



# Estudio de *Paulownia* spp. como cultivo forestal de rotación corta para fines energéticos en condiciones mediterráneas

A study of *Paulownia* spp. as a short-rotation forestry crop for energy uses in Mediterranean conditions

Harald Fernández-Puratich<sup>1</sup>, José-Vicente Oliver-Villanueva<sup>2</sup>, Victoria Lerma-Arce<sup>2</sup>,  
María Dolores García<sup>3</sup> y María Dolores Raigón<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Talca. Facultad de Ingeniería. Departamento de Tecnologías Industriales. Talca, Chile.  
\* Autor de correspondencia. hfernandezp@utalca.cl

<sup>2</sup> Universitat Politècnica de València, ITACA. Valencia, España.

<sup>3</sup> Universitat Politècnica de València. Departamento de Química. Escuela Técnico Superior de Medioambientes Rurales y Enología. Valencia, España.

## RESUMEN

Las plantaciones de rotación corta desempeñan un papel importante como fuente biomásica energética sostenible que puede aumentar la seguridad del suministro, la generación de ingresos en comunidades rurales locales y disminuir la dependencia energética de combustibles fósiles. En este sentido, las plantaciones de rotación corta han sido ampliamente reconocidas, lo que hace necesario aumentar las alternativas de fuentes biomásicas disponibles para su uso energético. El objetivo de este estudio fue cuantificar la biomasa leñosa y el potencial energético de la especie arbórea paulonia (*Paulownia* spp.) de un año de edad en condiciones mediterráneas. Se seleccionaron parcelas de prueba en la Comunidad Valenciana (España oriental) para desarrollar un modelo predictivo de cuantificación de biomasa y su potencial energético, en dos tipos de parcelas según densidad y existencia de riego (P1 y P2), siendo el promedio efectivo de biomasa por hectárea (el fuste es hueco en su sección medular en un 19,2%) en P1 y P2 de 27,3 t ha<sup>-1</sup> a 47,6 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. En cuanto al potencial energético, los ensayos de laboratorio muestran que paulonia posee un poder calorífico de 17,8 MJ kg<sup>-1</sup>, su energía potencial en P1 es de 207 MJ árbol<sup>-1</sup> y 247 GJ ha<sup>-1</sup> y mayor en P2 con 349 MJ árbol<sup>-1</sup> y 274 GJ ha<sup>-1</sup>. Teniendo en cuenta el rápido crecimiento de esta especie y su alto potencial energético, debería considerarse como una materia prima válida para su uso en energía térmica a corto plazo en zonas mediterráneas.

**PALABRAS CLAVE:** biomasa, energético, paulonia, rotación corta.

## ABSTRACT

The plantations of short rotation play a role importantly as source sustainable energetics that can increase the safety of the supply, the generation of income in rural communities and decrease energy dependence on fossil fuels. In this respect, short rotation plantations have been widely recognized, which makes it necessary to increase the available biomass sources alternatives for their energy use. The aim of this study was to quantify the woody biomass and the energetic potential of the forest species paulonia (*Paulownia* spp.) of a year of age in Mediterranean conditions. Test plots were selected in the Valencian Community (eastern Spain) to develop a predictive model of biomass quantification and his energetic potential in two types of plots according to density and existence of irrigation (P1 and P2), with the average effective biomass per hectare (the stem is hollow in its medullary section in 19,2%) in P1 and P2 between 27,3 t ha<sup>-1</sup> and 47,6 t ha<sup>-1</sup> respectively. As for the energy potential, the laboratory tests show that paulonia has a calorific value of 17,8 MJ kg<sup>-1</sup>, his potential energy in P1 is 207 MJ tree<sup>-1</sup> and 247 GJ ha<sup>-1</sup> and higher in P2 with 349 MJ tree<sup>-1</sup> and 274 GJ ha<sup>-1</sup>. Taking into account the fast growing of the species and its high energy potential, it should be considered as a valid raw material for his use in heat energy in the short term in Mediterranean zones.

**KEYWORDS:** biomass, energetic, paulownia, short rotation.

## INTRODUCCIÓN

La biomasa se suma a los beneficios generales compartidos por otras energías renovables no convencionales con una serie de características específicas para apoyar el mantenimiento y desarrollo de los sectores agrícola y forestal en las zonas rurales (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2012). En Europa, la estrategia de desarrollo del sector energético, a partir de biomasa, se centra en la utilización sustentable de la biomasa forestal residual (poda, raleo y material de bajo valor en la industria de la madera), tala de árboles, residuos de biomasa agrícola de poda y de la agroindustria en general (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2011). Por otra parte, la región mediterránea tiene una gran extensión que, a pesar de poseer restricciones alimenticias y de agua, la disponibilidad de estos recursos es suficiente para soportar cultivos leñosos de rotación corta para la producción de energía; sin embargo, esto no es fomentado en la actualidad debido al modelo agrícola existente (Rodríguez-Rivas, 2009; Puya, Tabara, Bartroli-Molins, Bartroli-Almera y Rieradevall, 2008). Un cultivo leñoso de rotación corta ofrece una gran oportunidad, pues tiene la ventaja de que su producción se puede planificar y optimizar de acuerdo con las necesidades expresadas por la demanda del mercado energético (Spinelli y Nati, 2007). Esto contrasta con la biomasa residual de origen agroforestal, donde la producción está condicionada por las actividades culturales y, en general, se encuentra dispersa en el territorio. Lo anterior genera el aumento de los costos de logística del suministro tanto en la recolección como en el transporte desde el campo o el bosque hacia las instalaciones industriales (Gómez, 2008). Por lo tanto, las características presentes en un cultivo leñoso de rotación corta ayudan a minimizar el problema más importante que tiene actualmente el mercado de la biomasa, que es garantizar el suministro de aserrín y astillas en cantidad y calidad en el punto de consumo de alta demanda, tales como plantas de *pellets* o de cogeneración (Reeg, Bemann, Konold, Murach y Spiecker, 2009).

En Europa, la mayoría de las experiencias con cultivos leñosos intensivos de corta rotación destinados a ener-

gía se han desarrollado en zonas frías y húmedas de Europa central y septentrional, principalmente con especies como *Populus* spp., *Salix* spp., *Robinia pseudoacacia* y *Ulmus* spp. (Schildbach, Grünewald, Wolf y Schneider, 2009). Sin embargo, falta desarrollar un mayor número de experiencias en zonas cálidas y secas de la costa mediterránea (Archontoulis, 2011).

En esta investigación, paulonia ha sido categorizada como un cultivo leñoso de rotación corta debido a que, a pesar de haber sido poco estudiada en condiciones mediterráneas en la Comunidad Valenciana, durante los últimos años los viveros especializados de la región han estado desarrollando parcelas de prueba y los primeros proyectos de cultivos productivos, especialmente en tierras agrícolas como alternativa a los cultivos de regadío tradicionales como *Citrus* spp. (Sixto, Hernández, Barrio, Carrasco y Cañellas, 2007). Además, paulonia es considerada como una especie que soporta altas temperaturas en verano y tiene baja demanda de agua y por lo tanto, se adapta a las condiciones del Mediterráneo; esto a pesar de que no crece en lugares excesivamente secos (Caparrós, Díaz, Ariza, López y Jiménez, 2008). Las principales especies producidas en los viveros valencianos son *Paulownia elongata*, *Paulownia fortunei*, *Paulownia tomentosa* y los híbridos interespecíficos seleccionados (Cotevisa, 2010).

