



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y DE MATERIALES

INSTITUTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA

PROGRAMA DE DOCTORADO EN  
INGENIERÍA Y PRODUCCIÓN INDUSTRIAL

**VALORIZACIÓN INTEGRAL DE LA BIOMASA LEÑOSA  
AGROFORESTAL A LO LARGO DEL GRADIENTE  
ALTITUDINAL EN CONDICIONES MEDITERRÁNEAS**

**TESIS DOCTORAL**

**Autor:**

**D. HARALD FERNÁNDEZ PURATICH**

**Directores:**

**D. Dr. ÁNGEL PÉREZ-NAVARRO GÓMEZ**

**D. Dr. JOSÉ VICENTE OLIVER VILLANUEVA**

Valencia, Noviembre 2012



## **HIMNO AL ÁRBOL**

*Árbol hermano, que clavado  
por garfios pardos en el suelo,  
la clara frente has elevado  
en una intensa sed de cielo;*

[...]

*Árbol diez veces productor:  
el de la poma sonrosada,  
el del madero constructor,  
el de la brisa perfumada,  
el del follaje amparador;*

*el de las gomas suavizantes  
y las resinas milagrosas,  
pleno de brazos agobiantes  
y de gargantas melódicas:*

*hazme en el dar un opulento  
¡para igualarte en lo fecundo,  
el corazón y el pensamiento  
se me hagan vastos como el mundo!*

*Y todas las actividades  
no lleguen nunca a fatigarme:  
¡las magnas prodigalidades  
salgan de mí sin agotarme!*

[...]

**Gabriela Mistral**



*Dedicado a*

*Mi mujer Natalia, mi  
amada compañera de  
aventuras y desventuras,  
gracias por el incondicional  
apoyo que siempre me has  
brindado.*

*A mis dos pequeños, mi  
Alonso y mi Matilda que  
son mi vida, mi razón de  
existir, los amo por sobre  
todo.*



## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todos quienes de una u otra manera han colaborado y me han apoyado en el desarrollo de esta tesis.

En primer lugar a mis directores de tesis: Prof. Dr. Ángel Pérez-Navarro por el apoyo que me entregó desde el primer momento y por su disposición a colaborar en mi trabajo, al Prof. Dr. José Vicente Oliver de quién estoy muy agradecido por su gran respaldo tanto el plano académico como por su preocupación de mi bienestar personal.

A María Dolores Raigón y María Dolores García del Departamento de Química del ETSIAMN de la Universidad Politécnica de Valencia quienes me facilitaron sus laboratorios y por su ayuda y orientación en el trabajo realizado en sus dependencias.

Al Laboratorio Agroalimentario de la Generalitat Valenciana por su ayuda en el análisis químico de mis muestras.

A Rogelio Iranzo y María García de CO2DECIDE por dejar a mi disposición sus cultivos energéticos para realizar mis ensayos.

A Raúl, Mireya, María, Luis, Guillermo, Nuria, Salvador sin su ayuda en campo esta tesis no habría sido posible.

Por último, quiero agradecer al Gobierno de Chile y su programa BECASCHILE del cual he sido beneficiario para la realización de esta tesis doctoral.



## RESUMEN

La biomasa leñosa como recurso material o bioenergético varía principalmente según especie, condiciones ambientales que influyen en su producción y dispersión en el territorio. La estimación de la disponibilidad y aptitud de este recurso es hoy en día crucial para el desarrollo sostenible del sector agroforestal y, en concreto, de la cadena de valor monte-industria-consumo. Debido a la dispersión de esta fuente de materia prima en el territorio y a los altos costes logísticos que ello implica, el desarrollo de sistemas de valor en base a la biomasa de origen forestal y/o agrícola pasa por el desarrollo de sistemas de gestión y valorización integral de estos recursos a nivel local, bien para aprovechamiento como materia prima para la industria del tablero o como fuente de bioenergía.

Tomando en cuenta esta situación de partida, esta tesis tiene como principal objetivo desarrollar un análisis de valorización integral de la biomasa leñosa en condiciones mediterráneas a lo largo del gradiente altitudinal en el ejemplo territorial de la Comunidad Valenciana (España), integrando una especie forestal representativa (*Quercus ilex* L.), un cultivo energético de futuro (*Paulownia spp.*) y los tres cultivos leñosos agrícolas más importantes a nivel regional (*Citrus sinensis*, *Olea europaea* y *Prunus amygdalus*). Para alcanzar este objetivo, el trabajo de investigación se centra en la caracterización de las propiedades morfológicas, físicas, químicas y energéticas de la biomasa leñosa procedente del aprovechamiento de estas especies. En base a un muestreo representativo los resultados a obtener sirven para poder determinar de forma cuantitativa y cualitativa las aptitudes y limitaciones que estos tipos de biomasa presentan en el

sector energético como biocombustible sólidos y en el sector de la industria del tablero como materia prima para tableros de partículas.

También, por medio de mediciones directas en las parcelas de estudio seleccionadas, se estiman parámetros como el volumen ( $m^3$ ), biomasa (kg) y potencial energético (MJ) de estas especies tanto por árbol como por hectárea con el fin de desarrollar modelos de predicción de estos parámetros a utilizar en condiciones de sitio similares a las estudiadas.

Los principales resultados de los análisis realizados para las diferentes especies demuestran que la biomasa de todas las especies estudiadas es perfectamente apta para su uso bioenergético, tanto en astilla como para biocombustibles sólidos elaborados (pellets y briquetas), con la excepción de la madera de naranjo que presenta algunas limitaciones para la fabricación de pellets. En cuanto a la adecuación de las principales características analizadas a los requisitos técnicos en la industria del tablero, se puede concluir que todas las especies son aptas para su integración en los procesos de desintegración y fabricación de tableros aglomerados de partículas, teniendo en cuenta que siempre se deberán considerar como una carga adicional a la base de materia prima que representa la madera de coníferas para la producción industrial de estos productos.

## **RESUM**

La biomassa llenyosa com a recurs material o bioenergètic varia principalment segons espècie, condicions ambientals que influeixen en la seua producció i dispersió en el territori. L'estimació de la disponibilitat i aptitud d'aquest recurs és hui en dia crucial per al desenrotllament sostenible del sector agroforestal i, en

concret, de la cadena de valor bosc – indústria - consum. A causa de la dispersió d'esta font de matèria primera en el territori i als alts costos logístics que això implica, el desenrotllament de sistemes de valor basant-se en la biomassa d'origen forestal i/o agrícola passa pel desenrotllament de sistemes de gestió i valoració integral d'estos recursos a nivell local, bé per aprofitament com matèria primera per a la indústria del tauler o com a font de bioenergia.

Tenint en compte esta situació de partida, esta tesi té com a principal objectiu desenrotllar un anàlisi de valoració integral de la biomassa llenyosa en condicions mediterrànies al llarg del gradient altitudinal en l'exemple territorial de la Comunitat Valenciana (Espanya), integrant una espècie forestal representativa (*Quercus ilex* L.), un cultiu energètic de futur (*Paulownia spp.*) i els tres cultius llenyosos agrícoles més importants a nivell regional (*Citrus sinensis*, *Olea europaea* i *Prunus amygdalus*). Per aconseguir este objectiu, el treball d'investigació es centra en la caracterització de les propietats morfològiques, físiques, químiques i energètiques de la biomassa llenyosa procedent de l'aprofitament d'estes espècies. Basant-se en un mostratge representatiu els resultats a obtindre serveixen per a poder determinar de forma quantitativa i qualitativa les aptituds i limitacions que estos tipus de biomassa presenten en el sector energètic com a biocombustible sòlids i en el sector de la indústria del tauler com a matèria primera per a taulers de partícules.

També, per mitjà de mesuraments directes en les parcel·les d'estudi seleccionades, s'estimen paràmetres com el volum ( $m^3$ ), biomassa (kg) i potencial energètic (MJ) d'estes espècies tant per arbre com per hectàrea a fi de desenrotllar models de predicció d'estos paràmetres a utilitzar en condicions de lloc semblants a les estudiades.

Els principals resultats de les anàlisis realitzats per a les diferents espècies demostren que la biomassa de totes les espècies estudiades és perfectament apta per al seu ús bioenergètic, tant en estella com per a biocombustibles sòlids elaborats (pellets i briquetes), amb l'excepció de la fusta de taronger que presenta algunes limitacions per a la fabricació de pellets. En quant a l'adequació de les principals característiques analitzades als requisits tècnics en la indústria del tauler, es pot concloure que totes les espècies són aptes per a la seua integració en els processos de desintegració i fabricació de taulers aglomerats de partícules, tenint en compte que sempre s'hauran de considerar com una càrrega addicional a la base de matèria primera que representa la fusta de coníferes per a la producció industrial d'estos productes.

#### **ABSTRACT**

The woody biomass as material resource or bioenergy mainly varies according to species, environmental conditions that influence their production and dispersion in the territory. The estimate of the availability and suitability of this resource is now critical for the sustainable development of agroforestry and, specifically, of the value chain forest-industry-consumer. Due to the dispersion of this source of raw material in the territory and high logistics costs that entails, developing value systems based on biomass from forestry and / or agricultural through the development of management systems and comprehensive recovery of these resources locally, both for use as raw material for the industry board or as a source of bioenergy.

Considering this starting point, this thesis has as main objective to develop a Integral valuation analysis of woody biomass under Mediterranean conditions along the altitudinal gradient in the territorial example of Valencia (Spain), integrating a forest species representative (*Quercus ilex* L.), an energy crop of future (*Paulownia spp.*) and the three most important agricultural woody crops at regional level (*Citrus sinensis*, *Olea europaea* and *Prunus amygdalus*). To achieve this objective, the research is focused on the characterization of the morphological, physical, chemical and energy from woody biomass from the use of these species. Based on a representative sample to obtain results used to determine in a quantitative and qualitative the suitabilities and limitations that these types of biomass present in the energy sector as a solid biofuel and sector board industry as raw material for chipboard.

Also, through direct measurements in the study plots selected parameters are estimated as the volume (m<sup>3</sup>), biomass (kg) and potential energy (MJ) of both tree species per hectare as in order to develop models of these prediction of parameters used in conditions similar to those studied site.

The main results of the analysis for the different species show that the biomass of all species is perfectly suited for use bioenergy, both in chips as in processed solid biofuels (pellets and briquettes) with the exception of the wood of orange tree that has some limitations for the manufacture of pellets. As for the adequacy of the main characteristics analyzed technical requirements in the industry board, it can be concluded that all species are suitable for integration into the manufacturing processes of disintegration and particle chipboard, always taking into account that should be considered as an additional burden on the basis of raw material representing of conifers wood for the industrial production of these products.



## INDICE CONTENIDOS

Capítulo	Pág
<b>1. INTRODUCCION</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Justificación y antecedentes</b>	<b>3</b>
1.1.1 Definición de biomasa agroforestal	3
1.1.2 Principales ventajas e inconvenientes de la biomasa como fuente de energía renovable	4
1.1.3 Situación actual del aprovechamiento de la biomasa agroforestal como fuente de energía renovable	7
1.1.4 Perspectivas de futuro para el aprovechamiento sostenible y valorización bioenergética de la biomasa agroforestal	26
1.1.5 Programas de implementación de proyectos y conocimiento científico de biomasa agroforestal como fuente de energía	40
<b>1.2 Estado del arte</b>	<b>48</b>
1.2.1 Clasificación de recursos biomásicos de origen agrícola y forestal en condiciones mediterráneas	48
1.2.2 Caracterización morfológica de la biomasa de origen agroforestal	51
1.2.3 Caracterización física de la biomasa de origen agroforestal	56
1.2.4 Caracterización química de la biomasa de origen agroforestal	60

1.2.5	Caracterización energética de la biomasa de origen agroforestal	65
1.2.6	Cálculo de existencias y posibilidades de biomasa agroforestal	69
1.2.7	Experiencias sobre planificación y gestión de la biomasa de base agroforestal	76
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>88</b>
2.1	Objetivo general	88
2.2	Objetivos específicos	88
<b>3.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>92</b>
3.1	Selección de especies	92
3.1.1	Estudio previo de distribución de especies leñosas en el medio forestal y agrícola	92
3.1.2	Especies leñosas seleccionadas	96
3.2	Diseño muestral de áreas y toma de muestras	103
3.2.1	Selección de parcelas	104
3.2.2	Selección de individuos	106
3.2.3	Toma de muestras	108
3.2.4	Recolección de muestras	109

<b>3.3 Caracterización morfológica</b>	112
3.3.1 Porcentaje de albura y duramen	112
3.3.2 Porcentaje de corteza	113
<b>3.4 Caracterización física de las astillas</b>	115
3.4.1 Determinación de densidad	115
3.4.2 Determinación de la humedad	117
<b>3.5 Caracterización química de las astillas</b>	120
3.5.1 Determinación de la materia seca	121
3.5.2 Mineralización y determinación del contenido en cenizas	122
3.5.3 Análisis elemental	124
3.5.4 Análisis secundario	128
<b>3.6 Caracterización energética de las astillas</b>	133
3.6.1 Poder calorífico	134
3.6.2 Cenizas	137
3.6.3 Volátiles	138
<b>3.7 Caracterización volumétrica de la biomasa aérea</b>	140
3.7.1 Relación diámetro y volumen fustal	140
3.7.2 Clases diamétricas	141

