



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-535

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Caracterización físico-mecánica de la madera de *Paulownia elongata* S.Y. Hu de una plantación del Valle del Duero (Valladolid).

CASADO SANZ, M.¹, ACUÑA RELLO, L.¹, CACERES HIDALGO, E.¹ y POZO VELASCO, A.²

¹ Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia. Universidad de Valladolid.

² Instituto Trinidad Arroyo de Palencia. Bachillerato de Investigación/Excelencia

Resumen

El género *Paulownia* tiene gran interés industrial y comercial en el ámbito agroforestal debido a su rápido crecimiento y fácil adaptación a un gran número de condiciones edafoclimáticas. Los destinos más importantes de la madera de este género son para la producción de biomasa, pasta de papel y chapas.

Se presentan los resultados de la determinación de las propiedades físico- mecánicas de la madera de *Paulownia elongata* de una plantación de Castrillo de Duero (Valladolid, España). Los valores medios obtenidos indican que se trata de una madera muy ligera, con una densidad de 0,209 g/cm³ y con bajas contracciones lineales: 0,43 % en dirección longitudinal, 3,81 % en radial y 7,33% en tangencial, por lo que se considera una madera muy estable frente a los cambios de humedad. Las propiedades elasto-mecánicas determinadas según la norma EN-408 dan un valor medio del módulo de elasticidad (MOE) de 3100,1 N/mm² y un módulo de rotura (MOR) de 28,5 N/mm², valores que indican que se trata de una madera de muy baja calidad estructural. Respecto a las propiedades acústicas, tiene una buena calidad sonora global, por la amplitud de su nota fundamental y por el número de armónicos que presenta, lo cual la convierte en una especie muy apta para la construcción de instrumentos musicales.

Palabras clave

Paulownia, elasticidad, densidad, contracciones, calidad sonora.

1. Introducción

El género *Paulownia* está compuesto por 17 especies pertenecientes a la familia *Paulowniaceae*, y presenta una amplia distribución alrededor del mundo. Los países con las principales extensiones de plantaciones de *Paulownia* son Corea y Japón, aunque son otros muchos los países por los que se extienden estas plantaciones como; Australia, Indonesia, España, Estados Unidos, La India, Italia, Turquía, Canadá, Israel, México, Brasil y Guyana en América. Los árboles de dicho género tienen un gran porte, entre 20 y 30 metros, troncos entre 1 y 2,25 metros de diámetro, fuste recto, cilíndrico y sin apenas nudos (Rojas 2008). Tiene un gran valor industrial y comercial debido a su vertiginoso crecimiento. Soporta temperaturas entre -17°C y 45°C, crecen prácticamente en todo tipo de suelos, incluyendo los pobres y degradados con buena profundidad y buen drenaje, exceptuando los suelos con más del 30% de componente arcillosos y demasiado rocosos. Al tener las raíces verticales de gran longitud, es un buen amortiguador de crecientes, recuperador de tierras, controlador de la erosión y estabilizador de suelos agroforestales. Cabe destacar que el género ha demostrado excelentes resultados en varios usos como son la fabricación de chapa, pasta de papel y producción de biomasa.

48 Existen numerosos artículos sobre el género *Paulownia*, pero muy pocos se centran en la
 49 caracterización físico-mecánica de su madera. La gran mayoría analizan su capacidad de producción
 50 para biomasa (Madejón et al., 2016; Yorgun & Yildiz, 2015; Fernández-Puratich et al., 2014; Ayrilmis &
 51 Kaymakci., 2013; López et al., 2012; Lucas et al., 2010; Marcos et al., 2009; Kasamaki, 2009;
 52 Latorre y Ruano, 2009), otros estudian la restauración de suelos contaminados (Doumett et al., 2008;
 53 Madejón et al., 2014), la obtención de celulosa (López et al., 2012; Caparrós et al., 2008; Jiménez y
 54 Rodríguez, 2003), y el uso como material aislante en paneles sandwich (Sobhani et al., 2011). Los
 55 artículos más relevantes sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Paulownia* son:
 56 Akyildiz and Kol (2010) estudian la especie *Paulownia tomentosa* cultivada en Turquía, Kiaei (2012)
 57 analizó *Paulownia fortunei* de Irán, Kaymakci et al. (2013) la *Paulownia elongata* en Turquía, Zhao-hua
 58 et al. (1986) abordó todo lo referido al cultivo y al uso de la *Paulownia* en China. En la tabla 1 se puede
 59 ver los resultados de las propiedades elastomecánicas de la madera de *P. elongata* de algunos de
 60 dichos estudios.