En este trabajo se estudiaron solamente cultivos de un año de edad pues son los de mayor abundancia y tienen un excepcional crecimiento. Por estas características, se pretende analizar la posibilidad de que las rotaciones sean anuales.

## OBJETIVOS

El objetivo general de esta investigación fue determinar la producción de biomasa leñosa de *Paulownia* spp. y su potencial energético en cultivos de rotación corta, anuales, en condiciones mediterráneas; para analizar la posibilidad de que sea una fuente biomásica que asegure un suministro sostenido de material para usos energéticos.

La investigación tuvo dos objetivos específicos: desarrollar un modelo predictivo de cuantificación de



biomasa de acuerdo con parámetros morfológicos simples (diámetro a la altura del pecho [DAP] y altura [H]), para luego estimar la biomasa real del fuste de paulonia, con respecto a la biomasa aparente debido al volumen vacío en su zona medular y, finalmente, realizar un análisis físico y energético para determinar el potencial energético por individuo (árbol) y por superficie (hectárea).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Selección de parcelas

Se realizó una selección de parcelas de muestreo representativas para dos diferentes densidades de cultivo (P1: 1196 arb ha<sup>-1</sup> y P2: 785 arb ha<sup>-1</sup>), sobre la base de un inventario en parcelas de un año de edad donde se documentó edad, área basal, diámetros y alturas de los árboles. Cabe señalar que las plantaciones de P1 no contaron con riego y las de P2 contaron con riego a manta, heredado de antiguas plantaciones de naranjo. En total, se muestrearon 30 parcelas (P1: 15 parcelas y P2: 15 parcelas).

Los criterios básicos para la selección de las parcelas fueron el cumplimiento de todos los parámetros analizados con los intervalos de confianza del muestreo general para ambos tipos de parcelas (P1 y P2) de dos diferentes densidades de plantación, disponibilidad de parcelas en el momento del estudio y su accesibilidad, tamaño mínimo de 0,25 ha, suelo y características climáticas comparables y representativas de la región mediterránea en España.

### Selección de árboles

El número de árboles seleccionados para el muestreo de cada parcela se basó en la metodología propuesta por Hapla y Saborowski (1984) para la determinación del tamaño de la muestra:

$$N_{min} > (z^2 \times s^2) / l^2$$

Donde:

$N_{min}$  = mínimo de la muestra (árboles por parcela);

$z = 1,96$  es el valor crítico de la distribución normal estándar para el nivel de significancia 2.5% (Sachs, 1984)

$s =$  desviación estándar máxima

$l =$  precisión absoluta deseada, que se define como  $l = 0.01 \times d \times x_{min}$

$d = 5$ , para precisión relativa de 95%

$x_{min} =$  valor promedio más bajo de todas las muestras

Los individuos seleccionados corresponden a aquellos que, tras un análisis de distribución normal en que se obtiene promedio, desviación estándar, mínimos y máximos para las variables DAP y altura (H), se determina el intervalo aceptable para estas variables que debe cumplir el individuo seleccionado para ser considerado representativo de la parcela. Fue así como se seleccionaron 15 árboles al azar, evitando que fueran colindantes, por cada parcela de acuerdo con esta metodología para un monocultivo coetáneo, teniendo un total de 450 árboles muestreados.

### Recolección de datos y muestras

Se llevaron a cabo mediciones de las variables dendrométricas principales (DAP y H total) tanto a los árboles en pie (450 árboles) como a los 15 árboles seleccionados que fueron talados y de los cuales se extrajeron seis discos por individuo a cada 1 m (aprox.) hasta 5.5 m de altura. También se tomaron muestras de ramas, seleccionando al azar dos ramas por árbol talado (tres muestreos por rama: en la base, el medio y el final) con el fin de determinar por separado el poder calorífico de fuste y ramas.

El DAP representativo se obtuvo siguiendo la metodología de Siostrzonek (1958), midiendo el diámetro máximo del fuste según la altura de medición, para luego girar 22,5° con la forcípula, en sentido horario y registrando el diámetro correspondiente.

Todas las muestras se llevaron al laboratorio de biomasa del Instituto de Ingeniería Energética de la Universidad Politécnica de Valencia para la caracterización física y energética, de acuerdo con los requisitos técnicos presentes en la normativa europea.

## Cuantificación volumétrica de biomasa leñosa

### *Morfología del fuste*

Para calcular el volumen del árbol se determinó un factor de forma ( $f_v$ ) como resultado del volumen del árbol real y el volumen del cilindro.

$$f_v = \frac{\text{Volumen real de la estructura}}{\text{Volumen del modelo}} \quad [1]$$

El factor de forma es un parámetro característico de cada especie arbórea y su clase diamétrica. Este factor puede ser normalizado a través de la ecuación de Huber (1828) que definió el factor de forma real.

### *Relación del DAP y volumen del fuste*

El volumen por árbol se determinó como un parámetro de referencia.

$$V_i = g_m \times H \quad [2]$$

Donde  $V_i$  es el volumen ( $m^3$ ),  $g_m$  el área basal ( $m^2$ ) en el punto medio de la sección y  $H$  es la altura o longitud del fuste (m).  $R^2$  se determinó mediante un análisis de regresión de la relación entre el diámetro y el volumen del fuste de paulonia.

El volumen medio se ajustó al factor de forma por árbol y se realizó una prueba  $t$  para comparar las medias entre P1 y P2. Luego se estimó el rendimiento anual por parcela ( $m^3 \text{ ha}^{-1}$ ).

### *Análisis del volumen aparente en comparación con el volumen real*

En paulonia existe un volumen aparente y un volumen real debido a que el árbol, según los muestreos realizados, es hueco en la sección medular del fuste al menos hasta el primer año desde su establecimiento. Por lo tanto, se calculó el volumen real con la fórmula del cilindro y el factor de forma de la especie ya calculado previamente. Además, con el fin de determinar el volumen vacío, se calculó el diámetro medio de la sección hueca a diferentes alturas, hasta los 5.5 m de altura,

que es donde en promedio se producía la oclusión de esta oquedad.

### *Caracterización física de astillas de madera*

En la caracterización física de las astillas no se separó por tipo de parcela (P1 y P2), ya que este ítem trata de una caracterización general como especie.

### *Contenido de humedad*

El contenido de humedad se determinó según la norma técnica UNE-EN ISO 18134-1 (Asociación Española de Normalización y Certificación [Aenor], 2016).