3.7.3 Morfología en fuste	142
3.7.4 Determinación de volumen de ramas y copa	143
3.7.5 Relación volumen de copa y volumen fustal	144
3.7.6 Estimación de un modelo de predicción de volumen en ramas	144
<b>3.8 Cuantificación biomásica y energética potencial por especie</b>	146
3.8.1 Determinación del peso por árbol y toneladas por hectárea	146
3.8.2 Determinación del potencial energético por árbol y superficie	146
<b>3.9 Análisis de la astilla</b>	148
3.9.1 Tableros de partículas	148
3.9.2 Biocombustibles sólidos: pellets	148
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	151
<b>4.1 Caracterización morfológica</b>	151
4.1.1 Especie forestal mediterránea	151
4.1.2 Cultivo energético leñoso	153
4.1.3 Especies agrícolas leñosas	154
<b>4.2 Caracterización física</b>	160

4.2.1 Especie forestal mediterránea	160
a) <i>Humedad</i>	160
b) <i>Densidad</i>	161
4.2.2 Cultivo energético leñoso	162
a) <i>Humedad</i>	162
b) <i>Densidad</i>	163
4.2.3 Especies agrícolas leñosas	164
a) <i>Humedad</i>	164
b) <i>Densidad</i>	167
<b>4.3 Características químicas</b>	<b>171</b>
4.3.1 Especie forestal mediterránea	172
a) <i>Análisis elemental</i>	172
b) <i>Análisis secundario</i>	173
4.3.2 Cultivo energético leñoso	174
a) <i>Análisis elemental</i>	174
b) <i>Análisis secundario</i>	175
4.3.3 Especies agrícolas leñosas	176
a) <i>Análisis elemental</i>	176
b) <i>Análisis secundario</i>	177
<b>4.4 Características energéticas de la biomasa</b>	<b>178</b>
4.4.1 Especie forestal mediterránea	178
a) <i>Poder calorífico</i>	178
b) <i>Porcentaje de cenizas</i>	179

c) <i>Materia volátil</i>	181
4.4.2 Cultivo energético leñoso	181
a) <i>Poder calorífico</i>	182
b) <i>Porcentaje de cenizas</i>	183
c) <i>Materia volátil</i>	184
4.4.3 Especies agrícolas leñosas	185
a) <i>Poder calorífico</i>	185
b) <i>Porcentaje de cenizas</i>	188
c) <i>Materia volátil</i>	190
<b>4.5 Cuantificación volumétrica</b>	192
4.5.1 Especie forestal mediterránea	192
a) <i>Determinación clases diamétricas y altura de fuste</i>	192
b) <i>Determinación del factor de forma</i>	195
c) <i>Determinación volumen fustal</i>	197
d) <i>Relación diámetro y volumen fustal</i>	198
4.5.2 Cultivo energético leñoso	199
a) <i>Determinación clases diamétricas</i>	199
b) <i>Determinación del factor de forma</i>	201
c) <i>Análisis del volumen aparente versus volumen real</i>	202
d) <i>Relación entre diámetro y volumen fustal aparente</i>	204
e) <i>Determinación del volumen en diferentes zonas geográficas de la Comunidad Valenciana</i>	206
4.5.3 Especies agrícolas leñosas	209
a) <i>Determinación de las clases diamétricas del fuste</i>	209
b) <i>Determinación factor de forma</i>	212

c) <i>Determinación volumen fustal</i>	214
d) <i>Relación diámetro y volumen fustal</i>	215
e) <i>Determinación clases diamétricas en ramas</i>	218
f) <i>Función de volumen en ramas</i>	220
g) <i>Determinación del volumen de copa</i>	221
h) <i>Relación del volumen del fuste y volumen de copa</i>	223
<b>4.6 Cuantificación biomásica y energética</b>	225
4.6.1 Especie forestal mediterránea	225
a) <i>Determinación del peso por árbol y toneladas por hectárea</i>	225
b) <i>Determinación del potencial energético por árbol y superficie</i>	227
4.6.2 Cultivo energético leñoso	230
a) <i>Determinación del peso por árbol y toneladas por hectárea</i>	230
b) <i>Determinación del potencial energético potencial por árbol y superficie</i>	233
4.6.3 Especies agrícolas leñosas	235
a) <i>Determinación del peso por árbol y toneladas por hectárea</i>	235
b) <i>Determinación del potencial energético por árbol y superficie</i>	242
<b>4.7 Análisis Cualitativo del material</b>	250
4.7.1 Cumplimiento de requisitos cualitativos para tableros de partículas	250
4.7.2 Cumplimiento de requisitos cualitativos para biocombustible sólidos	251

<b>5. CONCLUSIONES</b>	255
<b>6. BIBLIOGRAFIA</b>	266
Escrita	266
Internet	290
<b>ANEXOS</b>	

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Distribución del uso energético de energías renovables en España	21
Tabla 2	Producción potencial de biomasa en Europa 2010 -2030	31
Tabla 3	Variación estacional del contenido de humedad especies forestales (%)	57
Tabla 4	Porcentaje de participación de algunos componentes químicos en coníferas y latifoliadas	62
Tabla 5	Composición química de especies forestales y arbustivas mediterráneas	63
Tabla 6	Poder calorífico superior (PCS) para especies arbóreas de clima Mediterráneo	66
Tabla 7	Contenido de cenizas de especies forestales y arbustos mediterráneos	67
Tabla 8	Materia volátil en cultivos agrícolas y en follaje de una especie forestal	68
Tabla 9	Porcentaje de superficie ocupada por especies forestales en la Comunidad Valenciana	93
Tabla 10	Distribución de la superficie de cultivos agrícolas leñosos por CC. AA.	95
Tabla 11	Distribución de la superficie de los cultivos agrícolas leñosos seleccionados en la región de estudio.	102
Tabla 12	Caracterización morfológica del fuste de <i>Quercus ilex</i>	152
Tabla 13	Caracterización morfológica del fuste de <i>Paulownia spp.</i>	153
Tabla 14	Caracterización morfológica en ramas con diámetro < a 7,0 cm de <i>Citrus sinensis</i>	155

Tabla 15	Caracterización morfológica en ramas con diámetro < a 7,0 cm de <i>Olea europaea</i>	155
Tabla 16	Caracterización morfológica en ramas con diámetro < a 7,0 cm <i>Prunus amygdalus</i>	155
Tabla 17	Caracterización morfológica en ramas con diámetro ≥ a 7,0 cm de <i>Citrus sinensis</i>	158
Tabla 18	Caracterización morfológica en ramas con diámetro ≥ a 7,0 cm <i>Olea europaea</i>	158
Tabla 19	Contenido de humedad, en porcentaje, en fuste de <i>Quercus ilex</i>	160
Tabla 20	Densidad básica (g/cm <sup>3</sup> ) en fuste de <i>Quercus ilex</i>	161
Tabla 21	Densidad normal y anhidra (g/cm <sup>3</sup> ) en fuste de <i>Quercus ilex</i>	161
Tabla 22	Contenido de humedad, en porcentaje, en fuste de <i>Paulownia spp.</i>	162
Tabla 23	Densidad básica (g/cm <sup>3</sup> ) en fuste de <i>Paulownia spp.</i>	163
Tabla 24	Densidad normal y anhidra (kg/m <sup>3</sup> ) en fuste de <i>Paulownia spp.</i>	163
Tabla 25	Contenido de humedad, en porcentaje, en ramas de <i>Citrus sinensis</i>	164
Tabla 26	Contenido de humedad, en porcentaje, en ramas <i>Olea europaea</i>	164
Tabla 27	Contenido de humedad, en porcentaje, en ramas <i>Prunus amygdalus</i>	165
Tabla 28	Densidad básica (g/cm <sup>3</sup> ) en ramas de <i>Citrus sinensis</i>	167
Tabla 29	Densidad básica (g/cm <sup>3</sup> ) en ramas de <i>Olea europaea</i>	167
Tabla 30	Densidad básica (g/cm <sup>3</sup> ) en ramas de <i>Prunus amygdalus</i>	167

Tabla 31	Densidad normal y anhidra (g/cm <sup>3</sup> ) en ramas de <i>Citrus sinensis</i>	169
Tabla 32	Densidad normal y anhidra (g/cm <sup>3</sup> ) en ramas de <i>Olea europaea</i>	169
Tabla 33	Densidad normal y anhidra (g/cm <sup>3</sup> ) en ramas de <i>Prunus amygdalus</i>	170
Tabla 34	Concentración de los elementos principales en <i>Quercus ilex</i> (%)	172
Tabla 35	Estadísticas descriptivas, en mg/Kg, de los componentes secundarios que podemos encontrar en <i>Quercus ilex</i> .	173
Tabla 36	Concentración de los elementos principales en árboles enteros de <i>Paulownia spp.</i>	174
Tabla 37	Estadísticas descriptivas, en porcentaje, de los componentes secundarios que podemos encontrar en la madera de <i>Paulownia spp.</i>	175
Tabla 38	Concentración de los elementos principales en restos de frutales	176
Tabla 39	Estadísticas descriptivas, en porcentaje, de los componentes secundarios en las maderas de las especies de frutales.	177
Tabla 40	Poder calorífico en <i>Quercus ilex</i>	178
Tabla 41	Porcentaje de cenizas en <i>Quercus ilex</i>	179
Tabla 42	Porcentaje de materia volátil en <i>Quercus ilex</i>	181
Tabla 43	Poder calorífico en <i>Paulownia spp.</i>	182
Tabla 44	Porcentaje de cenizas en <i>Paulownia spp</i>	183
Tabla 45	Porcentaje de materia volátil en <i>Paulownia spp</i>	184
Tabla 46	Poder calorífico en frutales	186

Tabla 47	Porcentaje de cenizas por especie frutal	189
Tabla 48	Porcentaje de material volátil por especie frutal	190
Tabla 49	Estadística descriptiva de la distribución de las clases diamétricas de fuste (cm) y altura (m) de <i>Quercus ilex</i>	192
Tabla 50	Estadística descriptiva del factor de forma ( $f_V$ ) de <i>Quercus ilex</i>	195
Tabla 51	Volumen del fuste de <i>Quercus ilex</i> (m <sup>3</sup> /árbol)	197
Tabla 52	Ecuación de volumen fustal para <i>Quercus ilex</i>	198
Tabla 53	Estadística descriptiva de la distribución de clases diamétricas fustal (cm) de <i>Paulownia spp.</i>	200
Tabla 54	Estadística descriptiva del factor de forma ( $f_V$ ) de <i>Paulownia spp.</i>	201
Tabla 55	Ecuación de volumen real para <i>Paulownia spp.</i> para 12 meses de edad.	203
Tabla 56	Volúmenes de fuste (m <sup>3</sup> /árbol) hasta los 5,5 m de altura en plantación de <i>Paulownia spp.</i> de 12 meses	203
Tabla 57	Ecuación de volumen para zona interior y zona costera 1 y 2 para <i>Paulownia spp.</i>	204
Tabla 58	Proyección rendimiento anual del volumen (m <sup>3</sup> /ha/año) de <i>Paulownia spp.</i> en la Comunidad Valenciana	208
Tabla 59	Estadística descriptiva de la distribución de las clases diamétricas de fuste por especie (cm) en frutales	210
Tabla 60	Estadística descriptiva del factor de forma ( $f_V$ ) y CV (%) en frutales	213
Tabla 61	Volumen del fuste por especie (m <sup>3</sup> /árbol) en frutales	214
Tabla 62	Ecuación de volumen de las distintas especies de frutales	215

Tabla 63	Estadística descriptiva sobre la distribución de las clases diamétricas de ramas (cm) de frutales	218
Tabla 64	Modelos de volumen ajustados en frutales por especie	220
Tabla 65	Estadística descriptiva sobre la distribución del volumen de copa (m <sup>3</sup> )	221
Tabla 66	Biomasa aérea total contenida en las especies frutales estudiadas (m <sup>3</sup> /árbol)	222
Tabla 67	Análisis de regresión para un modelo de volumen de copa con respecto al volumen del fuste	223
Tabla 68	Resumen de la biomasa contenida (kg y t) en bosques de <i>Quercus ilex</i>	226
Tabla 69	Resumen del potencial energético, por árbol y por superficie, en bosques puros de <i>Quercus Ilex</i>	229
Tabla 70	Ecuaciones para la determinación de biomasa por árbol en la zona interior y la costa para <i>Paulownia spp.</i>	230
Tabla 71	Ecuaciones para la determinación de biomasa por superficie en la zona interior y la costa para <i>Paulownia spp.</i>	231
Tabla 72	Resumen de la biomasa contenida por árbol (kg/árbol) y superficie (t/ha) en <i>Paulownia spp.</i>	231
Tabla 73	Ecuaciones para la determinación de potencial energético fustal por árbol en la zona interior y la costa para <i>Paulownia spp.</i>	233
Tabla 74	Ecuaciones para la determinación de potencial energético fustal por superficie en la zona interior y la costa para <i>Paulownia spp.</i>	233
Tabla 75	Resumen del potencial energético, por árbol y por superficie, en bosques de <i>Paulownia spp.</i>	234

Tabla 76	Ecuaciones para la determinación de biomasa por árbol en frutales	235
Tabla 77	Ecuaciones para la determinación de biomasa por hectárea en frutales	236
Tabla 78	Resumen de la biomasa contenida en el fuste (kg/árbol y t/ha) en frutales	236
Tabla 79	Ecuaciones para la determinación de biomasa de podas y total en copa por árbol en frutales	237
Tabla 80	Ecuaciones para la determinación de biomasa de podas y total en copa por hectarea en frutales	238
Tabla 81	Resumen de la biomasa extraída en la poda (kg/árbol y t/ha) en frutales	239
Tabla 82	Resumen de la biomasa de la copa (kg/árbol y t/ha) en frutales	240
Tabla 83	Resumen de la biomasa total en frutales (kg/árbol y t/ha)	241
Tabla 84	Ecuaciones del potencial energético por fuste en cada especie frutal	243
Tabla 85	Ecuaciones del potencial energético por hectárea en cada especie frutal	243
Tabla 86	Resumen del potencial energético del fuste, por árbol y por superficie, en frutales	244
Tabla 87	Ecuaciones para la determinación del potencial energético en ramas podadas y total de copa por árbol	245
Tabla 88	Ecuaciones para la determinación el potencial energético en ramas podadas y total de copa por hectárea	245
Tabla 89	Resumen del potencial energético de la poda, por árbol y por superficie	246