61 **Tabla 1.** Propiedades elastomecánicas de *Paulownia elongata* en distintas localidades de estudios anteriores

Localidad (País)	Densidad 12 (g/cm ³)	Resistencia a la flexión (MOR) (N/mm ²)	Módulo de elasticidad (MOE) (N/mm ²)	Autor
Izmir (Turquía)	0,281	35,79	3883,14	Kaymakci et al., (2013)
Mersin (Turquía)	0,266	35,76	3523,42	Kaymakci et al., (2013)
Henan (China)	0,264	28,9	4200	Zhao-Hua et al., (1986)
Lankau (China)	0,283	35,6	4400	Zhao-Hua et al., (1986)

62

63 2. Objetivos

64

65 El objetivo principal es la caracterización físico-mecánica de la madera de *Paulownia elongata*
 66 de una plantación de 7 años de edad del Valle del Duero (España). Como objetivo secundario se
 67 analiza de forma práctica la calidad sonora global, sobre un instrumento musical de cuerda elaborado
 68 artesanalmente con dicha madera.

69

70 3. Metodología

71

72 La madera utilizada en el presente estudio fue obtenida de una plantación experimental de
 73 *Paulownia elongata* propiedad de ACOR (Sociedad Cooperativa General Agropecuaria), localizada en el
 74 término municipal de Castrillo de Duero, en la provincia de Valladolid, cuyo destino era para
 75 producción de biomasa.

76 Se seleccionaron 8 árboles que fueron cortados en trozas de 150 cm de longitud y
 77 posteriormente aserradas en piezas de dos dimensiones diferentes;

- 78 ✓ 41 probetas a escala de madera estructural, de 6 x 4 x 120 cm para los ensayos flexión y
- 79 determinación de la densidad según norma UNE-EN 408.
- 80 ✓ 25 probetas de 2 x 2 x 6 cm con las que se analizaron: humedad según UNE-EN 13183-1 y las
- 81 contracciones (UNE 56-533).

Finalmente se fabricó un rabel tradicional (Figura 1) con la ayuda de dos constructores de instrumentos con el fin de analizar el comportamiento del sonido en el estudio de grabación Eldana. El análisis del sonido se realizó con un Micrófono de medición HDM que posee un patrón polar omnidireccional y una respuesta en frecuencia de 5Hz - 30kHz $\pm 1/-3$ dB y la tarjeta de sonido RME Fireface UFX con el programa de audio LOGIC PRO X. Se comparó el sonido de las cuerdas A y G del rabel de madera de *Paulownia elongata* y otro rabel de madera de *Pinus pinaster* ambos de las mismas dimensiones y elaborados de forma artesanal.



Figura 1. Rabel de *Paulownia* encordado preparado para la prueba de sonido

4. Resultados y Discusión

Se presentan en la Tabla 2 las propiedades físico-mecánicas básicas más significativas en la caracterización de la *Paulownia elongata*, cuyas piezas de ensayo se encontraban aclimatadas en el laboratorio al 12% de humedad.

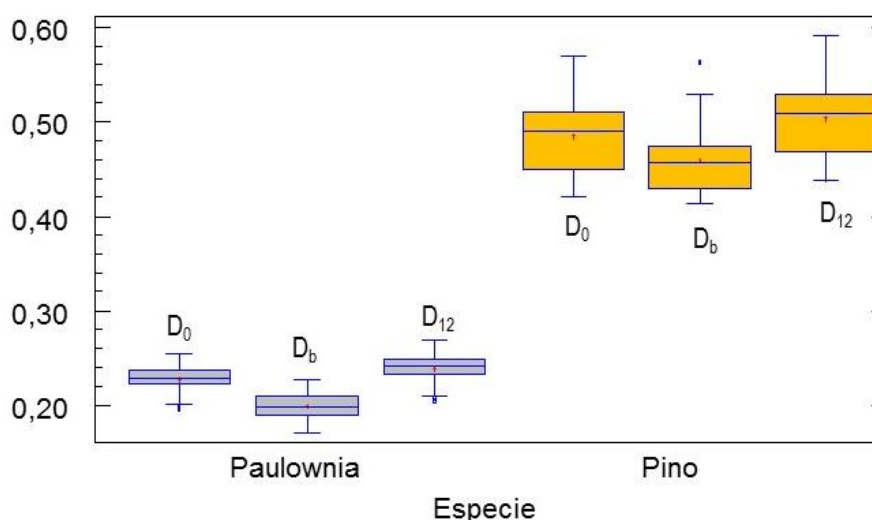
Tabla 2. Propiedades físicas de *Paulownia elongata*. n: número de muestras, CV: coeficiente de variación, máx: valor máximo, mín: valor mínimo.