Se determinó el peso saturado de cada muestra, para luego secarla a una temperatura entre 101 °C y 105 °C, hasta peso constante; determinándose en ese momento el peso seco de la muestra. Para comprobar que se logra el peso anhidro (0% de humedad) se realizaron pesadas diarias hasta una masa constante, en un intervalo de 24 horas. Para ello, se utilizó una balanza electrónica con resolución de 0.001 g.

La determinación del contenido de humedad de la madera durante el secado, en ambos tipos de ramas, se obtiene utilizando la siguiente ecuación (Kollmann, 1959):

$$CH = \frac{P_b - P_s}{P_s} \times 100\% \quad [3]$$

Donde, CH es el contenido de humedad (%);  $P_h$  es el peso húmedo (g) y  $P_s$  es el peso anhidro (g).

### *Densidad de la madera*

Se determinó la densidad básica de la madera, que es la relación de la masa en estado anhidro y el volumen con un contenido de humedad mayor o igual a 30% (Kollmann, 1959). Se determinó también el contenido de humedad de las muestras de madera.

La determinación de la densidad fue realizada por el teorema de Arquímedes, siguiendo las instrucciones de Olesen (1971), ya que se considera uno de los métodos más prácticos y exactos. Se trata de medir el volumen de la probeta de madera en función del peso del líquido desplazado por inmersión (medición del empuje). Al sumergir



la muestra en un recipiente con agua, se produce una diferencia, equivalente al peso del agua desplazada, que equivale al volumen de la pieza sumergida. La densidad se calcula mediante la siguiente fórmula (Olesen, 1971):

$$P_c = \frac{m_c}{m_a} \times P_a \quad [4]$$

Siendo,  $P_c$  la densidad del cuerpo en gramos por centímetro cúbico ( $\text{g/cm}^3$ );  $P_a$  la densidad del agua ( $\text{g/cm}^3$ );  $m_c$  la masa del cuerpo (g), y la masa relativa al valor del empuje del cuerpo en el agua en gramos.

### Caracterización energética de la biomasa leñosa

Se refiere a la determinación de la capacidad de poder calorífico de las astillas de paulonia. En la caracterización energética de las astillas no se separó por tipo de parcela (P1 y P2), ya que este ítem trata de una caracterización general como especie.

El poder calorífico se define como el calor liberado por kilogramo de combustible en una combustión completa a una presión atmosférica y temperatura normal (Moglia, Giménez y Bravo, 2007; Kollmann, 1959). Se aplicó el método de ensayo según la norma ISO 18125 (International Organization for Standardization [ISO], 2017). Para llevar a cabo las pruebas, fue necesario primero transformar las muestras en aserrín o fragmentos menores a 5 mm, usando una astilladora y luego un molino de martillos refinador. Para determinar el valor de poder calorífico (PC), las muestras se acondicionaron a  $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  de temperatura y  $50\% \pm 5\%$  de humedad hasta un peso constante. Después de esto, las muestras fueron quemadas en condiciones estandarizadas en un calorímetro.

### Cuantificación de la biomasa leñosa y potencial energético

#### *Determinación de la biomasa*

Para la cuantificación de la biomasa (en toneladas) fue necesario transformar de metros cúbicos calculados previamente, según las ecuaciones ajustadas a una unidad de peso (kg o t). Esto es, multiplicando el volumen por árbol ( $\text{m}^3$ )

por su densidad ( $\text{kg m}^{-3}$ ) para obtener la biomasa contenida en un árbol ( $\text{kg árbol}^{-1}$ ). Una vez que se conoce el peso por árbol ( $\text{kg árbol}^{-1}$ ) se multiplica por el número de árboles por hectárea lograr toneladas de biomasa por hectárea.

#### *Determinación del potencial energético*

Para cuantificar el potencial energético de la biomasa es necesario transformar la biomasa, ( $\text{kg árbol}^{-1}$  a  $\text{MJ árbol}^{-1}$ , lo que se logra mediante la determinación del PC promedio de la especie). Donde se multiplica  $\text{kg árbol}^{-1}$  por PC ( $\text{MJ kg}^{-1}$ ) obteniéndose  $\text{MJ árbol}^{-1}$ , lo que es expandible a la superficie ( $\text{MJ ha}^{-1}$ ), conociendo la cantidad de árboles por hectárea. Estos valores fueron el resultado de la adaptación de las ecuaciones obtenidas mediante la estimación del volumen ajustado obteniendo:  $\text{kg árbol}^{-1}$ ;  $\text{t ha}^{-1}$ ;  $\text{MJ árbol}^{-1}$  y  $\text{GJ ha}^{-1}$ .

## RESULTADOS

### Cuantificación volumétrica de biomasa leñosa

#### *Morfología de fuste*

Se calculó el factor de forma de cada árbol muestreado. El resultado obtenido corresponde al volumen promedio total de árboles talados, obteniéndose un factor de forma (0,69) con un coeficiente de variación muy bajo (9,6%). Este factor de forma se incorporó en la ecuación de volumen del siguiente ítem.

#### Relación del DAP y volumen del fuste

Las ecuaciones de volumen de fuste obtenidas se determinan a través del DAP del fuste. Siendo los resultados obtenidos correspondientes a P1: mayor densidad de plantas (1196) y P2: menor densidad de plantas (785) ambos para una rotación anual.

Las figuras 1 y 2 muestran las ecuaciones más significativas obtenidas mediante un análisis de regresión a través del DAP del fuste. Tanto P1 como P2 presentan un  $R^2$  alto, 97,6% y 89,1% respectivamente. Estas son capaces de predecir el volumen de fuste con el DAP como única variable y un factor de forma constante (0,69).

TABLA 1. Ecuaciones de volumen real y aparente para *Paulownia* spp. de 12 meses de edad.

| Volumen del fuste (m <sup>3</sup> ) | Parcelas | Ecuaciones                                      | R <sup>2</sup> | σ V <sub>fr</sub> |
|-------------------------------------|----------|---|----------------|-------------------|
| Vol. real                           | P1       | Vfr = -0,012 + 0,002 DAP + 0,002 H              | 0,974***       | 0,001             |
|                                     | P2       | Vfr = -0,069 + 0,009 DAP + 0,005 H              | 0,989***       | 0,001             |
| Vol. aparente                       | P1       | Vf = 0,001 DAP <sup>2</sup> - 0,021 DAP + 0,385 | 0,976***       | 0,002             |
|                                     | P2       | Vf = 0,008 DAP <sup>2</sup> - 0,084 DAP + 0,446 | 0,891***       | 0,004             |

Donde V<sub>fr</sub> es el volumen real del fuste (m<sup>3</sup>); V<sub>f</sub> es volumen de fuste (m<sup>3</sup>); DAP es el diámetro a 1,3 m del fuste, H es la altura de los árboles, R<sup>2</sup> es el coeficiente de determinación (\*\*\*) P < 0,001) y σV<sub>fr</sub> la desviación estándar V<sub>fr</sub>.