Tabla 90	Resumen del potencial energético de la copa, por árbol y por superficie	248
Tabla 91	Resumen de la biomasa total en frutales (kg/árbol y t/ha)	249
Tabla 92	Resumen de cumplimiento de requerimientos para la producción de taleros de partículas según normas.	250
Tabla 93	Resumen de cumplimiento de requerimientos para la producción de pellets según normas.	251



## INDICE DE FIGURAS

Figura 1	Suministro de energía primaria por fuente energética en el mundo	8
Figura 2	Destinación de trozas para energía versus industria en países desarrollados y países en desarrollo	9
Figura 3	Producción de biomasa 2009 en toneladas en LAC	11
Figura 4	Producción de energía primaria (Kboe) por país del LAC en 2009	11
Figura 5	Comparación del uso de la biomasa para energía según el origen de la madera en Chile y Europa	15
Figura 6	Uso de la biomasa para energía en porcentaje según el origen de la madera en Europa	18
Figura 7	Consumo de energía primaria en España	19
Figura 8	Biomasa potencial disponible (t/ha/año) en masas forestales existentes	23
Figura 9	Proyección de contribución a la matriz energética por fuente al año 2035 a nivel mundial	26
Figura 10	Proyección de el consumo de madera aserrada en LAC (2003-2020)	28
Figura 11	Comparación del uso de la biomasa para la energía y su distribución por sectores económicos en Chile y Europa	30
Figura 12	Uso de la biomasa para la energía y su distribución por sectores económicos en Europa	32
Figura 13	Proyección del consumo final bruto (CFB) de energías renovables para el 2020 en España.	34
Figura 14	Incremento de potencia de Cogeneración con biomasa en España	34
Figura 15	Ciclo de vida de la madera y contribución de sus uso integral a la mitigación del cambio climático	44

Figura 16	Cosecha de un cultivo energético mediante tractor	45
Figura 17	Cosecha de trozas delgadas de coníferas para uso energético mediante procesadora y tractor autocargador	48
Figura 18	Acopio de desechos provenientes de aserraderos	49
Figura 19	Acopio de desechos de madera de diverso origen	50
Figura 20	Discos del fuste de <i>Eucalyptus globulus</i> (izquierda) y <i>Acacia melanoxylon</i> (derecha) mostrando la marcación de un diámetro sin corteza (A-B) y un diámetro de duramen (C-D)	52
Figura 21	Corteza y madera de un disco de <i>Quercus ilex</i>	53
Figura 22	Medición de diámetros del fuste a diferentes alturas	70
Figura 23	a) Rodal de fuste excurrente, b) Rodal de fuste delicuescente	72
Figura 24	Superficie por usos en la Comunidad Valenciana	92
Figura 25	Distribución de especies forestales dominantes en la Comunidad Valenciana	94
Figura 26	Renoval puro de <i>Quercus ilex</i> en comarca de Els Ports	96
Figura 27	Mapa de distribución de <i>Quercus ilex</i> en Mediterráneo	97
Figura 28	Distribución de <i>Quercus ilex</i> en bosques puros y mixtos de la Comunidad Valenciana ( <i>Quercus ilex</i> L.)	98
Figura 29	Plantación de <i>Paulownia spp.</i> de 12 meses en zona costera de la Comunidad Valenciana.	99
Figura 30	Superficie cultivada de <i>Citrus sinensis</i> , <i>Olea europaea</i> y <i>Prunus amygdalus</i> . Comunidad Valenciana 2002-2010	100
Figura 31	a) <i>Citrus sinensis</i> (naranja). b) <i>Olea europaea</i> (Olivo). c) <i>Prunus amygdalus</i> (almendra)	101
Figura 32	Distribución de especies, a lo largo del gradiente altitudinal, en la Comunidad Valenciana	104
Figura 33	Zonas de muestreo por especie en la Comunidad Valenciana	105

Figura 34	Determinación de diámetros con forcípula en fuste	108
Figura 35	Muestreo de fuste a seis alturas	110
Figura 36	a) Ramas de diámetro < 7,0 cm y b) Ramas de diámetro ≥ 7,0 cm	111
Figura 37	Determinación de la densidad de la madera por el teorema de Arquímedes, según Olesen (1971)	116
Figura 38	a) Estufa de secado. b) balanza de precisión de 0,0001 g. c) recipientes.	119
Figura 39	Laboratorio del Departamento de Química del ETSIAMN, Universidad Politécnica de Valencia	120
Figura 40	Desecador con muestras para su secado	121
Figura 41	Materiales y aparatos utilizados en la mineralización	123
Figura 42	Materiales para determinación de N	126
Figura 43	Espectrofotómetro de emisión atómica ICP para determinar los minerales y S	129
Figura 44	Máquinas utilizadas para la transformación de la madera en astillas o aserrín de diferentes tamaños.	136
Figura 45	Calorímetro marca Cal2k modelo ECO, IIE-UPV.	136
Figura 46	División del fuste en cinco partes iguales (Hohenadl 1936)	143
Figura 47	Porcentaje de albura y corteza en fuste de <i>Quercus ilex</i> .	152
Figura 48	Porcentaje de albura y corteza en fuste de <i>Paulownia spp.</i>	154
Figura 49	Porcentaje de albura y corteza en ramas con diámetro < a 7,0 cm por especie de frutales	157
Figura 50	Caracterización morfológica en ramas de diámetro ≥ a 7,0 cm por especie	159
Figura 51	Distribución del DAP en los árboles analizados de <i>Quercus ilex</i>	194
Figura 52	Relación diámetro (cm) versus volumen fustal (m <sup>3</sup> ) para	199

*Quercus ilex*

Figura 53	Distribución diamétrica porcentual de fustes en <i>Paulownia spp.</i>	200
Figura 54	Variación del tamaño de la oclusión en fuste de <i>Paulownia spp.</i> hasta los 5,5 m de altura	202
Figura 55	Relación diámetro (cm) versus volumen fustal (m <sup>3</sup> ) para zona interior de <i>Paulownia spp.</i>	205
Figura 56	Relación diámetro (cm) versus volumen fustal (m <sup>3</sup> ) para zona costera 1 de <i>Paulownia spp.</i>	205
Figura 57	Relación diámetro (cm) versus volumen fustal (m <sup>3</sup> ) para zona costera 2 de <i>Paulownia spp.</i>	205
Figura 58	Distribución diamétrica porcentual de fustes en frutales	211
Figura 59	Relación diámetro (cm) versus volumen fustal (m <sup>3</sup> ) para <i>Citrus sinensis.</i>	216
Figura 60	Relación diámetro (cm) versus volumen fustal (m <sup>3</sup> ) para <i>Olea europaea</i>	216
Figura 61	Relación diámetro (cm) versus volumen fustal (m <sup>3</sup> ) para <i>Prunus amygdalus</i>	216
Figura 62	Distribución diamétrica porcentual en ramas de frutales estudiados	219

## **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES

#### 1.1.1 Definición de biomasa agroforestal

La directiva 2009/28/UE define a la biomasa como la fracción biodegradable de productos, desechos y residuos de la agricultura (incluyendo sustancias vegetales y animales), silvicultura e industrias relacionadas, así como la fracción biodegradable de los residuos municipales e industriales. Para Brown (1997) y Eamus *et al.* (2000) la biomasa es un parámetro que caracteriza la capacidad de los ecosistemas para acumular materia orgánica a lo largo del tiempo y está compuesta por el peso de la materia orgánica aérea y subterránea que existe en un ecosistema forestal (Schlegel *et al.* 2000). Para Bracmort y Gorte (2012) la biomasa es toda materia orgánica que puede ser convertida en energía, siendo la biomasa leñosa aquella que puede ser repuesta en el corto plazo.

De acuerdo con esto, Rosillo-Calle *et al.* (2007) señalan que la biomasa leñosa de origen agrícola y forestal se puede clasificar en ocho categorías: bosques naturales, bosques, plantaciones forestales, plantaciones agro-industriales, bosques de árboles externos y bosques, cultivos agrícolas, residuos de cosechas, procede de residuos y desechos animales. Esta tesis se centra principalmente en la evaluación de la biomasa aérea de bosques naturales, plantaciones forestales (cultivo energético) y cultivos agrícolas.

### **1.1.2 Principales ventajas e inconvenientes de la biomasa como fuente de energía renovable**

#### *a) Ventajas medioambientales y socioeconómicas*

A nivel general, la gestión de los recursos biomásicos agroforestales y su aprovechamiento energético juega un triple y positivo papel:

- i. Se trata de un combustible no fósil, neutro desde el punto de vista del ciclo natural del carbono, por lo que las emisiones de CO<sub>2</sub> que se producen, al proceder de un carbono fijado de la atmósfera en el mismo ciclo biológico, no alteran el equilibrio de la concentración de carbono atmosférico, y por tanto contribuye de forma activa a la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero (Kraxner *et al.* 2003 y Fisher *et al.* 2012)
- ii. Su valorización y uso como energía térmica y/o eléctrica reduce las emisiones globales de CO<sub>2</sub> siempre que sustituya a otros combustibles fósiles (IPCC 1996).
- iii. Su gestión y aprovechamiento sostenible así como el aprovechamiento energético está íntimamente ligado al territorio forestal, por lo que contribuye de forma directa al desarrollo socioeconómico de un sector clave para la economía sostenible en el medio rural (Gobierno de Cantabria 2005). Según Martín-Pinto y Jiménez-Shaw (2011) la creación de tejido empresarial en municipios/comarcas forestales podría llevar asociado hasta 10.000 empleos directos en España.

- iv. Genera un mayor valor a productos actualmente desechados (restos de podas, descope, desbroces para cortafuegos, tratamientos silvícolas fitosanitarios), rentabilizando tareas y trabajos necesarios para el cuidado del monte y cultivos agrícolas leñosos (Riechmann y Sempere 2003).
- v. Mejora las condiciones de los montes y cultivos agrícolas leñosos en cuanto a la prevención frente a incendios forestales (EPA 2012).
- vi. Ayuda a la reforestación de zonas desarboladas, aumentando así la cantidad de CO<sub>2</sub> absorbida (CSIC 2010).
- vii. Parte de las tierras agrícolas abandonadas se pueden rehabilitar como cultivos energéticos leñosos como complemento a la biomasa derivada de los trabajos forestales (Fernández 2009).
- viii. La biomasa tiene un contenido en azufre prácticamente nulo (Sánchez *et al.* 2011 y Rolle 2006). Por este motivo, las emisiones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), que junto con los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) son las causantes del denominado efecto de la lluvia ácida, son despreciables en los procesos de transformación de biomasa agroforestal en energía térmica y/o eléctrica (IPCC 2007).
- ix. El aumento de generación de energía térmica y/o eléctrica a partir de residuos agroforestales contribuye a elevar la producción de energías renovables, lo que conlleva una menor dependencia de la importación de combustibles fósiles (APPA 2009). Este aspecto es muy importante para un país como España, en que gran parte de la energía que se consume

proviene de fuentes energéticas exteriores, procedentes en su mayoría de regiones o países política y económicamente inestables (PANER 2010). La utilización de esta fuente de energía autóctona y renovable contribuye a asegurar un suministro de combustible continuo, con un precio más estable que no vendría directamente influido por las variaciones que pueda experimentar el precio del petróleo y derivados (Pérez Dueñas 2010).

*b) Inconvenientes medioambientales y socioeconómicos*

- i. Dispersión del recurso en el espacio, lo que incide de forma decisiva en los costos logísticos y en la planificación del aprovisionamiento (Johnson *et al.* 2012).
- ii. Es necesaria una mayor cantidad de biomasa que de combustible fósil para conseguir la misma cantidad de energía, lo que hace necesario también mayor espacio para su almacenamiento (Fernández 2009).
- iii. Los rendimientos de las calderas de biomasa son algo inferiores a los rendimientos de las calderas que utilizan combustibles fósiles (Demirbas 2005). Además, sus sistemas de alimentación de combustible y de eliminación de partículas de los gases de escape son más complejos (GEODEM 2008).

Todo esto hace necesaria la planificación del aprovisionamiento y transformación energética de la biomasa forestal a escala local o comarcal.

Según los estudios llevados a cabo por Madrigal *et al.* (2012) y PROFORBIOMED (2012) se puede concluir que los costos económicos derivados de la necesidad del aprovisionamiento regular en cantidad y calidad, así como los balances de carbono (energía fósil necesaria para transportar y convertir energía renovable) obligan a desarrollar modelos de gestión biomásica integral a nivel local o comarcal.