Propiedad física	n	media	CV%	máx	mín	Normalidad
Densidad anhidra (g/cm ³)	25	0,227	6,58	0,255	0,195	SI
Densidad básica (g/cm ³)	25	0,209	7,63	0,237	0,177	SI
Densidad 12 % (g/cm ³)	25	0,248	6,44	0,278	0,215	SI
Contracciones (%)						
Longitudinal (%)	25	0,428	32,98	0,741	0,165	SI
Radial (%)	25	3,807	22,92	6,039	2,464	SI
Tangencial (%)	25	7,335	20,637	11,090	5,048	SI
Volumétrica (%)	25	8,733	21,05	12,080	5,612	SI

103 A la vista de los resultados obtenidos, la densidad normal (al 12% de humedad) de la madera
 104 de *Paulownia elongata* es de 0,248 g/cm³, encuadrándose dentro del grupo de maderas muy ligeras,
 105 y con valores similares a los encontrados en estudios anteriores sobre *Paulownia* (Zhao-hua et al.,
 106 1986, Kaymakci et al., 2013, Marcos et al., 2009).

107 La densidad básica media que se obtuvo para la *Paulownia elongata* fue de 0,209 g/cm³, algo
 108 inferior a la encontrada en otros trabajos sobre esta especie (Fernández-Puratich et al. 2014, Akyildiz
 109 & Kol 2009 y Sobhani et al. 2011). En cuanto a la densidad anhidra de esta madera, el valor medio
 110 que se encontró el presente estudio fue de 0,227 g/cm³, con rangos próximos a los 0,209 - 0,243
 111 g/cm³ publicados por Zhao-hua et al. (1986).

112 Estos resultados se representan en la figura 2 en la que vienen acompañados por los valores
 113 obtenidos para *Pinus pinaster*, especie que se ha utilizado como referencia por su amplio
 114 conocimiento científico y técnico. Se puede observar que los valores para cualquiera de las
 115 densidades determinadas en esta especie son, en todos los casos, algo más del doble de los
 116 encontrados para *Paulownia elongata*. Así, se obtuvieron valores medios de 0,514, 0,437 y 0,482
 117 g/cm³ para la densidad normal (12% de humedad), densidad básica y densidad anhidra,
 118 respectivamente.



119

120 *Figura 2.- Gráficos box-plot de la densidad anhidra (D₀), básica (D_b) y normal (D₁₂) para la Paulownia elongata y Pinus*
 121 *pinaster.*

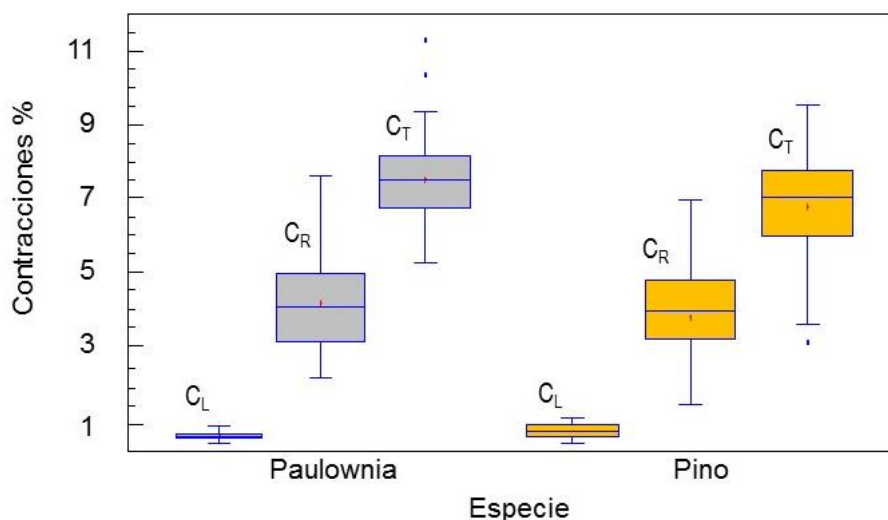
122

123 Respecto a la contracción volumétrica de la *Paulownia elongata*, con un valor medio de 8,73
 124 % se encuentra dentro de la clase "Contracción pequeña", similar a estudios anteriores que ofrecen
 125 valores entre 8,76 % y 13,59 % (Zhao-Hua et al., 1986) y algo inferior a la encontrada para pino
 126 pinaster 9,798 %.