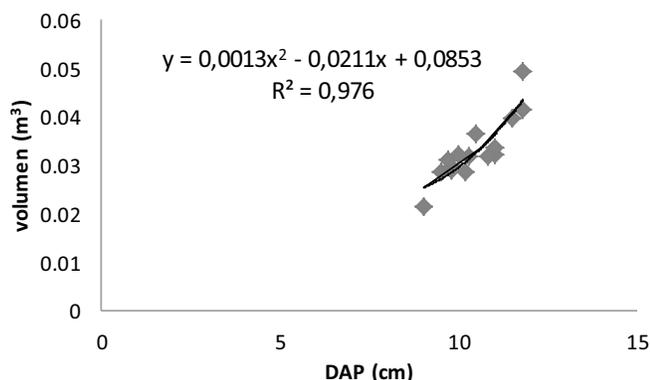


FIGURA 1. Relación del DAP (cm) - volumen del fuste (m<sup>3</sup>) en P1 de *Paulownia* spp.

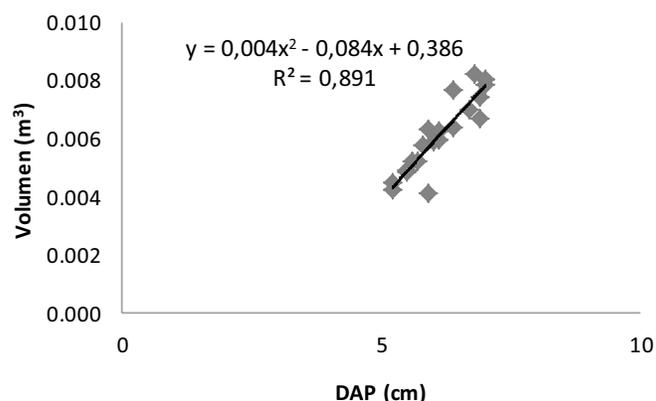


FIGURA 2. Relación del DAP (cm) - volumen del fuste (m<sup>3</sup>) en P2 de *Paulownia* spp.

**Análisis del volumen aparente versus volumen real**

En este estudio se determinó que la estructura del árbol de paulonia es hueca en la sección medular del fuste, donde el diámetro de oquedad varía dependiendo de la altura, tal como se ilustra en la figura 3.

La figura 3 muestra el inicio de la oquedad en la base del árbol a una altura de 20 cm del suelo aumentando hasta el DAP logrando un diámetro promedio máximo de 2,3 cm y luego decrece a medida que se aumenta en altura hasta que se produce la oclusión aproximadamente a los 5,5 m.

La tabla 2 muestra la determinación del volumen que corresponde a un promedio de las 30 parcelas del estudio (P1 y P2) con el fin de cuantificar la madera aparente con respecto a la real desde el punto de vista de la producción de madera en términos generales. Siendo los resultados para el volumen real promedio de 0,036 m<sup>3</sup> árbol<sup>-1</sup> y volumen aparente promedio de 0,043 m<sup>3</sup> árbol<sup>-1</sup> hasta los 5,5

m de altura promedio; estos resultados fueron determinados por las ecuaciones de la tabla 1 y el factor de forma. Por lo tanto, 81,8% del volumen está ocupado por material leñoso con respecto al volumen aparente. El porcentaje en volumen restante corresponde al volumen vacío en la zona medular interior del fuste (19,2%).

De esta manera, según la tabla 3, el volumen aparente promedio por árbol en P1 es 0,022 m<sup>3</sup> árbol<sup>-1</sup> y el volumen real promedio por árbol en P2 es 0,058 m<sup>3</sup> árbol<sup>-1</sup>. Por lo tanto, y de acuerdo a su densidad de cultivo, P1 tiene un rendimiento de producción anual de 58,6 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> y P2 tiene un rendimiento de producción anual de 58,6 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>.

**Caracterización física de astillas de madera**

Se determinó el contenido de humedad y densidad de la madera.

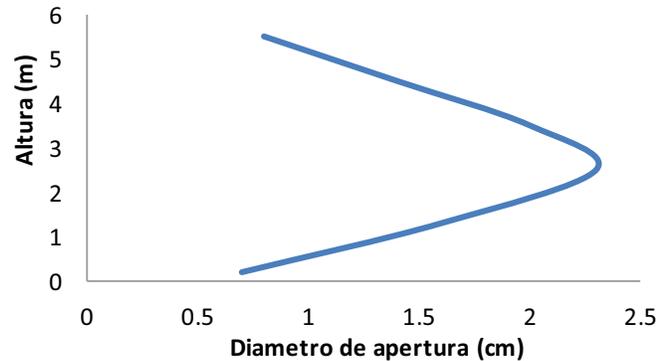


FIGURA 3. Variación de tamaño de la oclusión del fuste de *Paulownia* spp. hasta los 5,5 m de altura

TABLA 2. Volumen de fuste ( $m^3 \text{ árbol}^{-1}$ ) en *Paulownia* spp. de 12 meses.

| Volumen  | Min       | - $\sigma$ | Promedio     | + $\sigma$ | Max       | CV (%) |
|----------|-----------|------------|--------------|------------|-----------|--------|
| Aparente | 0,034 ... | 0,038 ...  | <b>0,043</b> | 0,048 ...  | 0,052 ... | 15,8   |
| Real     | 0,028 ... | 0,032 ...  | <b>0,036</b> | 0,041 ...  | 0,044 ... | 16,6   |

TABLA 3. Proyección del rendimiento anual  $m^3 \text{ ha}^{-1}$  en *Paulownia* spp.

| Parcela | Volumen ( $m^3 \text{ árbol}^{-1}$ ) | Densidad ( $\text{árbol ha}^{-1}$ ) | Rendimiento anual ( $m^3 \text{ ha}^{-1}$ ) |
|---------|--------------------------------------|-------------------------------------|---|
| P 1     | 0,022                                | 1196                                | 26,3  |
| P 2     | 0,058                                | 785                                 | 45,5  |

El contenido de humedad promedio de los árboles muestreados fue de 58,6%, donde prácticamente no existe variación entre individuos muestreados (coeficiente de variación de 4%).

La densidad de la madera promedio fue de  $0,297 \text{ g cm}^{-3}$ , donde prácticamente no existe variación entre individuos muestreados (coeficiente de variación de 3%).

### Caracterización energética de la biomasa leñosa

La caracterización energética de la biomasa se hizo por separado en dos fracciones: astillas de madera de fuste y ramas sin hojas obteniendo valores correspondientes a los ensayos de determinación de PC de materia seca en 0% de contenido de humedad.

Los valores obtenidos corresponden al material separado en fuste y ramas que presentan un PC de  $17,4 \text{ MJ kg}^{-1}$  para el fuste y  $18,1 \text{ MJ kg}^{-1}$  para las ramas sin hojas. Después de comprobar el ajuste de los resultados de las muestras a la distribución normal, se realizó una prueba t para comparar las medias de las muestras entre fuste y ramas con resultado de que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias, para un nivel de confianza de 95%. Por lo tanto, es posible establecer un valor promedio que incorpora ambas muestras, y este es de  $17,8 \text{ MJ kg}^{-1}$ .

