB suficientemente altos para cumplir los requisitos para usos generales. Los paneles tipo D2 (elaborados con un 10% de fécula de patata) superaron los requisitos de MOR y MOE para montaje interior (incluyendo la fabricación de muebles) pero no lograron alcanzar el requisito de IB. Los paneles tipo D3 cumplieron con los requisitos de paneles estructurales (MOR, MOE, e IB).

De aquí se desprende que la fécula de patata y la harina de trigo son los mejores adhesivos para la producción de tableros de partículas en estas condiciones. La fécula de patata es rica en fósforo esterificado y presenta mayor poder de hinchamiento y solubilidad que los almidones de cereales. Por otro lado, la harina de trigo tiene, además de almidón, proteínas, incluyendo gluten, que ha sido utilizado como adhesivo para la fabricación de tableros de partículas (El Wakil et al. 2007). La presencia de lípidos en la harina integral de

Clara Eugenia Ferrández García

centeno redujo la solubilidad del almidón, obteniéndose paneles con peores propiedades mecánicas. Los paneles B1, B2, B3, Reed 1 y Reed 2 presentaron los valores de MOR, MOE e IB más bajos (harina de arroz, y sin adhesivo). Estos paneles tuvieron las menores densidades, sugiriendo que la densidad juega un papel importante en la resistencia a la flexión, tal y como era de esperar. Es posible que la harina de arroz necesite unas mayores temperaturas o presiones para poder completar la gelatinización/derretimiento de su almidón.

Para llevar a cabo una mejora en las propiedades generales de éstos tableros se pueden añadir sustancias como NaOH y taninos a los adhesivos. Tondi et al. (2012) demostraron que añadiendo estas sustancias al almidón se vieron incrementadas las propiedades mecánicas de tableros de partículas experimentales.

Microscopía electrónica de barrido (SEM).

Para elucidar el mecanismo de adhesión se observaron al microscopio electrónico muestras de tableros fracturados. Se elaboró un tablero colocando los componentes separados físicamente en el molde antes de la presión en caliente.: la fécula de patata en un lado y las partículas de caña en el otro lado, para poder observar cómo se vería al microscopio el almidón gelatinizado, sin interferencia de las partículas.

Las Figuras 5A y 5B muestran la superficie fracturada de paneles unidos con almidón de patata en un 5% y dos ciclos de prensado y en un 10% y tres ciclos de prensado, paneles D1 y D3, respectivamente.

En la micrografía A, los gránulos de almidón de patata nativo son evidentes; algunos gránulos se ven de mayor tamaño que otros. Algunos gránulos aparecen dañados. Esto es debido al proceso de prensado en caliente. También se observan huecos, que insinúan que la consolidación de la manta no se ha conseguido en su totalidad. Esto está en acuerdo con los resultados de las propiedades mecánicas.

En la micrografía B, los gránulos ya no son visibles y hay áreas donde el almidón ha gelatinizado, apareciendo como una matriz polimérica. Este tablero (D3) presentó mejores propiedades mecánicas que el panel D1. Esto sugiere que la capacidad adhesiva de la

Clara Eugenia Ferrández García

fécula de patata se ve mejorada cuando la gelatinización se produce estando en contacto con las partículas durante la consolidación del tablero en la prensa de platos calientes, después de tres ciclos de prensado.

En la figura 6 se presenta la micrografía del panel hecho con los componentes separados. Se puede ver la fécula de patata gelatinizada como una matriz polimérica, a un lado, y las partículas de caña prensadas al otro lado. Se observa que el almidón gelatinizado parece plástico.