127 El valor medio de la contracción radial de las muestras de *Paulownia elongata* fue de 3,81 %
 128 que está entre los valores de 2,28 % y 4,41 % obtenidos por Zhao-Hua et al. (1986). La contracción
 129 tangencial media fue de 7,33 % situado entre el 5,61 % y 8,07 % del mismo trabajo de Zhao-Hua et
 130 al. (1986).

131 En su comparación con *P. pinaster*, se observa, figura 3, que éste presenta contracciones
 132 radiales y tangenciales del mismo orden que Paulownia, sin encontrarse entre ellos diferencias
 133 estadísticamente significativas. Estos resultados indican que la madera de *Paulowinia elongata*

134 puede ser considerada muy estable frente a cambios de humedad e ideal para su destino en
135 ebanistería.



136

137 *Figura 3.- Gráficos box-plot de las contracciones longitudinales (CL), radiales (CR) y tangenciales (CT).*

138

139 Los ensayos de flexión según norma europea, EN 408, en las muestras de *Paulownia*
140 *elongata* ofrecieron un valor medio para el Módulo de elasticidad (MOE) muy bajo, 3100,1 N/mm²,
141 inferior a los obtenidos por Kaymakci et al. (2013) que se sitúan entre 3550 y 3880 N/mm² y los
142 4200 y 4400 N/mm² de Zhao-Hua et al (1986). El valor medio de la resistencia a flexión (MOR) fue de
143 28,5 N/mm² también inferior a los resultados de Kaymakci et al. (2013) cuyos valores son superiores a
144 los 35 N/mm² y los 28,9 y 35,6 N/mm² de Zhao-Hua et al (1986). Dichos resultados se pueden
145 observar en la Tabla 3, donde se incluye el valor del coeficiente de variación (CV) como indicador de la
146 variabilidad de los resultados.

147 Los bajos valores elastomecánicos obtenidos desestiman a la madera de *Paulownia elongata*
148 para uso estructural, sin embargo dada su baja densidad podría ser un buen material como aislante
149 térmico ecológico, natural y renovable.

150 *Tabla 3. Módulo de elasticidad (MOE) y Módulo de rotura (MOR) de Paulownia elongata. n: número de muestras, CV:*
151 *coeficiente de variación, máx: valor máximo, mín: valor mínimo.*

	n	Media	CV%	máx	mín	Normalidad*
MOE (N/mm ²)	41	3100,1	12,356	3934,67	2284,84	SI
MOR (N/mm ²)	41	28,492	15,708	33,91	18,46	NO

En las Figuras 4, 5, 6 y 7 se muestran las gráficas del sonido de los ensayos efectuados sobre los rabeles de madera de *Pinus pinaster* y *Paulownia elongata* tras el análisis acústico llevado a cabo para su comparación entre la cuerda más grave A y la cuerda más aguda G (ambas en notación inglesa).