### **1.1.3 Situación actual del aprovechamiento de la biomasa agroforestal como fuente de energía renovable**

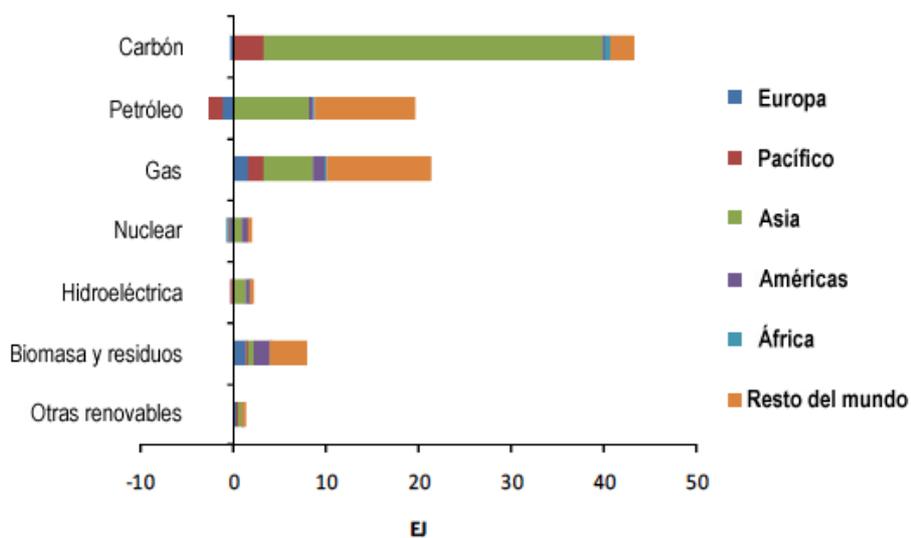
#### *a) A nivel mundial*

El año 2011 fue declarado el Año Internacional de los Bosques por la Asamblea General de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) con el objetivo de celebrar y poner en valor el papel de las sociedades y comunidades rurales en la gestión y en la conservación de las masas forestales. Uno de los enfoques planteados en el Forum de los Bosques de la ONU es evaluar en clave socioeconómica los bosques y su interés desde el punto de vista de la energía, sobre todo a escala local (ONU 2011a).

En este contexto hay que destacar que el papel de la biomasa agroforestal como fuente de energía renovable no es nuevo, ya que durante mucho tiempo y sobre todo en la época preindustrial y en zonas predominantemente rurales, ha sido el combustible más utilizado (Allué *et al.* 2007, PANER 2010).

Si nos referimos a la importancia actual del uso de la biomasa con fines energéticos, cabe señalar que la biomasa constituye el cuarto recurso explotado a

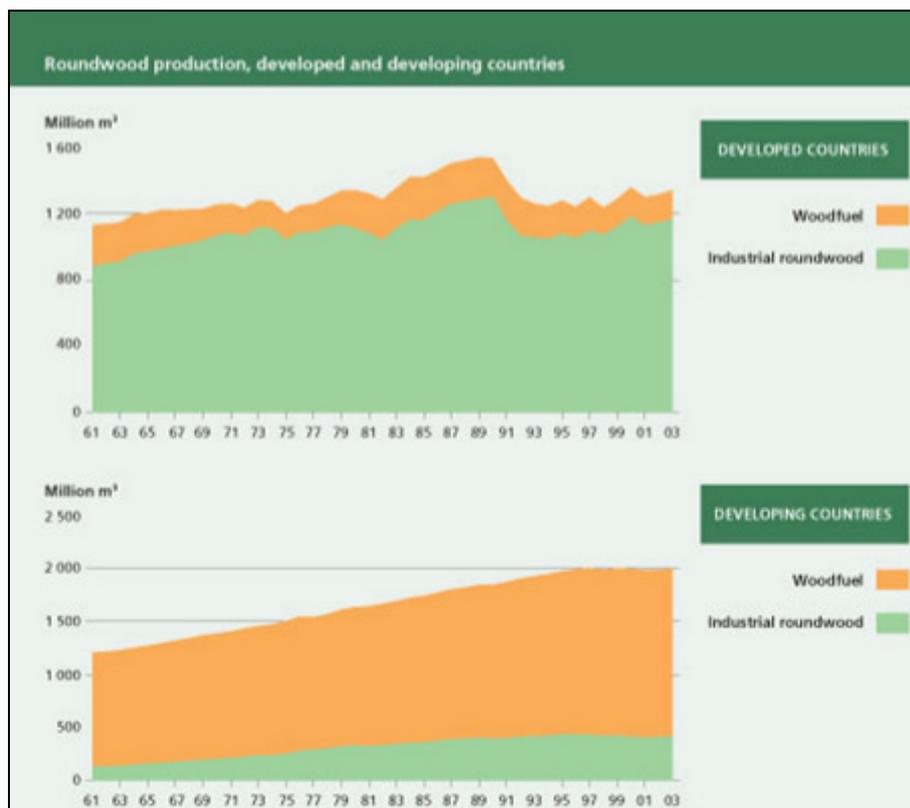
escala mundial, suponiendo un 14% del consumo energético del planeta. Sin embargo, salvo Austria, Finlandia y Suecia, donde ocupa un lugar de cierta importancia, en el balance general de Europa, la biomasa sólo supone un 2% de acuerdos con las Comunidades Europeas (CE 1995-2008). En los países en desarrollo, este uso se ha incrementado de 736.000 tep a 879.000 tep (16,2%) desde 1990 al 2003 (WRI 2005).



**Figura 1.** Suministro de energía primaria por fuente energética en el mundo  
Fuente: IEA (2011)

En el actual escenario de costos derivados del petróleo, junto con los problemas debidos a la producción de CO<sub>2</sub> han llevado a las autoridades a compromisos de potenciación de las energías renovables, y en particular de fomento a la biomasa forestal con fines energéticos (FAO 2010, Tolosana 2009, PANER 2010).

## 1. INTRODUCCIÓN



**Figura 2.** Destinación de trozas para energía versus industria en países desarrollados y países en desarrollo  
Fuente: FAO (2002)

Visto desde una perspectiva global, para el Programa Chile Sustentable (2012) el actual abastecimiento de energía mundial repercute decisivamente en dos problemáticas, principalmente en el aumento de los precios de la energía a nivel mundial y la crisis global del medio ambiente, y el uso casi exclusivo de fuentes energéticas agotables, siendo los modelos de solución de estas dos problemáticas la construcción de un sistema de abastecimiento propio con gran autonomía y esto se puede lograr solamente con el uso de recursos renovables.

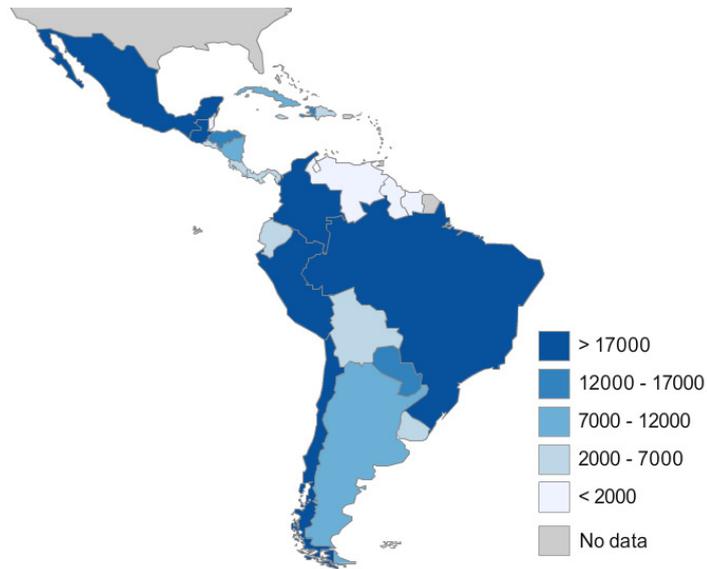
### *b) A nivel de Latinoamérica y el Caribe (LAC)*

Según los datos de la IEA (2009), las energías renovables ascienden a casi el 29% del suministro total de la energía primaria en los países del LAC, cifra relativamente alta en comparación con la cuota del 5,7% de energías renovables de los países de la OCDE.

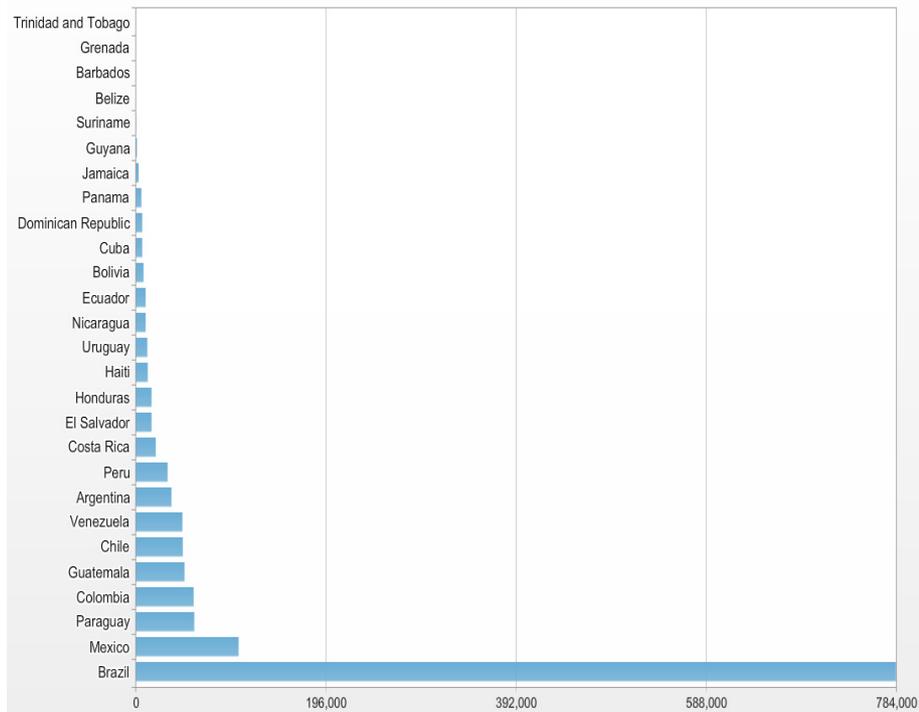
Dentro del sector predomina la energía hidroeléctrica con un 62% de la cuota total de energías renovables, llegando a elevarse hasta el 90% en algunos países como Brasil o Paraguay (Meisen y Krumpel 2009).

Según SELA (2012) la matriz energética de producción de LAC, en 2009, se distribuía de la siguiente forma: México ocupa el primer lugar en producción de combustibles con 24,7%, seguido de Brasil con 22,9%, Venezuela con 20,4%, Colombia con 9,8%, Argentina con 7,7%, Trinidad y Tobago con 4,2%, y Ecuador con 2,8%, los que en conjunto representan 92,4% del total de las energías producidas por LAC. Históricamente, estos siete países han Representado más del 92% de la energía producida por LAC (2005-2009). El restante 7,6% se reparte entre los otros 19 países.

Sin embargo, la región LAC contiene el 21,4% de los bosques del mundo (FAO 2011b) lo que ha llevado a que muchos estudios a nivel mundial mencionan el potencial de la biomasa como fuente energética en esta región.



**Figura 3.** Producción de biomasa 2009 en toneladas en LAC  
Fuente: UNIDO (2010)



**Figura 4.** Producción de energía primaria (Kboe) por país del LAC en 2009  
Fuente: UNIDO (2010)

Smeets *et al.* (2007) estiman que el potencial energético de biomasa para el año 2050 de LAC, a partir de tierras agrícolas excedentarias, puede variar entre 47 y 221 x 10<sup>6</sup> GJ por año, dependiendo del sistema de producción. Estas cifras representan entre 17% y 26% del total mundial de energía, cifra que es mayor que ninguna otra región en el mundo.

Las cifras anteriores son una estimación del potencial energético de biomasa, tanto para producción de electricidad como para combustibles líquidos para transporte. De acuerdo al Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC 2005) y la Administración de Información Energética (IEA 2004), el transporte representa 27% del consumo mundial secundario de energía y 21% del primario, el cual es suplido casi completamente por petróleo. Debido al aumento del parque automotriz y del transporte en general, estos porcentajes podrían incrementarse a entre 29-32% en 2050. De este potencial técnico, es importante también determinar el potencial económico real de producción. Vries *et al.* (2007) mencionan que el costo de producción de biocombustibles en el año 2000 era de entre 10 a 20 US\$/GJ. Para el año 2050 se prevé que este costo se reduzca sustancialmente, incrementando el potencial económico de producción de los biocombustibles. Se estima que bajo ciertas circunstancias, en 2050, más del 25% del potencial mundial sería con costos menores a 12 US\$/GJ. Para LAC, este porcentaje sería de más del 70% de la oferta potencial en el año 2050, haciendo atractiva la exportación de biocombustibles desde la región.

Si bien los recursos son muy favorables, hasta ahora el obstáculo se ha encontrado en la falta de voluntad política para la promoción de planes de inversión o las ayudas para el desarrollo de instalaciones, aunque las disposiciones actuales son proclives a dar un papel cada vez más importante a las energías renovables (Meisen y Krumpel 2009).

A pesar de esto, según el reporte “Renewable 2011” publicado por REN21 (2011), 17 países de LAC utilizaban algún tipo de política para apoyar la generación de energías renovables, para lo cual han implementado en total 61 medidas de fomento para ese fin. Las políticas más utilizadas han sido: incentivos fiscales (30 medidas), seguido por política regulatoria (17 medidas) y finalmente el financiamiento público (14 medidas). Por su parte, en los casos de Barbados, Cuba, Grenada, Guyana, Haití, Jamaica, Paraguay, Surinam y Venezuela no se registra la aplicación de ese tipo de políticas.