### Cuantificación de la biomasa leñosa y potencial energético

#### Determinación de la biomasa

La tabla 4 muestra las ecuaciones de estimación de biomasa en base a las obtenidas en la tabla 1 que han sido convertidas a unidades de peso por árbol ( $\text{kg árbol}^{-1}$ ) y por hectárea ( $\text{t ha}^{-1}$ ) a través de la densidad de la madera de  $0,297 \text{ g cm}^{-3}$  y descontando el porcentaje de volumen vacío (19,2%).

La tabla 4 proporciona detalles de los valores promedio obtenidos para la biomasa arbórea contenida en cada

TABLA 4. Determinación de ecuaciones y cuantificación de biomasa por árbol y superficie (ha) para *Paulownia* spp.

| Parcelas | Ecuación por árbol (kg árbol <sup>-1</sup> )    | Ecuación por superficie (t ha <sup>-1</sup> )   | Biomasa (kg árbol <sup>-1</sup> ) | Total Biomasa (t ha <sup>-1</sup> ) |
|----------|---|---|-----------------------------------|-------------------------------------|
| P1       | = 1,277 DAP <sup>2</sup> - 25,037 DAP + 132,551 | = 1,265 DAP <sup>2</sup> - 24,802 DAP + 131,305 | 22,8                              | 27,3                                |
| P2       | = 0,458 DAP <sup>2</sup> - 1,544 DAP + 3,356    | = 0,235 DAP <sup>2</sup> - 1,53 DAP + 3,325     | 60,7                              | 47,6                                |

parcela por hectárea basada en las ecuaciones ajustadas previamente para determinar el volumen.

P1 y P2 varían de 22,8 kg árbol<sup>-1</sup> a 60,7 kg árbol<sup>-1</sup> que indica mayor productividad con menor densidad de plantas respectivamente.

En cuanto al contenido de biomasa por hectárea en P1 y P2, es de 27,3 t ha<sup>-1</sup> y 47,6 t ha<sup>-1</sup> respectivamente.

#### Determinación del potencial de energético

Una vez determinado el contenido de biomasa por árbol y por hectárea se ha determinado las ecuaciones para determinar de forma directa el potencial energético de la biomasa a través de las ecuaciones de la tabla 5.

Se realizaron pruebas en laboratorio donde el promedio medido del PC es de 17,8 MJ kg<sup>-1</sup> (materia seca con 0% de humedad); también es posible calcular la energía potencial de la biomasa. Con este valor se obtienen valores aproximados que se muestran en la tabla 5.

La tabla 5 detalla el potencial energético de la biomasa contenida por árbol y por hectárea para cada parcela de paulonia estudiada. Como referencia general, que incluye a todos los individuos de la muestra, el potencial energético promedio obtenido por árbol en P1 fue 206 MJ árbol<sup>-1</sup> y 247 GJ ha<sup>-1</sup> y en P2 fue 349 MJ árbol<sup>-1</sup> y 274 GJ ha<sup>-1</sup>.

## DISCUSIÓN

### Cuantificación volumétrica de biomasa leñosa

#### Morfología del fuste

El factor de forma obtenido indica que esta especie tiende hacia una forma más bien cilíndrica, lo que concuerda con los resultados observados por otros autores (Ojeda, 1977; Zhao-Hua, Yao-Guo y Xin-Yu, 1986; Lombardi *et al.*, 2006; Servicios Geográficos y del Medio Ambiente [GEMA], 2011) que indica que el valor promedio del factor de forma utilizado en otras maderas tropicales y subtropicales es de alrededor de 0.70.

El análisis de volumen aparente en función del volumen real en un árbol de paulonia (Fig. 1) muestra su importancia debido a la sobreestimación de volumen por hectárea si sólo se midiera el volumen aparente.

Los resultados obtenidos en la tabla 2 muestran la diferencia entre el volumen aparente y el volumen real es importante (19.2%), pero esto es válido sólo para cultivos de un año, ya que se desconoce cómo evoluciona la oclusión de la madera en el tiempo. Por lo tanto, no fue posible contrastar estos resultados con cultivos de otras edades de paulonia en condiciones similares de sitio, ya que esta situación particular no se registra en la literatura y si bien existen plantaciones más antiguas en la zona, las plantaciones siguientes son de

TABLA 5. Ecuaciones y cuantificación de energía potencial por árbol y hectáreas para *Paulownia* spp.

| Parcelas | Ecuación por árbol (MJ árbol <sup>-1</sup> )    | Ecuación por superficie (GJ ha <sup>-1</sup> )   | Energía Potencial (MJ árbol <sup>-1</sup> ) | Energía Potencial (GJ ha <sup>-1</sup> ) |
|----------|---|--|---|--|
| P1       | = 20,919 DAP <sup>2</sup> - 410,11 DAP + 2171,2 | = 20,722 DAP <sup>2</sup> - 406,253 DAP + 2150.8 | 375,1                                       | 448,6                                    |
| P2       | = 6,392 DAP <sup>2</sup> - 25,297 DAP + 54,973  | = 6,855 DAP <sup>2</sup> - 25,06 DAP + 54,456    | 806,4                                       | 633,0                                    |



cuatro años de edad, y a pesar de que estas últimas ya no presentaban un volumen vacío, no se logró realizar un seguimiento año a año de la oclusión de este volumen vacío.

#### *Relación del DAP y volumen del fuste*

La ecuación que relaciona DAP y volumen del fuste muestra que existe una fuerte relación entre estos parámetros, tanto en P1 como en P2, obteniendo valores aceptables (rendimientos de volumen) para aplicar en estas plantaciones que se caracterizan por una baja variabilidad de DAP, existiendo una relación con tendencia a ser lineal entre DAP y volumen. Cabe señalar que no se encontraron ecuaciones similares en la literatura para esta especie.

Según Pond y Froese (2014) el fuste modelado por el DAP comparte fuertes similitudes con el modelado de la conicidad del árbol. Sin embargo, la principal diferencia es que en la aplicación de las ecuaciones de cono se conoce generalmente la altura del árbol, lo que proporciona un punto de datos adicional porque a la altura máxima de un árbol el diámetro debe ser cero. Aun así, Acker, Sabin, Ganio y Mckee (1998) señalan que utilizar el DAP como variable predictiva garantiza una desviación estándar baja principalmente en plantaciones y bosques adultos, ya que existe cierta uniformidad de los individuos en forma y DAP. De esta manera la ecuación de volumen basada en el DAP proporciona una herramienta sencilla para la estimación de volumen en la investigación de campo y cálculo comercial antes de la cosecha, lo que es ratificado por Gautman y Thapa (2007) en su estudio sobre *Populus* spp.