Figura 4. Gráfica del sonido del rabel de Paulownia elongata con la cuerda G



Figura 5. Gráfica del sonido del rabel de Paulownia elongata con la cuerda A



Figura 6. Gráfica del sonido del rabel de Pinus pinaster con la cuerda G

152
153
154

155

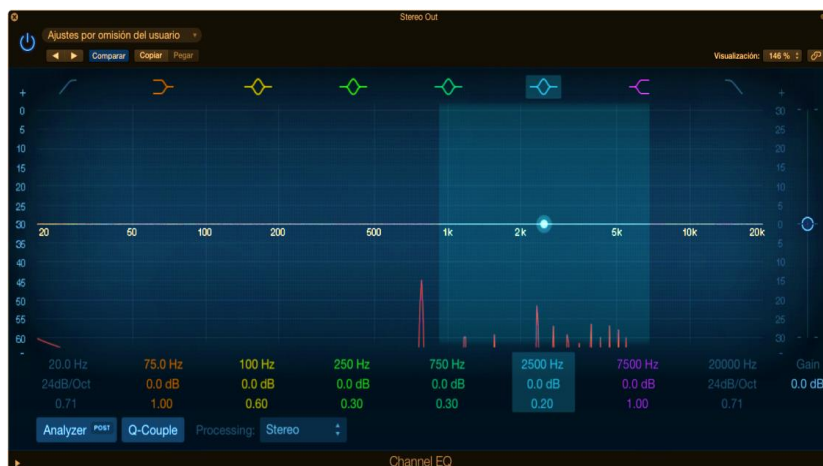


Figura 7. Gráfica del sonido del rabel de *Pinus pinaster* con la cuerda A

156

157 Respecto a los ensayos sonoros, el sonido de la *Paulownia elongata* posee mayor amplitud en
 158 la nota fundamental, lo que da lugar a un mayor vientre como se observa en las figuras 4 y 5,
 159 teniendo además un mayor número de armónicos formando colas de ondas más grandes, dando
 160 mayor amplitud sonora y sensación plena del mismo. El *Pinus pinaster* posee un menor pico en la
 161 nota fundamental con un vientre menor, como se aprecia en las figuras 6 y 7. Además los gráficos
 162 indican que el pinaster posee un menor número de armónicos con colas de ondas menores, siendo
 163 menor su amplitud sonora y la frecuencia nasal del sonido.

164

165

166 5. Conclusiones

167

168 Los valores medios de las principales propiedades físicas de la madera de *Paulownia*
 169 *elongata* de una plantación de 7 años en el valle del Duero en España, ofrecen los siguientes
 170 resultados: 0,248 g/cm³ la densidad normal, 0,43 % la contracción longitudinal, 3,81 % la
 171 contracción radial, 7,33 % la contracción tangencial y 8,73 % la contracción volumétrica.

172

173 Atendiendo a la norma UNE 56.529, la interpretación de resultados indica que es una
 174 madera ligera, por su baja densidad, y presenta una contracción pequeña por lo que se considera
 175 muy estable frente a cambios de humedad e ideal para su destino en ebanistería. Las propiedades
 176 elasto-mecánicas determinadas dan un valor medio del MOE de 3100,1 N/mm² y un valor del MOR
 177 de 28,5 N/mm², valores que indican que se trata de una madera de muy baja calidad estructural,
 178 especialmente por su bajísima rigidez.

179

180 Respecto a las propiedades acústicas, tiene una buena calidad sonora global, por la amplitud
 181 de su nota fundamental y por el número de armónicos que presenta, lo cual convierte a la
 182 *Paulownia elongata* en una especie muy apta para la construcción de instrumentos musicales.

183

184

185 6. Agradecimientos

186

Nuestros agradecimiento a ACOR (Sociedad Cooperativa General Agropecuaria) por donarnos la madera de *Paulownia*, a D. Jesús Cabeza Ibáñez y D. Julio Pozo Novo artesanos y constructores de instrumentos y a Jorge Calderón Muriel ingeniero de sonido (KLD SOUND) en estudios ELDANA (Dueñas).