Conclusiones

1. Se fabricaron tableros de partículas de caña común utilizando diferentes harinas de cereales y almidones como aglomerantes sin la adición de productos químicos, mediante prensado en caliente a baja temperatura (110 ° C) y presión (2,6 N/mm²).
2. El mejor rendimiento en términos de propiedades mecánicas se obtuvo usando fécula de patata. Los tableros fabricados con un 10% de fécula de patata y tres ciclos de prensado, superaron los valores mínimos requeridos de MOR, MOE, e IB para su uso como paneles estructurales (grado P4), pero no logró cumplir el requisito de hinchamiento en espesor tras 24 h de inmersión en agua. La resistencia al agua de todos los paneles necesita ser mejorada.
3. Dado que las partículas no se trataron previamente, los almidones usados no eran almidones modificados y las condiciones de prensado fueron muy bajas: este método puede ser considerado un procedimiento de bajo coste para la fabricación de tableros de partículas respetuoso con el medio ambiente.

5.- BIBLIOGRAFÍA

Clara Eugenia Ferrández García

5. BIBLIOGRAFÍA.

- Abad, M., P. F. Martínez, M. D. Martínez, and J. Martínez. 1992. Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. *Actas de Horticultura* 11:141–154.
- Abad, M., P. Noguera, and S. Bures. 2001. National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant production: Case study in Spain. *Bioresource Technology* 77:197–200.
- Abad, M., P. Noguera, R. Puchades, A. Maquieira, and V. Noguera. 2002. Physico-chemical and chemical properties of some coconut coir dusts for use as a peat substitute for containerized ornamental plants. *Bioresource Technology* 82:241–245.
- Abdul Khalil, H. P. S., A. M. Issam, M. T. Ahmad Shakri, R. Suriani, and A. Y. Awang. 2007. Conventional agro-composites from chemically modified fibers. *Industrial Crops and Products* 26:315–323.
- Abrantes, S., E. Maria, and A. P. Costa. 2007. Evaluation of giant reed as a raw-material for paper production. *Appita Journal* 60:410–415.
- Al-Homoud, M. S. 2005. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and Environment* 40:353–366.
- Alma, M. H., H. Kalaycıođlub, I. Bektas, and A. Tutus. 2005. Properties of cotton carpel-based particleboards. *Industrial Crops and Products* 22:141–149.
- Angelini, L. G., L. Ceccarini, and E. Bonari. 2005. Biomass yield and energy balance of giant reed (*Arundo donax* L.) cropped in central Italy as related to different management practices. *European Journal of Agronomy* 22:375–389.
- Anglès, M. N., Reguant, J., Montané, D., Ferrando, F., Farriol, X., and Salvadó, J. 1999. Binderless composites from pretreated residual softwood, *J. Appl. Polym. Sci.* 73: 2485-2491.

Clara Eugenia Ferrández García

- Anonymous. 1996. Particleboard – From Start to Finish, National Particleboard Association. Gaithersburg, Maryland, USA
- Ashori, A., and A. Nourbakhsh. 2008. Effect of press cycle time and resin content on physical and mechanical properties of particleboard panels made from the underutilized low-quality raw materials. *Industrial Crops and Products* 28:225–230.
- Batalla, L., Nuñez, A. J., and Marcovich, N. E. 2005. Particleboards from peanut-shell flour, *J. Appl. Polym. Sci.* 97: 916-923.
- Bell, G. P. 1997. Ecology and management of *Arundo donax*, and approaches to riparian habitat restoration in Southern California, In: Brock, J. H., Wade, M., Pysek P., and Green D. (eds.), *Plant Invasions: Studies from North America and Europe*, Blackhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, 103-113.
- Boose, A. B., and J. S. Holt. 1999. Environmental effects on asexual reproduction in *Arundo donax*. *Weed Research* 39:117–127.
- Burrell, M. M. 2003. Starch: The need for improved quality or quantity - an overview, *J. Experimental Botany* 54(382):451-456
- Bustamante, M. A., C. Paredes, R. Moral, E. Agulló, M. D. Pérez-Murcia, and M. Abad. 2008. Composts from distillery wastes as peat substitutes for transplant production. *Resources Conservation and Recycling* 52:792–799.
- Ciannamea, E. M., Stefani, P. M., and Ruseckaite, R. A. 2010. Medium-density particleboards from modified rice husks and soybean protein concentrate-based adhesives, *Bioresour. Technol.* 101, 818-825.
- Çolak, S., G. Çolakoğlu, I. Aydın, and H. Kalaycıoğlu. 2007. Effects of steaming process on some properties of eucalyptus particleboard bonded with UF and MUF adhesives. *Building and Environment* 42:304–309.
- Copeland, L., Blazek, J., Salman, H., and Tang, M. C. 2009. Form and functionality of starch. *Food Hydrocolloids* 23: 1527-1534.