#### **Caracterización física de las astillas de madera**

El alto contenido de humedad de la madera de paulonia (58.6%) es un valor alto con respecto a los cultivos leñosos dendroenergéticos tradicionales (Baettig, Yañez y Albornoz, 2010; Sixto, Hernández, Ciria, Carrasco y Cañellas, 2010), siendo un valor que prácticamente no varía en P1 y P2. Prueba de esto es que el CV es de 4.3%. Este valor coincide con el estudio de Ciria (2011) quien señala que la humedad de esta especie está entre 50% y 75%.

La densidad de la madera obtenida de paulonia de 0,297 g cm<sup>-3</sup> que es similar a la estimada por Akyildiz y

Kol, (2009) de 0,272 g cm<sup>-3</sup> y a la de Sobhani, Khazaeian, Tabarsa y Shakeri (2011) que fue de 0,260 g cm<sup>-3</sup>. Es así como no hay que perder de vista que la ligereza de la madera de paulonia podría ser una ventaja importante, como material para la industria forestal, ya que es la especie que tiene la densidad más baja en comparación con otras plantaciones forestales productoras de madera (Akyildiz y Kol, 2009). Como ejemplo de especie de corta rotación está *Populus* spp. que tiene una densidad que varía entre 0,33 g cm<sup>-3</sup> y 0,370 g cm<sup>-3</sup>, dependiendo de la ubicación (Jovanovski, Robles y Davel, 2011; Díaz, Luna, Keil, Otaño y Peri, 2002).

#### **Caracterización energética de la biomasa leñosa**

El poder calorífico obtenido cumple con la normativa europea vigente ISO 18125 (ISO, 2017) para astillas de madera o biocombustibles sólidos.

El valor determinado es similar al obtenido por Muñoz (2011), que es de 18,0 MJ kg<sup>-1</sup> y levemente inferior al determinado por Lucas *et al.* (2010) quienes obtuvieron un 19,5 MJ kg<sup>-1</sup>. Según literatura, esta diferencia podría ser debida a diferentes contenidos de humedad de la madera más alto mientras más fresca sea la muestra, ya que con el aumento del contenido de humedad se produce una rápida pérdida de poder calorífico (Ince, 1977). Sin embargo, todos los resultados obtenidos en este estudio se consideran sobre una base anhidra, por lo tanto, las diferencias en el PC con respecto a otros autores son atribuibles a otras causas, ya que según lo señalado por Rodríguez-Rivas (2009), las especies individualmente muestran diferencias en la finalización de la actividad vegetativa, aparición de volátiles y la evolución de acuerdo a la temporada, es decir, variaciones fenológicas.

#### **Cuantificación de la biomasa leñosa y potencial energético**

##### *Determinación de biomasa*

La tabla 3 muestra una estimación de la producción anual de biomasa por hectárea. Sin embargo, no se recomienda proyectar estas cifras más allá de una rotación anual

debido a que sus tasas de crecimiento y/o incremento medio anual se desconocen.

Las ecuaciones ajustadas para la obtención de volumen aparente ( $m^3$ ) demuestran ser muy adecuadas y recomendables para su aplicación cultivos de rotación corta de paulonia en condiciones de sitio similares a los encontrados en las áreas de estudio.

En las rotaciones de un año de paulonia, la producción de biomasa contenida por hectárea es alta, basta comparar con otros estudios de otras especies en países como Inglaterra (Sustainable Energy Authority of Ireland [SEAI], 2016), en Alemania (Dallemand, Petersen y Karp, 2007) y en Italia (Di Nasso, Guidi, Ragaglini, Tozzini y Bonari, 2010) donde a un año de edad las plantaciones de corta rotación son cosechadas con rendimientos mucho menores a los obtenidos en este estudio. Por lo que, en términos generales, es recomendable la cosecha anual de paulonia bajo los rendimientos de biomasa obtenidos en este estudio. Además Dillen, Djomo, Al-Afas, Vanbeveren y Ceulemans (2013) señalan que los ciclos de rotación corta permiten mayores densidades de cultivo y, por lo tanto, mayores rendimientos de biomasa por unidad de superficie.

Aun así, para una cosecha de un cultivo de corta rotación, es necesario tener en cuenta la edad de las parcelas, la densidad de árboles en función de la parcela y la existencia de algún sistema de riego, por lo que para este estudio no es apropiado establecer un valor medio de producción de biomasa entre los dos tipos de cultivos estudiadas, pero además en P1 y P2 estas variables no reflejarían la condición buena o mala que presenta un sitio en particular para el cultivo de una especie. Si bien no se ha encontrado literatura de referencia para comparar valores de la misma edad de cultivo de esta especie existe un estudio realizado por Martínez-García *et al.* (2010) donde el contenido de biomasa para un cultivo de 17 meses de edad, con diferentes densidades de cultivo (1111 árboles  $ha^{-1}$  y 1666 árboles  $ha^{-1}$ ) pero sin riego, varió de 2,6 t  $ha^{-1}$  a 6,1 t  $ha^{-1}$  Di Nasso *et al.* (2010) realizaron un estudio para *Populus* con cosecha al año de edad alcanzando 9,9 t  $ha^{-1}$ , también en Inglaterra se evaluó una cosecha que se pro-

duce anualmente de *Salix* spp. obteniendo por hectárea de 10 t a 12 t (SEAI, 2016), estando estas experiencias significativamente por debajo de los valores obtenidos en este estudio. Zhao-Hua *et al.* (1986) señalan que en condiciones normales con 1000 plantas  $ha^{-1}$  y 2000 plantas  $ha^{-1}$  y sin sistema de riego un cultivo de paulonia de 10 años de edad alcanza entre 96 kg árbol $^{-1}$  y 160 kg árbol $^{-1}$  respectivamente y en condiciones óptimas este mismo volumen se puede lograr en cinco o seis años. Otros autores (Akyildiz y Kol, 2009) señalan que un árbol de paulonia podría producir un metro cúbico de madera en cinco a siete años de edad del cultivo.

Es así como desde el punto de vista de densidad del cultivo esta especie tiene gran influencia en la tasa de acumulación de biomasa por hectárea, y por ende, se podría pensar que una alta densidad de cultivo resultaría en una mayor cantidad de biomasa leñosa, sin embargo un exceso de árboles por hectárea puede provocar una disminución en el crecimiento mediante el aumento de la competencia por luz, agua y nutrientes (Baettig, 2010). Por otra parte, P1 y P2 no corresponden a cultivos de alta densidad que según Sixto *et al.* (2010) se encuentran entre 5000 plantas  $ha^{-1}$  y 10 000 plantas  $ha^{-1}$ , por lo que no existiría un problema de crecimiento de las plántulas por competencia, siendo imposible atribuir la diferencia de contenido de biomasa por hectárea a este factor.

Sin embargo, P1 no presenta riego y P2 presenta riego a manta, lo que podría explicar la mayor producción anual de biomasa por superficie de P2 (47,6 t  $ha^{-1}$ ) con respecto a P1 (27,3 t  $ha^{-1}$ ) a pesar de que P2 cuenta con 411 árboles menos por hectárea que P1, lo que es corroborado por otros autores (Baettig *et al.*, 2010; Sixto *et al.*, 2010; Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [IDAE], 2008) donde la existencia de riego de cualquier tipo fue fundamental en la mayor producción de biomasa con respecto a parcelas donde no se contempló el riego.