### *c) A nivel de Chile*

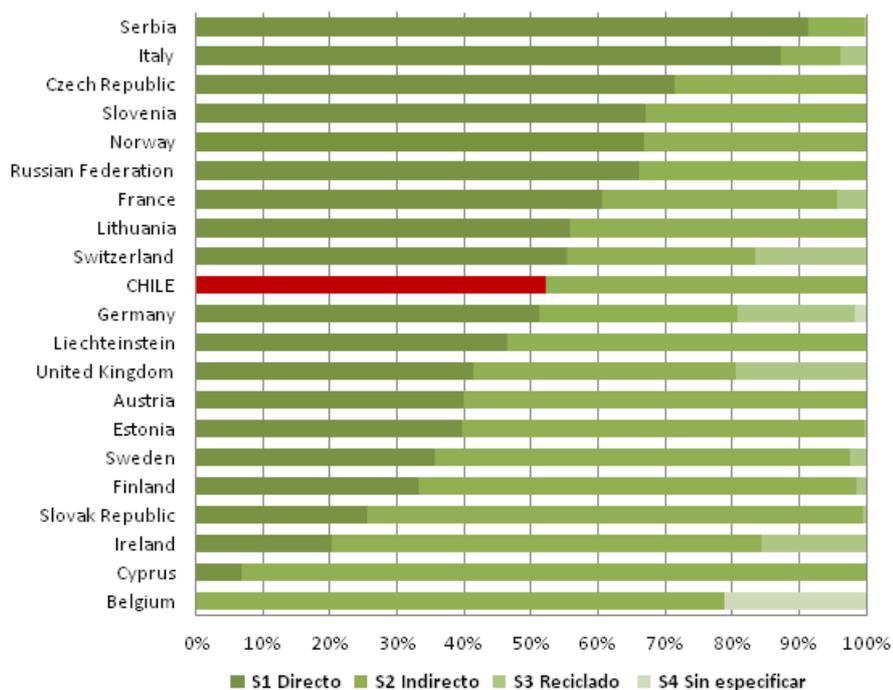
Chile es un país altamente dependiente de las importaciones de energía. Por fuentes, la dependencia energética pueden resumirse de la siguiente manera: el país importa el orden de un 98% de su petróleo y sus derivados, el 95% de su carbón y más del 70% de las necesidades de gas natural (Ministerio de Energía de Chile 2011). El consumo de energía final se determina por diferentes sectores: la industria (29%), la minería (33%) y el comercio (11%), residencial (15%), la agricultura (2%) y otros (10%) (INE CHILE 2008).

Esta dependencia de las importaciones de energía de los combustibles fósiles en general y, en particular, puede representar un desafío económico. La creciente demanda mundial masiva de combustibles fósiles produce un aumento de los precios. Es oportuno, pues, para el caso de Chile, evaluar sus recursos energéticos nacionales. Este es el caso de la biomasa que tiene un papel determinante en la matriz energética de Chile con una participación de 17,5%, siendo el sector residencial el mayor consumidor de este recurso con 65,3%, seguido por el sector industrial con un 34,7% (IEA 2009).

Chile tiene un enorme potencial para el aumento de su beneficio a partir de biomasa leñosa para uso energético. Existen 33,8 millones de hectáreas de aptitud forestal (45% del territorio nacional), de estas tierras 15,6 millones de hectáreas son bosques nativos y plantaciones. Los restantes 18.2 millones de hectáreas son áreas protegidas, tanto de propiedad privada y el Estado (GTZ /FAO/INFOR 2007). También existe biomasa leñosa disponible en la agricultura, que pertenece a los árboles frutales y las vides que corresponden a un área de 500.658 hectáreas (ODEPA 2012).

Los recursos forestales y sus derivados es una de las principales exportaciones de Chile, después del cobre y el salmón (PROCHILE 2009), mostrando un buen nivel de industrialización de este sector, por lo que contaría con la capacidad tecnológica y de gestión para el uso del alto volumen de residuos procedentes de los diferentes sectores de la industria forestal. Por lo tanto, la energía a partir de biomasa leñosa que procede el bosque nativo gestionado, plantaciones forestales, cultivos agrícolas y residuos leñosos tiene un vasto potencial en Chile.

## 1. INTRODUCCIÓN



**Figura 5.** Comparación del uso de la biomasa para energía según el origen de la madera en Chile y Europa (Glosario en Anexo 2, FAO 2011a)  
Fuente: Elaboración propia

Chile genera una gran cantidad de subproductos derivados del sector forestal que, aunque la mayoría se utiliza para el consumo de energía tanto a grandes empresas forestales como para la industria (tableros). Estos no son el objetivo principal de las áreas prioritarias de investigación para el desarrollo de tecnologías simples con el fin de aumentar la eficiencia de este biocombustible sólido para uso residencial y/o industrial, o al menos sus esfuerzos no están consolidados en el mercado nacional (CONICYT 2012).

Esto es debido, a que no existen políticas que podrían generar el consumo de biomasa para la energía con el fin de superar las barreras a la entrada de un nuevo mercado para los combustibles sólidos (por ejemplo, pellets), como los

altos costos de los equipos de combustión, proporcionando un sistemas de pocas empresas, la falta apreciación de sus beneficios ambientales, etc. Cabe señalar que sí existen políticas y estrategias para otro tipo de energías renovables como, por ejemplo, la energía solar (Ley 20365 del Ministerio de Hacienda de Chile 2009, CONICYT 2012).

### *d) A nivel de Europa*

Por otra parte, en muchos de los países de Europa se han seguido políticas de apoyo al uso de estos residuos agroforestales, desarrollando legislación específica, sistemas de apoyo financiero al sector empresarial e incluso ayudas a los usuarios finales por el uso de este tipo de biomasa, centrando estas políticas, programas y proyectos en municipios y comarcas de marcado carácter forestal con el fin de favorecer esta fuente de energía, a la par que buscan un incremento de la cohesión y el empleo en zonas rurales. Fueron estos objetivos los que llevaron a la elaboración en 1997 del Libro Blanco para una Estrategia Común y un Plan de Acción para las Energías Renovables por parte de la Comisión Europea (CE 1997).

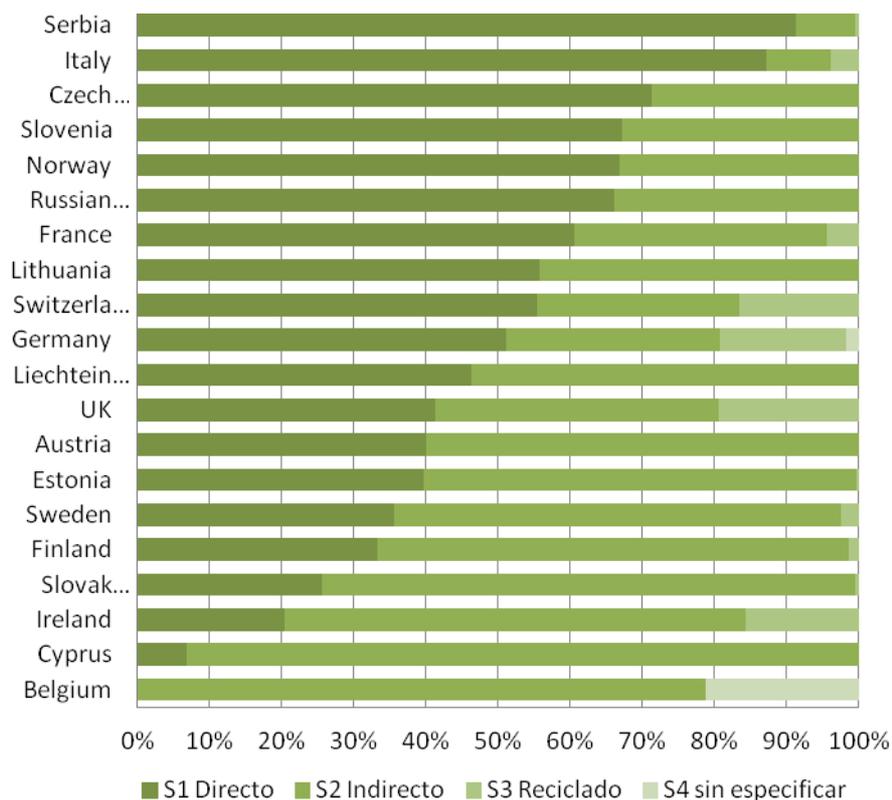
Desde entonces la política energética de la Unión Europea se centra fundamentalmente en dos aspectos claves:

- 1- Ahorro en el consumo energético.
- 2- Diversificación de las fuentes de energía, con el fomento de las energías renovables, dentro de los compromisos destinados a cumplir con los objetivos marcados en el Protocolo de Kyoto.

CE (1997) plantea un importante objetivo, que consiste en la aportación de un 12 % del suministro energético con energías renovables en el año 2010.

La implementación legislativa de estas directrices políticas lleva a la CE en 2001 a redactar la Directiva Europea sobre el fomento de producción de la electricidad a partir de las fuentes de energía renovable (2001/77/CE y 2003/30/CE) derogada por Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009, cuyo objetivo era que la proporción de electricidad “verde” (energía eléctrica generada a partir de fuentes de energía renovable), sea del 22 % en el 2010. En esta la Comisión Europea propone que los países miembros utilicen una serie de medidas de apoyo para fomentar el consumo de bioelectricidad (ayudas fiscales, financieras, subvenciones, certificados verdes, etc.).

La Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, establece que cada Estado miembro elabore un Plan de Acción Nacional en materia de energías renovables para conseguir los objetivos nacionales fijados en la propia Directiva en relación con la cuota de energía procedente de fuentes renovables en el consumo final bruto de energía y con la cuota de energía procedente de fuentes renovables en el transporte. Establece normas relativas a las transferencias estadísticas entre Estados miembros, los proyectos conjuntos entre Estados miembros y con terceros países, las garantías de origen, los procedimientos administrativos, la información y la formación, y el acceso a la red eléctrica para la energía procedente de fuentes renovables. Define criterios de sostenibilidad para los biocarburantes y biolíquidos, etc.



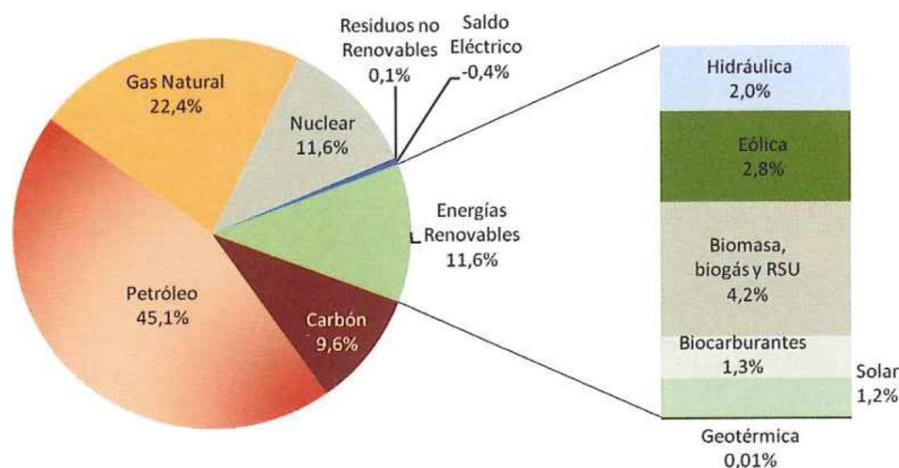
**Figura 6.** Uso de la biomasa para energía en porcentaje según el origen de la madera en Europa (Glosario en Anexo 2)  
 Fuente: FAO 2011a

Tras la aplicación de todas estas medidas, si separamos Europa por regiones y cantidad de biomasa producida, los resultados demuestran que Escandinavia y Austria están a la cabeza de la producción y utilización de Energía procedente de los bosques. Estos países pueden ser un referente a seguir a la hora de utilizar la biomasa como fuente de Energías Renovables en zonas mediterráneas (IEA 2007).

## e) A nivel de España

España es aún un país altamente dependiente de los combustibles fósiles. El peso del petróleo en el consumo de energía primaria (48,8%) es superior a la media europea, y el gas natural supone un 24% del consumo total de energía primaria (Cerdá 2012).

No obstante, el aumento de la cuota de las energías renovables en el mix energético de los últimos años ha supuesto que, por primera vez en el año 2009, la energía procedente de fuentes renovables consumida superara a la generada por carbón (IDAE 2011). Según EUROBSERV'ER (2011), España ocupa el sexto lugar en la UE-27 en cuanto a producción de energía primaria a partir de biomasa sólida, tras Alemania, Francia, Suecia, Finlandia y Polonia.



**Figura 7.** Consumo de energía primaria en España  
Fuente: IDAE (2011)

En la situación actual de fuerte crisis económica en España, la diversificación de las fuentes de energía y la limitación, en lo posible, de la dependencia energética

exterior son elementos que aportan estabilidad a la economía española y contribuyen a reducir el déficit comercial de la balanza de pagos (PER 2005-2010). Por otro lado, en un país de clima y vegetación predominantemente mediterráneos donde los devastadores incendios forestales son habituales, la eliminación de unos restos de alta combustibilidad, como son los residuos de los tratamientos silvícolas, de las cortas finales y los residuos de cultivos agrícolas leñosos, contribuyen de forma muy efectiva a la disminución del riesgo de incendios forestales (VAERSA 2007).

A nivel nacional, la aplicación legislativa de las directrices europeas lleva a la elaboración de la Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico. A raíz de esta ley, se desarrolla el Plan de Fomento de las Energías Renovables, aprobado en Consejo de Ministros el 30 de Diciembre de 1999. A partir de este punto se generan las directrices del PER (Plan de Energías Renovables) 2005-2010, en el que se abren las puertas de un nuevo mercado energético en el Estado Español. Los principales objetivos del PER 2005-2010 son:

- i. Cubrir al menos el 12 % del consumo total de energía en 2010 con energías procedentes de fuentes de energía renovable.
- ii. Cubrir el 29,4 % de la generación eléctrica con energías renovables.
- iii. Alcanzar el 5,75 % de utilización de biocarburantes en el sector transporte.