Clara Eugenia Ferrández García

- Çöpur, Y., Guler, C., Taşçıoğlu, C., and Tozluoğlu, A. 2008. Incorporation of hazelnut shell and husk in MDF production. *Bioresour. Technol.* 99: 7402-7406.
- De Boodt, H. 1975. Caractères physiques et disponibilité en eau des substrats. *Annales de Gembloux* 81:59–72.
- Dielen, L., Guegan, S., Lacour, P.A., Mäki, P., Stolp, J., Rytönen, A. 2000. “EU Energy Policy Impacts On the Forest-Based Industry. Part I. Modelling analysis of the influence of the White Paper on renewable energy sources on the wood supply to the European forest based industry.
- Downer, A. J., D. R. Hodel, and M. J. Mochizuki. 2009. Pruning landscape palms. *HortTechnology* 19:695–699.
- El-Wakil, N. A., Abou-Zeid, R. E., Fahmy, Y., and Mohamed, A. Y. 2007. Modified wheat gluten as a binder in particleboard made from reed. *J. Appl. Polym. Sci.* 106(6): 3592-3599.
- European Union. 1993a. Particleboards and fibreboards. Determination of swelling in thickness after immersion in water (EN 317). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- European Union. 1993b. Wood-based panels. Determination of moisture content (EN 322). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- European Union. 1993c. Fibreboards: Determination of resistance to axial withdrawal of screws (EN 320). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- European Union. 1993d. Particleboards and fiberboards: Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board (EN 319). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- European Union. 1993e. Wood-based panels: Determination of density (EN 323). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- European Union. 1993f. Wood-based panels: Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength (EN 310). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.

Clara Eugenia Ferrández García

- European Union. 1994. Wood-based panels: Sampling and cutting of test pieces and expression of test results (EN 326–1). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- European Union. 2001. Thermal performance of building materials and products: Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods: Products of high and medium thermal resistance (EN 12667). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- European Union. 2003. Particleboards: Specifications (EN 312). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- European Union. 2004. Wood-based panels for use in construction: Characteristics, evaluation of conformity and marking (EN 13986). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- F.A.O. 2001. Situación actual de los bosques del mundo. Reporte década 1990-2000.
- Felger, R. S., M. B. Johnson, and M. F. Wilson. 2001. Trees of Sonora, Mexico. New York: Oxford University Press.
- Frandsen, P., and Jackson, N. 1994. The impact of *Arundo donax* on flood control and endangered species. In: Jackson, N. E., Frandsen, P., and Duthoit, S. (Compilers), *Arundo donax* Workshop Proceedings, 19 November 1993, Ontario, California, USA. Team Arundo and California Exotic Pest Plant Council, Pismo Beach, CA, pp. 13-16.
- García-Gomez, A., M. P. Bernal, and A. Roig. 2002. Growth of ornamental plants in two composts prepared from agroindustrial wastes. *Bioresource Technology* 83:81–87.
- García-Ortuño, T., J. Andréu-Rodríguez, M. T. Ferrández-García, M. Ferrández-Villena, and C. E. Ferrández-García. 2011. Evaluation of the physical and mechanical properties of particleboard made from giant reed (*Arundo donax* L.). *BioResources* 6(1):477–486.
- Graziani, A., and Steinmaus, S. J. 2009. Hydrothermal and thermal time models for the invasive grass, *Arundo donax*. *Aquatic Botany* 90: 78-84.