#### *Determinación del potencial energético*

En la tabla 5 se detalla el potencial energético de la biomasa contenida por árbol y por hectárea para ambos tipos



de parcelas de paulonia estudiada (P1 y P2). No existen datos por árbol, pero existen algunos estudios con especies similares por superficie, donde Rončević *et al.* (2013) ha observado un potencial energético de 364 GJ ha<sup>-1</sup> de *Populus* spp. y 160 GJ ha<sup>-1</sup> para *Robinia* spp. (ONU, 2011), siendo más altos los valores encontrados en P1 y P2 (448,6 GJ ha<sup>-1</sup> y 663 GJ ha<sup>-1</sup> respectivamente). Además, la densidad de cultivo en el estudio de *Populus* spp., citado anteriormente, duplica la densidad de árboles por hectárea de la más alta densidad de las parcelas en estudio (P1: 1196 árboles ha<sup>-1</sup>).

Así, se observa que de los cultivos paulonia de un año de edad en condiciones mediterráneas tienen un potencial de energía mayor que los resultados de *Populus* spp. y/o plantaciones de *Robinia* spp., que son especies reconocidas por su uso energético (Perlack y Geyer, 1987; Klačnjak y Kopitovič, 1999; Dickmann, 2006; Christersson, 2010; Dillen *et al.*, 2013).

## CONCLUSIONES

Paulonia es una especie arbórea que presenta una excelente rectitud de fuste según el factor de forma obtenido. Sin embargo, en su interior, en su sección medular, su fuste es hueco al menos durante su primer año, por lo que se debe conocer el volumen que este abarca para estimar la biomasa real producida por hectárea.

Los resultados de este estudio permiten llegar a la conclusión de que a nivel de producción, y basándose en otros cultivos energéticos, la selección de paulonia es una alternativa viable en rotaciones cortas para fines energéticos en condiciones mediterráneas.

Su crecimiento rápido, y sus propiedades físicas y energéticas observadas, pueden hacer que esta especie en regímenes de corta rotación resulte muy recomendable como biomasa para combustible.

Para futuras investigaciones, los autores sugieren que se requiere un estudio detallado para determinar la oclusión que puede afectar la estimación de biomasa en plantaciones de corta rotación. Además del análisis de los posibles efectos de la variabilidad genética del material en los resultados de crecimiento en volumen y producción de biomasa.

## REFERENCIAS

- Acker, S. A., Sabin, T.E., Ganio, L. M. y McKee, W. A. (1998). Development of old-growth structure and timber volume growth trends in maturing Douglas-fir stands. *Forest Ecology and Management*, 104, 265-280.
- Akyildiz, M. H. y Kol, H. S. (2009). Some technological properties and uses of paulownia (*Paulownia tomentosa* Steud) wood. *Journal of Environmental Biology*, 31, 351-355.
- Archontoulis, S. V. (2011). *Analysis of growth dynamics of Mediterranean bioenergy crops*. (Disertación doctoral). Wageningen University, Wageningen, Países Bajos. Recuperado de <http://edepot.wur.nl/177970>
- Asociación Española de Normalización y Certificación [Aenor]. 2016a. UNE-EN-ISO 18134-1. Biocombustibles sólidos. Métodos para determinar el contenido de humedad. Método de secado del horno.
- Baettig, R., Yañez, M. y Albornoz, M. (2010). Cultivos dendroenergéticos de híbridos de álamo para la obtención de biocombustibles en Chile: estado del arte. *Bosque*, 31(2), 89-99. doi: 10.4067/S0717-92002010000200002
- Caparros S., M. J. Díaz, J. Ariza, F. López y Jiménez, L. (2008). New perspectives for Paulownia fortunei L. valorisation of the autohydrolysis and pulping processes. *Bioresource Technology*, 99, 741-749. doi: 10.1016/j.biortech.2007.01.028
- Christersson, L. (2010). Wood production potential in poplar plantations in Sweden. *Biomass and Bioenergy*, 34(9), 1289-1299. doi: 10.1016/j.biombioe.2010.03.021
- Ciria, M. (2011). Desarrollo de los cultivos energéticos leñosos en España. *Vida Rural*, 329, 10-5.
- Cotevisa. (2010). *Paulownia*. Recuperado de <http://www.cotevisa.com/productos/paulownia>
- Dallemand, J. F., Petersen, J. E. y Karp, A. (2007). *Short Rotation Forestry, Short Rotation Coppice and perennial grasses in the European Union. Agro-environmental aspects, present use and perspectives*. Harpenden, Reino Unido: Joint Research Centre..
- Di Nasso N., Guidi, W., Ragolini, G., Tozzini, C. y Bonari, E. (2010). Biomass production and energy balance of a 12-year-old short-rotation coppice poplar stand under different cutting cycles. *GCB Bioenergy*, 2, 89-97.