**Tabla 1.** Distribución del uso energético de energías renovables en España

Usos	Solar	Geo-térmica	Carbón vegetal	Biomasa			TOTAL
				Leña/ramas (TJ)	Pellets	Otra	
Calefacción	432	254	805	97.695	202	434	99.135
Agua caliente	5.402	143	247	1.469	168	213	2.097
Cocina			90	989	1		1.079
Refrigeración		107					
Iluminación							
Electrónica							
Consumo Total	5.834	504	1.141	100.153	370	647	102.312

Fuente: IDAE (2011)

En el PER 2005-2010 la generación energética alcanza una especial relevancia a partir de la biomasa en sus diferentes vertientes (Figura 6).

También en el Plan de Fomento se adscribe el Plan de Ahorro y Eficiencia Energética (PPAE) que fomenta el empleo de energías renovables (IDAE 2011).

Para la aplicación de la Directiva 2009/28/CE, España ha definido políticas de apoyo y fomento, que han sido la base para el cálculo de previsión de utilización de la biomasa en general y de la forestal en particular. Esta estrategia está reflejada en el Plan de Acción Nacional de Energías Renovables de España para el período 2011-2020 (PANER 2010). Con estas políticas se ha previsto que la biomasa, con independencia del origen, deberá aportar el 45% del total de generación con fuentes de energías renovables, de donde 460.000 Tep (un 10%) corresponderán a la procedente de residuos del monte.

Ahora bien, a pesar de existir esa posibilidad de biomasa en los terrenos forestales, no se ha producido un arranque de este sector todo lo satisfactorio que cupiera esperar (Martín-Pinto y Jiménez-Shaw 2011). Esto es debido principalmente a que, según Cerdá (2012) existen diversos tipos de barreras y dificultades que explican la situación actual de la biomasa en España, y que limitan la posibilidad de lograr un mayor desarrollo a medio plazo, tal y como han identificado APPA (2010), CONAMA10 (2010) y Prada *et al.* (2006). Estas barreras se pueden situar tanto en el ámbito de los recursos, el desarrollo tecnológico o las aplicaciones. alguna de las barreras más relevantes son las siguientes (Cerdá 2012 y REMUFOR 2011):

- i. Barreras en la fase de tramitación de proyectos.
- ii. Barreras a la movilización de la biomasa forestal que generan los montes.
- iii. Barreras a la movilización de residuos agrícolas.
- iv. Necesidad de un marco legislativo y de ayudas para los cultivos energéticos.
- v. Competencia de los combustibles convencionales a las aplicaciones térmicas de la biomasa.
- vi. Bajo rendimiento energético, así como necesidad de un tamaño mínimo para alcanzar el umbral de rentabilidad en las aplicaciones eléctricas de la biomasa.
- vii. Apoyo económico a combustibles fósiles.
- viii. Normativas restrictivas para la circulación de vehículos de transporte de biomasa en caminos rurales, así como para permitir el almacenamiento a la intemperie de la biomasa.
- ix. Barreras a la introducción de la cogeneración con biomasa y al despegue de la co-combustión.

Lo anterior, unido a la particular situación de la propiedad forestal y agrícola en muchas zonas de España con titularidad predominantemente privada en pequeñas extensiones, supone que no se haya podido garantizar el recurso de forma sostenible en el tiempo como para hacer viables instalaciones de tamaño mínimo que usen biomasa agroforestal como combustible (Martín-Pinto y Jiménez-Shaw 2011).



**Figura 8.** Biomasa potencial disponible (t/ha/año) en masas forestales existentes  
Fuente: IDAE (2011)

A la vista de esta situación, el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) ha ido introduciendo variaciones en los planes a nivel estatal, tanto en los métodos de cálculo como en los objetivos, adaptándolos a la realidad de la evolución del mercado (IDAE 2011). Actualmente el PANER 2011-2020 prevé mecanismos que incentiven la utilización de la biomasa forestal como fuente

energética, contemplando para el año 2020 un suministro de 338 kTep de este tipo de biomasa.

*f) A nivel de la Comunidad Valenciana*

Las acciones llevadas a cabo por AVEN (Agencia Valenciana de la Energía), perteneciente a la Consellería de Economía, Industria y Comercio está desarrollando un Plan de Ahorro y Eficiencia Energética para la Comunidad Valenciana, en donde se fomenta entre otras actuaciones la utilización de las energías renovables, con destacado papel de la Biomasa (AVEBIOM 2010). La citada agencia también está subvencionando la utilización de dichas energías, además de fomentar los proyectos de investigación sobre las mismas.

La Consellería de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente elaboró la Orden 2008/10625, por la que se aprueban las bases reguladoras de un régimen de primas para la puesta en Valor de la Biomasa Forestal Residual (BFR) en terrenos forestales de la Comunidad Valenciana. Se subvencionan 51 €/Tm. de biomasa procedente de:

- i. Retirada de BFR procedente de incendios forestales.
- ii. Retirada de BFR procedente de aprovechamientos forestales.
- iii. Retirada de BFR procedente de tratamientos silvícolas y selvicultura preventiva.

Por otra parte, el Plan de Acción Territorial Forestal de la Comunidad Valenciana (PATFOR 2011) es un instrumento de planificación forestal y de ordenación del territorio en el medio y largo plazo, gestado desde una perspectiva de participación pública, alrededor de la cual, la administración quiere alcanzar un

consenso sobre las líneas maestras de lo que debe ser su acción futura sobre el sector forestal.

El PATFOR define, de forma participativa, un nuevo modelo forestal valenciano que responde a las demandas y necesidades de la sociedad:

- i. Promoviendo la instauración de mecanismos participativos permanentes, que fomenten la corresponsabilidad de la sociedad en la gestión forestal.
- ii. Transformando los ecosistemas forestales en un elemento vertebrador del territorio, integrado con el resto de componentes del mismo y capaz de enfrentarse a los nuevos retos, como el cambio climático o las energías alternativas.
- iii. Optimizando el aprovechamiento de los bosques en su producción de bienes y servicios, como en la mitigación de riesgos para la sociedad.
- iv. Garantizando la conservación de los ecosistemas forestales, las especies de flora y fauna y su adaptación a los cambios.
- v. Revalorizando el papel económico, social y ambiental de los montes, de modo que se favorezca el retorno, a los gestores forestales, de los servicios ambientales que prestan.
- vi. Fomentando nuevas fórmulas de gobernanza forestal, capaces de reactivar los montes como elementos dinamizadores del desarrollo rural, contribuyendo a la fijación de poblaciones y el aumento de su calidad de vida.

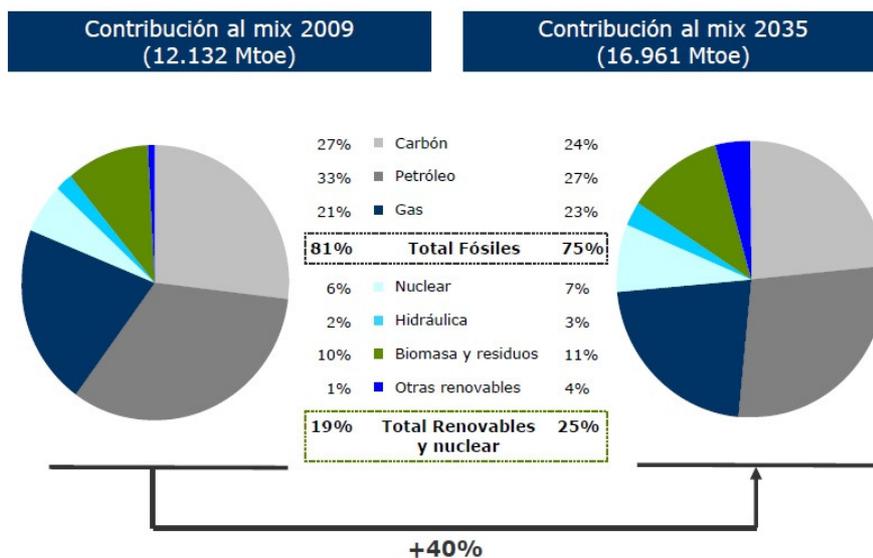
Para responder a todo esto, entre otras estrategias, la función del PATFOR es identificar líneas de acción prioritarias; clasificar el terreno forestal; elaborar una normativa que regule los usos de los terrenos forestales y establecer directrices y recomendaciones de gestión forestal. Es decir, el Plan debe responder a las

necesidades del suelo forestal, tanto en lo relativo a la ordenación del territorio, como a la gestión forestal.

#### 1.1.4 Perspectivas de futuro para el aprovechamiento sostenible y valorización bioenergética de la biomasa agroforestal

##### a) A nivel mundial

En la actualidad, la silvicultura, los residuos agrícolas y municipales, y los desechos son las materias primas principales para la generación de electricidad y calor a partir de biomasa. Hoy en día, la biomasa aporta unos 50 EJ a nivel mundial, lo que representa un 10% de consumo anual mundial de energía primaria. Esto es principalmente la biomasa tradicional para cocinar y calentarse (IEA 2007, IPCC 2007).



**Figura 9.** Proyección de contribución a la matriz energética por fuente al año 2035 a nivel mundial.

Fuente: EOI (2012)

Existe un gran potencial para expandir el uso de biomasa a través de los grandes volúmenes de residuos no utilizados y desechos. El uso de cultivos convencionales para el uso de la energía también se puede ampliar con una cuidadosa consideración de la disponibilidad de tierras y la demanda de alimentos. En el mediano plazo, los cultivos leñosos podrían ser producidos en tierras agrícolas marginales, degradadas y excedentes y proporcionan la mayor parte de los recursos de biomasa (IEA 2009).

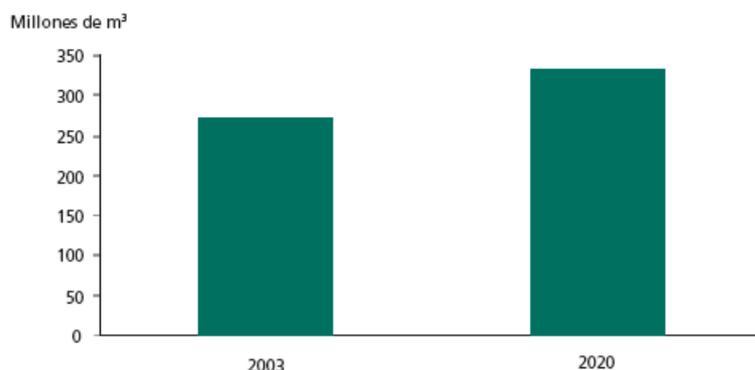
Sobre la base de esta amplia gama de materias primas, el potencial técnico de la biomasa se estima en la literatura a ser posiblemente tan alto como 1.500 EJ/año en 2050, a pesar de que la mayoría de los escenarios de suministro de biomasa que tienen en cuenta las restricciones de sostenibilidad, indican un potencial anual de entre 200 y 500 EJ/año (Dornburg *et al.* 2008). Los residuos de la silvicultura y la agricultura y otros residuos orgánicos (incluidos los residuos sólidos urbanos) proporcionaría entre 50 y 150 EJ/año, mientras que el resto provendría de los cultivos energéticos, el crecimiento de los bosques superávit, y el aumento de la productividad agrícola (IEA 2009).

En el caso de que esta crisis económica continúe, la reducción de la demanda, las bajas inversiones y la disminución de los ingresos ocasionarán el decrecimiento del gasto de los consumidores, la pérdida de los beneficios y la reducción de la financiación pública en la mayoría de los sectores, incluida la actividad forestal. La mayor competitividad y la tendencia del sector privado a subcontratar o contratar en el extranjero la producción podría estimular medidas proteccionistas y decelerar el crecimiento del comercio mundial (FAO 2011b).

Aun así, los controladores de un mayor uso de la bioenergía (por ejemplo, objetivos de políticas para las energías renovables) puede conducir a una mayor demanda de biomasa, lo que lleva a la competencia por la tierra actualmente utilizada para la producción de alimentos, y posiblemente (indirectamente) que causa las zonas sensibles a tener en producción. Para ello será necesario la intervención de los responsables políticos, en la forma de regulación de las cadenas de la bioenergía y / o la regulación del uso del suelo, para asegurar la demanda y la producción sostenibles. El desarrollo de políticas adecuadas requiere una comprensión de las complejas cuestiones implicadas y la cooperación internacional sobre medidas de fomento de los sistemas mundiales de producción sostenible de biomasa (IEA 2009).

*b) A nivel de Latinoamérica y el Caribe*

Latinoamérica es considerada como una de las regiones con mayor potencial de expansión en biocombustibles (CEPAL 2012).