Clara Eugenia Ferrández García

- Grigoriou, A., Passialis, C., and Voulgaridis, E. 2000. Experimental particleboards from kenaf plantations grown in Greece. *Holz als Roh – und Werkstoff* 58: 309-314.
- Guler, C., and Ozen, R. (2004). “Some properties of particleboards made from cotton stalks (*Gossypium hirsutum* L.),” *Holz als Roh- und Werkstoff* 62, 40-43.
- Guntekin, E., and Karakus, B. 2008. Feasibility of using eggplant (*Solanum melongena*) stalks in the production of experimental particleboard. *Ind. Crops Prod.* 27(3): 354-358.
- Gürü, M., Tekeli, S., and Bilici, I. 2006. Manufacturing of urea-formaldehyde-based composite particleboard from almond shell. *Mater. Des.* 27: 1148-1151.
- Han, G., Zhang, C., Zang, D., Umemura, K., and Hawaii, S. 1998. Upgrading of urea formaldehyde-bonded reed and wheat straw particleboards using silane coupling agents. *J. Wood Sci.* 44: 282-286.
- He, Z., Zang, Y., and Wei, W. (2012). “Formaldehyde and VOC emissions at different manufacturing stages of wood-based panels,” *Building and Environment* 47: 197-204.
- Hernández-Apaolaza, L., A. M. Gascó, J.M. Gascó, and F. Guerrero. 2005. Reuse of waste materials as growing media for ornamental plants. *Bioresource Technology* 96:125–131.
- Herrera, A. M., and Dudley, T. L. 2003. Reduction of riparian arthropod abundance and diversity as a consequence of giant reed (*Arundo donax*) invasion. *Biological Invasions* 5, 167-177.
- Imam, S. H., Gordon, S. H., Mao, L., and Chen, L. 2001. Environmentally friendly wood adhesive from a renewable plant polymer: Characteristics and optimization. *Polym. Degrad. Stab.* 73(3), 529-533.
- Ingelmo, F., R. Canet, M. A. Ibañez, F. Pomares, and J. García. 1998. Use of MSW compost, dried sewage sludge, and other wastes as partial substitutes for peat and soil. *Bioresource Technology* 63:123–129.

Clara Eugenia Ferrández García

- Kalaycioglu, H., and G. Nemli. 2006. Producing composite particleboard from kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) stalks. *Industrial Crops and Products* 24:177–180.
- Kaseem, M., Hamad, K., and Deri, F. 2012. Thermoplastic starch blends: A review of recent works. *Polym. Sci.* 54(2): 165-176.
- Kelly, M. W. 1977. Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboard (General Technical Report FPL-10). Madison, Wisc.: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Kennedy, H. M. 1989. “Starch- and dextrin-based adhesives,” *Adhesives from Renewable Resources. ACS Symposium Series*, (385): 326-336.
- Khristova, P., Yossifov, N., Gabir, S., Glavche, I., and Osman, Z. 1998. Particleboards from sun flower stalks and tannin-modified UF resin. *Cellul. Chem. Technol.* 32: 327-337.
- Lee, S., Shupe, T. F., and Hse, C. Y. 2006. Mechanical and physical properties of agro-based fibreboard. *Holz als Roh – und Werkstoff* 64: 74-79.
- Leiva, P., E. Ciannamea, R. A. Ruseckaite, and P. M. Stefani. 2007. Medium-density particleboards from rice husks and soybean protein concentrate. *Journal of Applied Polymer Science* 106:1301–1306.
- Lewandowski, I.; J. M. O. Scurlockb, E. Lindvallc, and M. Christoud. 2003. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass and Bioenergy* 25:335–361.
- Mariani, C., R. Cabrini, A. Danin, P. Piffanelli, A. Fricano, S. Gomasasca, M. Dicandilo, F. Grassi, and C. Soave. 2010. Origin, diffusion, and reproduction of the giant reed (*Arundo donax* L.): A promising weedy energy crop. *Annals of Applied Biology* 157:191–202.
- Medina, E., C. Paredes, M. D. Pérez-Murcia, M. A. Bustamante, and R. Moral. 2009. Spent mushroom substrates as component of growing media for germination and growth of horticultural plants. *Bioresource Technology* 100:4227–4232.