187

7. Bibliografía

- 188
189
190 AKYILDIZ, M. H. & KOL, S. H. (2010). Some Technological Properties and Uses Of Paulownia
191 (*Paulownia tomentosa* Steud.) Wood. *Journal of Environmental Biology*, 31, 351–355.
192
- 193 AYRILMIS, N. & KAYMAKCI, A. (2013). Fast growing biomass as reinforcing filler thermoplastic
194 composites: *Paulownia elongata* wood. *Industrial Crops and Products*. Vol 43.
195
- 196 CAPARRÓS, S., DÍAZ, M. J., ARIZA, J., LÓPEZ, F. & JIMÉNEZ, L. (2008). New perspectives for
197 *Paulownia fortunei* L. colorization of the auto hydrolysis and pulping processes. *Biorresource*
198 *Technology*. Vol 99. Issue 4.
199
- 200 DOUMETT, S., LAMPERI, L., CHECCHINI, L., AZZARELLO, E., MUDNAI, S. & MANCUSO, S.
201 (2008). Heavy metal distribution between contaminated soil and *Paulownia tomentosa*, in a
202 pilot-scale assisted phytoremediation study: influence of different complexing agents.
203 *Chemosphere*. Volume 72. Issue 10. 1481-1490.
204
- 205 FERNÁNDEZ-PURATICH, H., J.V. OLIVER-VILLANUEVA, M. VALIENTE, S. VERDÚ, Y N. ALBERT.
206 (2014). Desarrollo de pellets a partir de tres especies leñosas bajo condiciones
207 mediterráneas. *Madera y Bosques*, 20(3):97-111.
208
- 209 JIMÉNEZ, L. Y RODRÍGUEZ, A. (2003). La *Paulownia* como materia prima para la fabricación
210 de papel. *Química Teórica y Aplicada*, 516:100-105.
211
- 212 KASAMAKI, P. (2009). Cultivos energéticos. *Paulownia* para biomasa. Jornada sobre cultivos
213 energéticos leñosos organizada por ADABE y ESCAN. Madrid.
214
- 215 KAYMAKCI, A., BEKTAS, I. & BAL, B. C. (2013). Some mechanical properties of paulownia
216 (*Paulownia elongata*) wood. International Caucasian Forestry Symposium. Turkey. 917-919.
217
- 218 KIAEI, M. (2012). Physical and Mechanical Properties of Paulownia Wood (*Paulownia fortunei*)
219 in North Iran. *Middle-East Journal of Research*, 11(7): 964-968.
220
- 221 LATORRE, B. Y J.R. RUANO. (2009). Caracterización energética de la biomasa de *Paulownia*
222 spp. procedente de plántulas cultivadas de una savia. *Montes* 98:77-82.
223
- 224 LUCAS, M., E. MARTÍNEZ, F. GARCÍA MOROTE, F. LÓPEZ SERRANO Y M. ANDRÉS ABELLÁN.
225 (2010). El cultivo de Paulonia para la obtención de madera y biomasa en Castilla-La Mancha:
226 Primeros resultados. *Foresta*, 47/48:103-110
227
- 228 LÓPEZ, F., PÉREZ, A., ZAMUDIO, M. A. M., DE ALVA, H. E. & GARCÍA, J. C. (2012). Paulownia as
229 raw material for solid biofuel and cellulose pulp. *Biomass and Bioenergy*. Vol 45. 77-86.
230
- 231 MADEJÓN, P., XIONG, J., CABRERA, F. & MADEJÓN, E. (2014). Quality of trace element
232 contaminated soils amended with compost under fast growing tree *Paulownia fortunei*
233 plantation. *Journal of Enviroment Management*. Vol 144. 176-185.
234

- 235 MADEJÓN, P., DOMÍNGUEZ, M.T., DÍAZ, M.J. & MADEJÓN, E. (2016). Improving sustainability
236 in the remediation of contaminated soils by the use of compost and energy valorization by
237 *Paulownia fortunei*. *Science of The Total Environment*. Vol 539. 401-409.
238
- 239 MARCOS, F., LATORRE, B., IZQUIERDO, I., PASCUAL, C. (2009). Estudio de plantaciones
240 energéticas de PAULOWNIA SPP. a turnos muy cortos. V Congreso Forestal Español.
241
- 242 ROJAS GUTIÉRREZ, A.M. (2008). Paulownia: Valioso Género que Conquista el Mercado.
243 *Revista el Mueble y la Madera*. 9-15.
244
- 245 SOBHANI, M., KHAZAEIAN, A., TABARSA, T. & SHAKERI, A. (2011). Evaluation of physical and
246 mechanical properties of paulownia wood core and fiberglass surfaces sandwich panel. *Key*
247 *Engineering Materials*. Vol. 471-472. pp 85-90.
248
- 249 UNE-EN 408:2011. “Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada
250 para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas”.
- 251 UNE-EN 13183-1:2004. “Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1:
252 Determinación por el método de secado en estufa”
253
- 254 UNE 56-533:1977. “Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de las
255 contracciones lineal y volumétrica”.
256
- 257 YORGUN, S. & YILDI, D. (2015). Slow pyrolysis of paulownia wood: effects of pyrolysis
258 parameters on product yields and bio-oil characterization. *Journal of Analytical and Applied*
259 *Pyrolysis*. Vol 114. 68-78.
260
- 261 ZHAO-HUA, Z., CHING-JU, C., XIN-YU L. & YAO GAO, X. (1986). Paulownia in China: cultivation
262 and utilization. *Chinese Academy of Forestry*, Beijing. China.