**Figura 10.** Proyección de el consumo de madera aserrada en LAC (2003-2020)  
Fuente: FAOSTAT (2012)

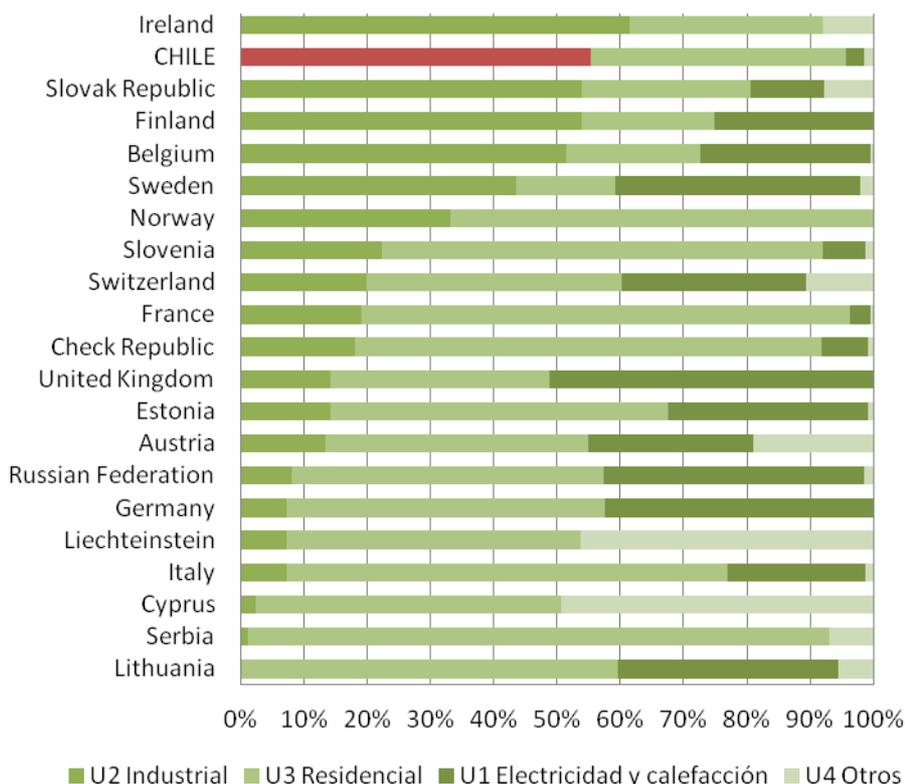
Comparando el potencial de combustibles para transporte con la demanda global para el año 2050 (80-250 EJ por año), Vries *et al.* (2007) prevén que se podrá

cubrir en 100% esta demanda en tres de los cuatro escenarios considerados por estos autores, si toda la tierra considerada apta/disponible para plantaciones de biomasa fuera usada para la producción de combustibles para transporte. Por otro lado, Smeets *et al.* (2007) prevén que para LAC la bioenergía (no solamente combustibles líquidos) cubra en más de 100% la demanda de energía, con rangos que varían entre 120% y 580%.

### *c) A nivel de Chile*

Según el SNCL (2009) la participación de los biocombustibles sólidos (leña y derivados) en la matriz energética nacional podría aumentar ostensiblemente, sin necesidad de cortar más árboles, mejorando tres aspectos que determinan su eficiencia: equipos de combustión, humedad del biocombustible y aislamiento térmico de las viviendas. Sin embargo, actualmente en Chile no existen políticas que podrían generar el consumo de biomasa para la energía con el fin de superar este tipo de barreras.

Si Chile optara por el desarrollo de energía a partir de biomasa forestal, podría - en conjunto con la hidroelectricidad - satisfacer entre un 40% y 50% de su demanda energética en el medio plazo (Burschel *et al.* 2003).



**Figura 11.** Comparación del uso de la biomasa para la energía y su distribución por sectores económicos en Chile y Europa (Glosario en Anexo 2, FAO 2011a)  
 Fuente: Elaboración propia

Se ha estimado el potencial factible-económico de la biomasa leñosa en 500 MW al 2025, pero si el costo de las tecnologías de conversión y la experiencia y conocimiento tecnológico fueran diferentes a las actuales, sin lugar a dudas, el potencial sería mayor, por ejemplo, se estimo 541 MW factibles técnicamente, lo que podría aumentar el potencial estimado al 2025 de 500 MW a 841 MW (Pontt 2008). Ese potencial se encuentra concentrado en las Regiones del Maule, del Bio-Bio y de la Araucanía, que son aquellas en las que se desarrolla la mayor parte de la industria forestal del país y donde se concentra la mayor cantidad de superficies de plantaciones forestales (GTZ 2008).

*d) A nivel de Europa*

La Comisión Económica para Europa (CEPE) sugiere que el consumo de combustible de madera en Europa podría llegar a duplicarse (un incremento de 430 millones de metros cúbicos) en 2030 si se promoviera el uso de la bioenergía de base agroforestal (ONU 2011b).

Se espera que las tendencias y perspectivas relativas a la demanda de bioenergía de base agroforestal en Europa tengan un mayor crecimiento con respecto a la producción de calor y energía (que, a su vez, incluye la combustión mixta con otros combustibles) (PBCyL 2010, FAO 2012)

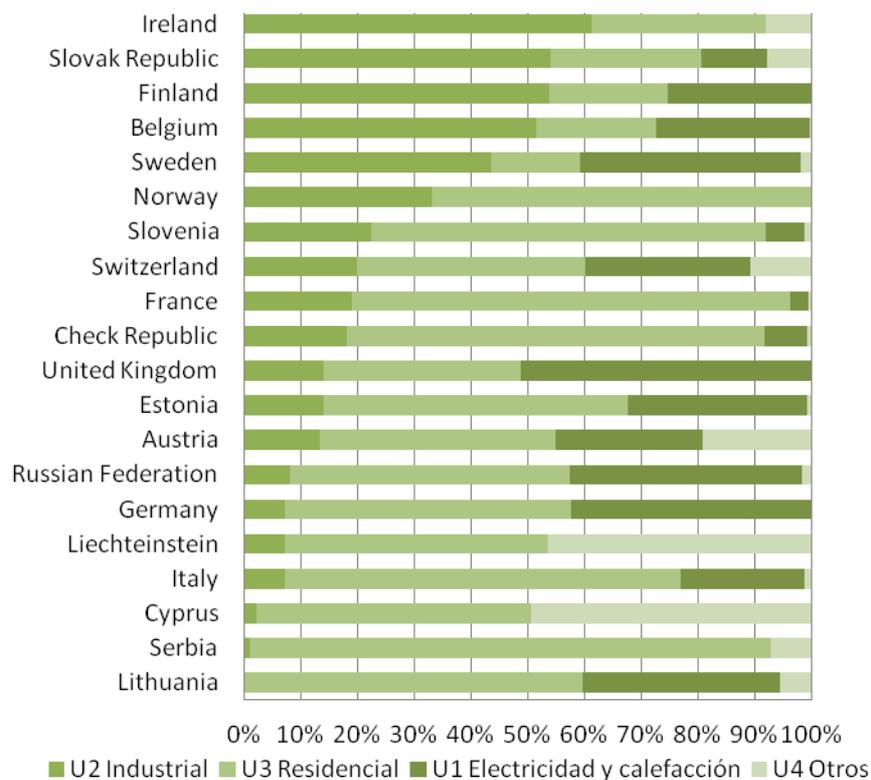
**Tabla 2.** Producción potencial de biomasa en Europa 2010 -2030

Tipo de biomasa	Consumo de biomasa		
	2010	Potencial 2020	Potencial 2030
Madera de bosques (y residuos)	43	39-45	39-72
Residuos orgánicos, de la industria maderera, agrícola y alimentaria, estiércol	100	100	102
Cultivos energéticos	43-46	76-94	102-142
<b>TOTAL</b>	<b>186-189</b>	<b>215-239</b>	<b>243-316</b>

Fuente: European Environmental Agency- EEA (2005)

La seguridad del suministro de energía y la producción sostenible de energía renovable conducen a una mayor utilización de madera para la generación de energía. Es probable que este cambio se acelere ulteriormente hasta 2020 y con posterioridad debido a los objetivos, ambiciosos y vinculantes, fijados por los 27

Estados miembros de la UE en relación con la energía procedente de fuentes renovables. El desafío consiste en garantizar no solo la disponibilidad de la madera, sino también su procedencia de bosques ordenados sosteniblemente (TFD 2008, FAO 2012).



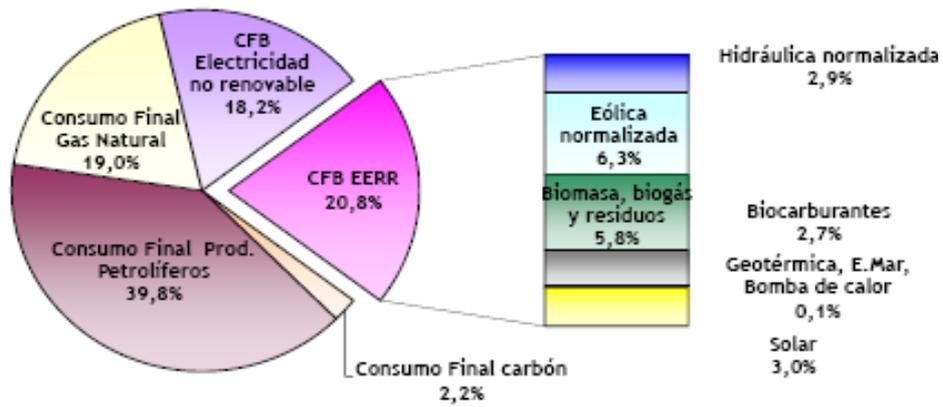
**Figura 12.** Uso de la biomasa para la energía y su distribución por sectores económicos en Europa (Glosario en Anexo2, FAO 2011a)  
Fuente: FAO (2011a)

Asimismo, la acumulación de biomasa forestal en Europa (debida, en parte, a la baja demanda de madera de pequeñas dimensiones en la última década) ha creado un recurso de biomasa adecuado para el uso energético y que aumentaría la viabilidad económica del aclareo forestal (ENERSILVA 2008, FAO 2012).

*e) A nivel de España*

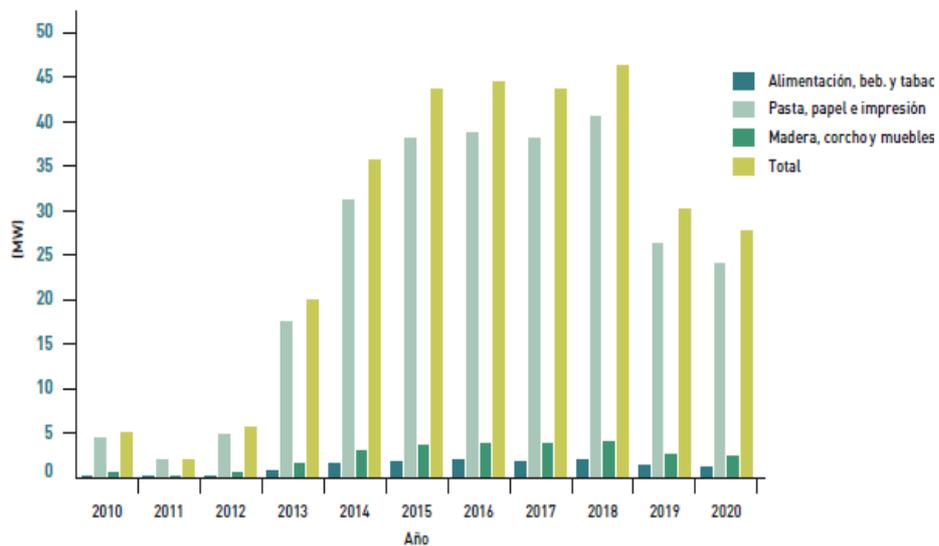
La Ley 2/2011, de 4 de marzo, de Economía Sostenible, en su artículo 89.2.h ha reconocido la importancia de este desarrollo al prever que las Administraciones Públicas, entre ellas también las Entidades Locales, fomenten “el uso de la biomasa forestal en el marco de la generación de energía de fuentes de origen renovable”. Esto supone sin duda un reto y un deber para todas las administraciones; pero debido a la estrecha relación entre este recurso y el territorio, esto es especialmente relevante para las administraciones municipales.

En otra línea, pero también de interés e importancia, en el Real Decreto 1274/2011, de 16 de septiembre, por el que se aprueba el Plan estratégico del patrimonio natural y de la biodiversidad 2011-2017 se ha incluido una nueva acción en el desarrollo del uso energético de la biomasa agroforestal. En una primera estimación, la aportación de las energías renovables al consumo final bruto de energía sería del 22,7% en 2020 —frente a un objetivo para España del 20% en 2020—, equivalente a unos excedentes de energía renovable de aproximadamente de 2,7 millones de toneladas equivalentes de petróleo (tep). Como estimación intermedia, se prevé que en el año 2012 la participación de las energías renovables sea del 15,5% (frente al valor orientativo previsto en la trayectoria indicativa del 11,0%) y en 2016 del 18,8% (frente a al 13,8% previsto en la trayectoria).



**Figura 13.** Proyección del consumo final bruto (CFB) de energías renovables para el 2020 en España.

Fuente: Gobierno de España (2012)



**Figura 14.** Incremento de potencia de cogeneración con biomasa en España

Fuente: PANER (2010)

Por lo que según la figura 14 se obtiene un incremento de potencia de 299 MW para el año 2020.

En el sector de los residuos, se espera un incremento en la producción de combustible a partir de desechos (recuperación de combustible sólido), así como un aumento de las aplicaciones energéticas de este en unidades de cogeneración (IDAE 2012).

Como se señala en el PANER (2010), las aplicaciones tradicionales de la biomasa para usos térmicos constituyen en España una utilización secular de esta energía, mientras que las ligadas a la producción de electricidad se han desarrollado, básicamente en las dos últimas décadas. La biomasa ha experimentado unos desarrollos inferiores a los fijados por el PER hasta 2010, ya que persisten importantes barreras a su uso (dificultad de aprovisionamiento regular en cantidad y calidad de biocombustibles, costos logísticos, economías de escala, balances energéticos y de carbono, etc.).

Actualmente los esfuerzos industriales a mediana y gran escala no pueden basar su insumo en biomasa de origen forestal, debido a la dificultad de su aprovisionamiento regular y a los costos logísticos. Ello lleva a que estos modelos empresariales no suponen un consumo estable de biomasa forestal que pueda dar lugar al nacimiento de un mercado consolidado que de confianza para el establecimiento de las empresas necesarias para el almacenamiento y la preparación de la biomasa forestal residual, es decir, para el desarrollo de todo el sector de bioenergía de base forestal. Precisamente este hecho es lo que ha llevado en el PANER 2011-2020 a revisar a la baja los objetivos demasiado ambiciosos que se planteaban en el PER 2005-2010.