- Díaz, B. J., Luna, L., Keil, G. D., Otaño, M. E. y Peri, P. L. (2002). Tratamiento de la madera de *Populus nigra* CV. Italica ante la preservación con creosota y CCA. *Investigaciones Agrarias y Sistemas Forestales*, 11(2), 325–338.
- Dickmann, D. I. (2006). Silviculture and biology of short-rotation woody crops in temperate regions: then and now. *Biomass and Bioenergy*, 30, 696–705. doi: 10.1016/j.biombioe.2005.02.008
- Dillen, S. Y., Djomo, S. N., Al-Afas, N., Vanbeveren, S. y Ceulemans, R. (2013). Biomass yield and energy balance of a short-rotation poplar coppice with multiple clones on degraded land during 16 years. *Biomass and Bioenergy*, 56, 157–165. doi: 10.1016/j.biombioe.2013.04.019
- Gautam, S. K. y Thapa, H. B. (2007). Volume equation for *Populus deltoides* plantation in western Terai of Nepal. *Banko Janakari*, 17(2), 70-73.
- Gómez, M. (2008). Sistema de generación eléctrica con pila de combustible de óxido sólido alimentado con residuos forestales y su optimización. Disertación doctoral no publicada, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid, España.
- Hapla, F. y Saborowski, J. (1984). Überlegungen zur wahl des stichprobenumfangs bei untersuchungen der physikalischen und technologischen holzeigenschaften. *Forstarchiv*, 55(4), 135-138.
- Huber, F. (1828). Hilfstabellen für bedienstete des forst und baufachs und auch für ökonomen zur leichten und schnellen bestimmung des massengehaltes roher holzstäme. En H Kramer y A. Akca. *Leitfaden für dendrometrie und bestandesinventur*. Göttingen, Alemania: Sauerländer.
- Ince, P. J. (1977). *Estimating effective heating value of wood or bark fuels at various moisture contents*. Madison, Wisconsin: FPL 13. Forest Products Laboratory. U.S. Department of Agriculture.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [IDAE]. (2008). Experiencias con biomasa agrícola y forestal para uso energético. Madrid, España: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España.
- International Organization for Standardization [ISO]. 2017. ISO 18125. Biocombustibles sólidos. Método de determinación del poder calorífico
- Jovanovski, A., Robles, G. y Davel, M. (2011). *Propiedades físicas de la madera de Populus spp. proveniente de cortinas forestales plantadas en Esquel, Chubut, Argentina*. Documento presentado en el simposio de las Jornadas de Salicáceas. Neuquén, Argentina.
- Klašnja, B. y Kopitovič, Š. (1999). Quality of wood of some willow and *Robinia* clones as fuelwood. *Journal Drevársky Výskum*, 44(2), 9-18.
- Kollmann, F. (1959). *Tecnología de la madera y sus aplicaciones (Tomo I)*. Madrid, España: Instituto Forestal de Investigaciones, Experiencias y Servicios de la Madera.
- Lombardi, I. y Huerta, P. (2006). Controlando la Caoba. *Actuallidad Forestal Tropical*, 14(3), 5-9.
- Lucas, M., Martínez, E., García-Morote, F., López-Serrano, F. y Andrés-Abellán, M., Candel, D. y del Cerro, A. (2010). El cultivo de *Paulonia* (*Paulownia elongata* x *fortunei*) para la obtención de madera y biomasa en Castilla-La Mancha: Primeros resultados. *Foresta*, 47/48, 106-110.
- Martínez García, E., M. Lucas, M. Andrés, F. López Serrano, F. García Morote y A. Del Cerro. (2010). Aprovechamiento energético de *Paulownia* spp. en el ámbito mediterráneo. *Ciencia Técnica* 102, 5-11.
- Mogliá, J. G., Giménez, A. M. y Bravo, S. (2007). *Macroscopía de madera: orientada a los estudiantes de carpintería (Tomo II)*. Santiago del Estero, Argentina: Universidad Nacional de Santiago del Estero.
- Muñoz, F. (2011). Experiencias en plantaciones dendroenergéticas. Documento presentado en el seminario La energía del futuro viene de los bosques. Talca, Chile.
- Ojeda, W. (1977). *Inventario forestal de los bosques de la comunidad de Iruquis*. Perú: Ministerio de Agricultura de Perú.
- Olesen, P. O. (1971). *The water displacement method*. Ciudad no disponible: The Royal Veterinary and Agricultural University of Copenhagen.
- Organización de las Naciones Unidas [ONU] (2011). *The European forest sector outlook study II 2010 – 2030*. Geneva timber and forest special paper ECE/TIM/SP/28. Ginebra, Suiza: ONU.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2012). *Resultado de Río+20 en medidas prácticas dendroenergía para un futuro sostenible*.



- Trabajo presentado en el Comité forestal, 21° período de sesiones. Roma, Italia.
- Perlack, R. y Geyer, W. (1987). Wood energy plantation economics in the Great Plains. *Journal of Energy Engineering*, 113(3), 92-101. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9402(1987)113:3(92)
- Pond, N. C. y Froese, R. E. (2014). Evaluating published approaches for modelling diameter at breast height from stump dimensions. *Forestry*, 87(5), 683-696.
- Puya, N., Tabara, D., Bartroli-Molins, J., Bartroli-Almera, J. y Rieradevall, J. (2008). Integrated assessment of forest bioenergy systems in Mediterranean basin áreas: The case of Catalonia and the use of participatory IA-focus groups. *Renewable and Sustainable Energy* 12, 1451-1464. doi: 10.1016/j.rser.2007.01.017
- Reeg, T., Bemann, A., Konold, W., Murach, D. y Spiecker, H. (2009). Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen. *Wiley-VCH, Weinheim*, 355 p.
- Rodríguez-Rivas, A. (2009). Estudios de valoración energética de combustibles forestales para la prevención de incendios forestales en la Sierra de la Primavera (Jalisco, México) mediante calorimetría de combustión y ensayos de inflamabilidad. Santiago, España: Santiago de Compostela: Universidade Servizo de Publicacións e Intercambio Científico.
- Rončević, S., Andrašev, S., Ivanišević, P., Kovačević, B. y Klačnja, B. (2013). Biomass production and energy potential of some eastern cottonwood (*Populus deltoides* Bartr. Ex Marsh.) clones in relation to planting spacing. *Šumarski list*, 1-2, 33-42.
- Sachs, L. (1984). *Angewandte Statistik* (Practical statistics). Berlin, Heidelberg, Nueva York y Tokio: Springer Verlag.
- Schildbach, M., Grünwald, H., Wolf, H. y Schneider, B. (2009). *Begründung von Kurzumtriebsplantagen: Baumartenwahl und Anlageverfahren. Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Servicios Geográficos y del Medio Ambiente [GEMA] (2011). *EIA prospección sísmica 3d y perforación de veintiún (21) pozos exploratorios*. Ciudad no disponible: GEMA.
- Siostrzonek, E. (1958). Radialzuwachs und Flächenzuwachs. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 77(7-8), 237-254. doi: 10.1007/BF01821397
- Sixto, H., Hernández, M. J., Ciria, M. P., Carrasco, J. E. y Cañellas, I. (2010). *Manual de cultivo de Populus spp. para la producción de biomasa con fines energéticos*. Madrid, España: Instituto Nacional de Investigación Agraria.
- Sixto, H., Hernández, M.J., Barrio, M., Carrasco, J. y Cañellas, I. (2007). Plantaciones del género *Populus* para la producción de biomasa con fines energéticos: revisión. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 16(3), 277-294.
- Sobhani, M., Khazaeian, A., Tabarsa, T. y Shakeri, A. (2011). Evaluation of physical and mechanical properties of *Paulownia* wood core and fiberglass surfaces. *Sandwich Panel Key Engineering Materials*, 471, 85-90.
- Spinelli, R. y Nati, C. (2007). *Woody biomass production from agricultural land in Italy*. Documento presentado en el IEA Bioenergy Task 30 Workshop. Guelph, Ontario, Canada.
- Sustainable Energy Authority of Ireland [SEAI] (2016). *Bioenergy supply in Ireland 2015 – 2035*. Recuperado de <https://www.seai.ie/resources/publications/Bioenergy-Supply-in-Ireland-2015-2035-Summary-Report.pdf>
- Zhao-Hua, Z., Yao-Guo, X. y Xin-Yu, L. (1986). *Paulownia in China: cultivation and utilization*. China: The Chinese Academy of Forestry Beijing-Asian Network for Biological Sciences and International Development Research Centre.

Manuscrito recibido el 4 de agosto de 2016.  
Aceptado el 28 de mayo de 2017.

Este documento se debe citar como:  
Fernández-Puratich, H., Oliver-Villanueva, J. V., Lerma-Arce, V., García, M. D. y Raigón, M. D. (2017). Estudio de *Paulownia* spp. como cultivo forestal de rotación corta para fines energéticos en condiciones mediterráneas. *Madera y Bosques*, 23(3), 15-27. doi: 10.21829/myb.2017.2331416