Clara Eugenia Ferrández García

- Mo, X., Cheng, E., Wang, D., and Sun, X. S. 2003. Physical properties of medium density wheat straw particleboard using different adhesives. *Ind. Crops Prod.* 18: 47-53.
- Moran, P. J., and Goolsby, J. A. 2009. Biology of the galling wasp *Tetramesa romana*, a biological control agent of giant reed. *Biological Control* 49 (2): 169-179.
- Moubarik, A., Allal, A., Pizzi, A., Charrier, F., and Charrier, B. 2010. Preparation and mechanical characterization of particleboard made from maritime pine and glued with bio-adhesives based on cornstarch and tannins. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 12(3):189-197
- Navarro, A. F., J. Cegarra, A. Roig, and M. P. Bernal. 1991. An automatic microanalysis method for the determination of organic carbon in wastes. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 22:2137–2144.
- Ndazi, B., J. V. Tesha, and E. T. N. Bisanda. 2006. Some opportunities and challenges of producing bio-composites from non-wood residues. *Journal of Materials Science* 41:6984–6990.
- Nemli, G. 2003. Effects of some manufacturing factors on the properties of particleboard manufactured from alder (*Alnus glutinosa* subsp. *Barbata*). *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 27:99–104.
- Nemli, G., H. Kalaycioglu, and T. Alp. 2001. Suitability of date palm branches for particleboard production. *Holz als Roh und Werkstoff* 59:411–412.
- Ntalos, G. A., and A. H. Grigoriou. 2002. Characterization and utilization of vine pruning as a wood substitute for particleboard production. *Industrial Crops and Products* 16:59–68.
- Okuda, N., Hori, K., and Sato, M. 2006. Chemical changes of kenaf core binderless boards during hot pressing (II): effects on the binderless board properties,” *J. Wood Sci.* DOI 10.1007/s10086-005-0744-5.
- Pan, Z., A. Cathcart, and D. Wang. 2006. Properties of particleboard bond with rice bran and polymeric methylene diphenyl diisocyanate adhesives. *Industrial Crops and Products* 23:40–45.

Clara Eugenia Ferrández García

- Panyakaew, S., and S. Fotios. 2011. New thermal insulation boards made from coconut husk and bagasse. *Energy and Buildings* 43:1732–1739.
- Papadopoulos, A. N., and Hague, J. R. B., 2003. The potential use of *Linum usitatissimum* (flax) chips as a raw lignocellulosic material for particleboards. *Ind. Crops Prod.* 17 (2): 143-147.
- Papadopoulos, A. N., Hill, C. A. S., Gkaraveli, A., Ntalos, G. A., and Karastergiou, S. P. 2004. “Bamboo chips (*Bambusa vulgaris*) as an alternative lignocellulosic raw material for particleboard manufacture,” *Holz als Roh – und Werkstoff* 62: 36-39.
- Perdue, R. E. 1958. *Arundo donax*: Source of musical reeds and industrial cellulose. *Economic Botany* 12:368–404.
- Roberts, N. C. 1989. *Baja California plant field guide*. La Jolla, Calif.: Natural History Publishing.
- Sain, M., and S. Panthapulakkal. 2006. Bioprocess preparation of wheat straw fibers and their characterization. *Industrial Crops and Products* 23:1–8.
- Sellers, T. 2000. Growing markets for engineered products spurs research. *Wood Technology*.127:40–43.
- Shatalov, A. A., and Pereira, H. 2006. Kinetics of organosolv delignification of fibre crop *Arundo donax* L. *Ind. Crops Prod.* 23: 212-222.
- Simon, M. D., M. Nieves-Cordones, and M. Nieves. 2010. Differences in growth and ornamental parameters between young *Chamaerops humilis* L. and *Washingtonia robusta* H. Wendl palm trees in response to salinity. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 85:7–11.
- Singh, A. V., Nath, L. K., and Singh, A. 2010. Pharmaceutical, food and non-food applications of modified starches: A critical review. *EJEAFCh* 9 (7): 1214-1221.
- Stofko, J. 1982. “Steam bonding of solid lignocellulosic material,” U.S. Patent 4,357,194.
- Sudin, R., and N. Swamy. 2006. Bamboo and wood fiber cement composites for sustainable infrastructure regeneration. *Material Science* 41:6917–6924.

Clara Eugenia Ferrández García

- Suschland O., Woodson, G. E., and McMillin, C. W. 1987. Effect of cooking condition on fiber bonding in dry formed binderless hardboard. *Forest Product J.* 37: 65-69.
- Tester, R. F., and Karkalas, J. 2002. Polysaccharides. II. Polysaccharides from eukaryotes. In: Vandamme, E. J., De Baets, S., and Steinbuchel, A. (eds.), *Starch in Biopolymers*, Wiley-VCH, Weinheim, Vol. 6: 381-438.
- Thornby, D., D. Spencer, and J. Hanan. 2007. L-DONAX, a growth model of the invasive weed species, *Arundo donax* L. *Aquatic Botany* 87:275–284.
- Tondi, G., Wieland, S., Wimmer, T. Schnabel, T., and Petutschnigg, A. 2012. Starch-sugar synergy in wood adhesion science: basic studies and particleboard production. *Eur. J. Wood Prod* 70, 271-278.
- Tracy, J. L., and DeLoach, C. J. 1999. Suitability of classical biological control for giant reed (*Arundo donax*) in the United States,” In: Bell C., (ed.), *Arundo and Saltcedar Management Workshop Proceedings*, 17 June, 1998, Ontario, California. University of California Cooperative Extension, Holtville, California.
- Treusch, O., and Petutschnigg, A. 2012. A combination of polyethylene and phenolic resin as an adhesive for wood-based panels. *BioResources* 7(1): 789-798.
- Tucker, G. C. 1990. The genera of Arundinoideae (Graminae) in the southeastern United States. *Journal of the Arnold Arboretum* 71:145–177.
- Umemura, K., Kaiho, K., and Kawai, S. 2009. Characterization of bagasse-rind particleboard bonded with chitosan. *J. Appl. Polym. Sci.* 113(4): 2103-2108.
- Urrestarazu, M., G. A. Martínez, and M. C. Salas. 2005. Almond shell waste: Possible local rockwool substitute in soilless crop culture. *Scientia Horticulturae* 103:453–460.
- Velásquez, J. A., Ferrando, F., and Salvadó, J. 2002. “Binderless from steam exploded *Miscanthus sinensis*: The effect of a grinding process,” *Holz Roh Werks.* 60: 297-302.
- Wang, Z., Gu, Z., Hong, Y., Cheng, L., and Li, Z. 2011. “Bonding strength and water resistance of starch-based wood adhesive improved by silica nanoparticles,” *Carbohydr. Polym* 86(1): 72-76.

Clara Eugenia Ferrández García

- Widyorini, R., J. Xu, K. Umemura, and S. Kawai. 2005. Manufacture and properties of binderless particleboard from bagasse, I: Effects of raw material type, storage methods, and manufacturing process. *Journal of Wood Science* 51:648–654.
- Xu, J., R. Sugawara, R. Widyorini, G. Han, and S. Kawai. 2004. Manufacture and properties of low-density binderless particleboard from kenaf core. *Journal of Wood Science* 50:62–67.
- Zhou, X., F. Zheng, H. Li, and C. Lu. 2010. An environmentally friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. *Energy and Buildings* 42:1070–1074.