La experiencia acumulada durante los últimos años, así como experiencias en otros países de nuestro entorno, demuestran que únicamente se pueden

considerar como económica y ecológicamente viables los modelos de desarrollo a nivel local y/o comarcal, basados en sistemas subsidiarios de gestión de la biomasa forestal. Planes de aprovechamiento derivados de proyectos de ordenación forestal a nivel local/comarcal pueden garantizar el aprovechamiento sostenido de un mínimo de biomasa para el establecimiento de una planta de pequeña o mediana escala (entre 1 y 4 MW) y el consiguiente desarrollo de las estructuras empresariales y de negocio necesarias en los municipios/comarcas forestales con capacidad de desarrollo: empresas de gestión forestal, empresas de trabajos y logística forestales, plantas de generación de energía térmica y/o eléctrica, plantas de generación de biocombustibles sólidos, empresas de distribución de la energía, empresas instaladoras de calderas domésticas, etc. (REMUFOR 2011).

Con todo ello se pueden identificar los siguientes aspectos clave que necesitan de soluciones prácticas para poder favorecer en el futuro el desarrollo sostenible de la cadena de valor de la bioenergía de base agroforestal en España:

- i. A nivel de planificación, las administraciones forestales de las Comunidades Autónomas deberían definir planes zonales, con el fin de identificar zonas prioritarias de desarrollo de sistemas de valor monte-energía. En estas zonas, las administraciones autonómicas deben favorecer el desarrollo de proyectos de ordenación forestal orientados a biomasa, sobre todo en zonas donde la propiedad municipal forestal sea importante y futura base de aprovisionamiento a la planta de generación energética (REMUFOR 2011).
- ii. A nivel operativo, tenemos que tener en cuenta que el sistema de aprovechamiento regular de un mínimo de 20.000-30.000 t/año debe ser

garantizado en una zona con un radio de no más de 20-25 Km. por un período mínimo de 20 años. Sólo con estas premisas resueltas, inversores privados pueden afrontar el reto de lanzar el proyecto de planta energética. Esto se debe anclar en planes de aprovechamiento biomásico derivados de proyectos de ordenación forestal de los montes de U.P. a nivel municipal y/o comarcal. El principio de subsidiaridad debe ser favorecido por las administraciones de las Comunidades Autónomas, permitiendo a las entidades locales (o asociaciones de municipios en una misma zona) con interés, propiedad forestal municipal y capacidad técnica desarrollar sus propios planes de gestión forestal de forma subsidiaria. (Martí 2011, Monllor 2012).

- iii. Asimismo, el propietario privado debe ser favorecido por la Administración para poder extraer biomasa forestal residual de sus montes. Para crear un mercado estable de biomasa forestal residual sería conveniente establecer una prima a la producción que estimule el aprovechamiento del residuo por parte de los propietarios forestales para ponerlo en el mercado a unos precios competitivos. Esta prima a la producción estaría basada en criterios de sostenibilidad para evitar impactos negativos sobre el medio ambiente. (COSE 2012).
- iv. Para poder garantizar la eficacia, eficiencia y competitividad de los trabajos forestales para la extracción de los productos biomásicos, las empresas forestales de la zona deben aplicar o desarrollar métodos avanzados de trabajo forestal según tipo de masa o estrato forestal (clareos, desembosques, claras, podas y cortas finales) y de aprovechamiento (integral, árbol completo o mixto por descope) mediante sistemas de mecanización y astillado apropiados (Martí 2011).

- v. Los operadores logísticos de la zona – que pueden coincidir con las empresas de trabajos forestales o no -, deben desarrollar sistemas avanzados de logística entre el monte y la planta. Centrales de clasificación cualitativa y dimensional de la astilla, sistemas mecánicos de carga y descarga en camión o sistemas multilift de astillas deben contribuir a optimizar el precio de la astilla en planta, que no debe exceder de 45-50 €/t al 20% de humedad (Tolosana 2009, Agudo 2010).
  
- vi. Las plantas de biomasa CHP necesitan de instalaciones básicas en suelo industrial, así como un punto de evacuación de la energía eléctrica producida. La energía térmica producida deber ser también aprovechada, lo que no siempre resulta sencillo en municipios de zonas rurales. Las posibilidades de valorización a escala local pasan por infraestructuras instaladas como *district heating* o *industrial heating*, por abastecimiento de calor a edificios públicos (ayuntamiento, locales municipales, colegios, centros de salud, etc.), a empresas colindantes o, incluso, a una línea paralela de producción de biocombustibles sólidos (pellets o briquetas) (REMUFOR 2011).
  
- vii. El uso de biocombustibles de base forestal (astillas, pellets, briquetas) debe ser favorecido en las zonas forestales, no sólo por su eficiencia energética y sostenibilidad, sino también por el efecto tractor para potenciar su uso y consumo. Para ello se debe potenciar el desarrollo de mezclas óptimas para pellets según el tipo de biomasa forestal. También se de potenciar la demanda en base a instalación de calderas a nivel municipal y doméstico, fundamentalmente en las zonas forestales donde se instale la planta (CDB 2010).

viii. A medio y largo plazo, la biomasa extraída del monte debería ser complementada con astilla proveniente de cultivos energéticos leñosos. Ello conllevaría un efecto doble: por una parte la posibilidad de ampliar la producción de la planta y por la otra la puesta en valor de tierras agrícolas abandonadas y el consiguiente desarrollo integral del sistema agro-forestal en zonas rurales de España (IDAE 2007).

### *f) A nivel de la Comunidad Valenciana*

En el medio rural concurren estrategias y planes, cada uno con unas medidas concretas distintas pero el objetivo común del desarrollo rural: el Programa de Desarrollo Rural de la Comunitat Valenciana, y ahora el PATFOR son los principales planes que se superponen en el mismo territorio, pero no son los únicos (PATFOR 2011). Cabe citar, el “Plan Estratégico de Infraestructuras 2010-2020” de la Comunidad Valenciana, en el que se recoge que el 12 % de las energías primarias ha de proceder de las energías renovables (PIE 2011). En la Comunidad Valenciana también se incluyen medidas concretas sobre el desarrollo rural en el Plan de Igualdad de Oportunidades entre mujeres y hombres que es una circunstancia propicia para los habitantes del medio rural de ser el foco de todas estas políticas, ya que cada una desde la diversidad de enfoques, colabora a construir un nuevo marco de oportunidades para el desarrollo rural (PATFOR 2011).

Sin embargo, la coyuntura económica ha provocado, a partir del año 2009, una importante disminución de la financiación pública. Muchas de estas medidas, aparecen recogidas en los Planes Económico-Financieros de Reequilibrio 2012-2014 de las Comunidades Autónomas aprobado en el seno del Consejo de Política

Fiscal y Financiera (Real Decreto-ley 20/2012, de 13 de julio, de medidas para garantizar la estabilidad presupuestaria y de fomento de la competitividad).

Sin disponer de los programas presupuestarios completos, se puede precisar, que en el año 2009, el presupuesto correspondiente al Servicio de Gestión Forestal y el Servicio de Prevención de Incendios y Sanidad Forestal disminuyó aproximadamente un 25% en relación al año 2008, siendo las subvenciones, la línea de financiación más afectada con una reducción del 90% (PATFOR 2011). Por tanto, con un escenario a medio plazo, que augura pocos incrementos futuros de la inversión pública, se hace patente la necesidad de optimizar todas las fuentes financieras públicas relacionadas con el medio ambiente y desarrollo rural, así como movilizar la inversión privada mediante nuevas fórmulas y fuentes de financiación (EPI 2010, PATFOR 2011).

### **1.1.5 Programas de implementación de proyectos y conocimiento científico de biomasa agroforestal como fuente de energía**

#### *a) A nivel mundial y europeo*

En 1997, en Kyoto, la mayoría de la OCDE y los países con economías en transición se comprometieron a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero en al menos un 5% por debajo de los niveles de 1990 en el período 2008 -2012. La energía consumida en 1990 lanzó 22 Gt CO<sub>2</sub>. La biomasa leñosa crecida adecuadamente no contribuye al cambio climático debido a las emisiones de CO<sub>2</sub>. El sustituir los combustibles fósiles por biomasa renovable es una forma eficaz de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> (IPCC 2005).

Para atender las demandas de las plantas que utilizan la biomasa como fuente de energía alrededor del mundo, la mayoría de gobiernos y diversas organizaciones internacionales están impulsando estudios de inventario y valoración de los recursos forestales y agrícolas. Líneas de investigación para el análisis del aprovechamiento de biomasa para uso energético se están abriendo principalmente en Canadá, Estados Unidos, Alemania, Francia, Suiza, Austria (OECD/IEA, 2007).

A nivel mundial se pueden destacar algunos programas:

- Biomass Programm en Estados Unidos (USDE)
- Energy Wood Production Chains in Europe (ECHAINÉ): Desarrollado por:
  - Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Suecia
  - Centre for Research and Technology Hellas (CERTH / ISFTA), Grecia
  - University of Oulu (THULE Institute), Finlandia
  - Center for Renewable Energy Sources (CRES), Grecia
  - Escola Superior Agraria de Beja (ESAB), Portugal
  - Fraunhofer Institute for Factory Operation and Automation (Fhg-IFF), Alemania
  - Atos Origin, Francia/Holanda
  - Technical University of Sofia (CERDECEN), Bulgaria
  - Oskar von Miller - Conception Research and Design Institute for Thermal Power Equipment (OVM-ICCPET)
- BioXchange 2003-2005 EU funded project: Desarrollado por Suecia, Alemania, Holanda y Polonia

Asociaciones promotoras de investigaciones análogas o tangenciales a las planteadas son:

- European Biomass Association (AEBIOM)

Grupo de asociaciones nacionales del estudio de la biomasa, fundado en 1990.

- International association of bioenergy professionals and users (ITEBE)

Fundada en 1997, es una asociación internacional de profesionales que actúa como herramienta de promoción y apoyo a proyectos del sector de la bioenergía, principalmente empresas y comunidades. Básicamente trabaja con madera energética

- IEA Bioenergy

Es una organización fundada en 1978 por la International Energy Agency (IEA) con el propósito de mejorar la cooperación e información entre países que tienen programas nacionales de investigación, desarrollo y empleo de bioenergía

También la Estrategia Forestal Europea y el VII Programa Marco de la Unión Europea lo establece como línea prioritaria, así como la Agenda Estratégica de Investigación de la Plataforma Forestal Europea.

Una gran cantidad de biomasa residual con posible destino energético puede ser extraída de la gestión de los cultivos energéticos forestales de la zona mediterránea, como complemento al aprovechamiento de la biomasa residual de origen forestal y/o agrícola.

### *b) A nivel regiones mediterráneas*

En el caso europeo, en 2007, el Consejo Europeo adoptó un objetivo vinculante para las Fuentes Renovables de Energía (FRE) a 20% del consumo final en 2020. La Comisión Europea propuso por primera vez un objetivo de energía renovable, no sólo para la electricidad o biocombustibles a partir de fuentes renovables.

La industria y los residuos de aprovechamiento forestal se han convertido en objetivo de valorización energética se propone en los países desarrollados. Residuos industriales ya están en su mayoría utilizados para cogenerar calor y electricidad en la industria forestal: los licores negros (industria de la celulosa), así como los residuos de corteza y otros. Incluso los materiales nobles aserrín y otros se pelletizan para darles más valor añadido y que su uso para la generación térmica sea más fácil para los consumidores finales (Lehtikangas 2001, AEBIOM 2007). En la zona mediterránea de Europa, los residuos de aprovechamiento forestal, ramas, copas y madera residual que no se ha utilizado anteriormente para usos industriales o doméstico tienen problemas de altos costos de extracción, y su producción es estacional, lo que crea problemas de suministro para el consumidor potencial final en las plantas de energía (Torres Rojo 2004, Sanz y Piñeiro 2004).



**Figura 15.** Ciclo de vida de la madera y contribución de su uso integral a la mitigación del cambio climático  
Fuente: AIDIMA (2011)

El ciclo de vida de la madera y sus productos es un ciclo cerrado en el que la producción de materia prima, pasa al proceso de transformación, de ahí a su utilización y por último puede ser reciclada, recuperada o valorizada. En todos y cada uno de estos pasos el respeto al medioambiente y las sostenibilidades es una máxima para el sector. Este ciclo es muy claro en el caso de su contribución al cambio climático en el que el carbono liberado en algunos casos al final de la vida útil de los productos de madera es el mismo que había sido previamente fijado en las masas forestales (CONFEMADERA 2009).

Con el fin de hacer que el suministro más estable, cultivos energéticos se han sugerido como una fuente de biomasa complementaria (AEBIOM 2009). Tienen algunos problemas relacionados con los altos costos de establecimiento y la difícil mecanización de la cosecha (Tolosana *et al.* 2010).



**Figura 16.** Cosecha de un cultivo energético mediante tractor  
Fuente: Elaboración propia

La calidad de biocombustibles de cultivos leñosos de rotación corta es significativamente mayor que este de cultivos herbáceos, la producción de biomasa es lo suficientemente alta para la mayoría de las especies de crecimiento rápido, y los costos de establecimiento puede ser reducida debido a los ciclos de plantación son más largos (varios años) (Rodríguez -Soalleiro 2010).

De acuerdo a Ortiz *et al.* (2010), la mayoría de las especies utilizadas para el SRC ("*short rotation coppice*") son sauces y álamos, densamente plantados, la primera en Europa Central y del Norte, mientras que *Populus spp.* parecen tener un mayor potencial en la cuenca del Mediterráneo. *Robinia pseudoacacia* y especies de *Pawlonia spp.* han sido usadas - incluso en experiencias industriales - en algunas zonas del centro y sur de Europa. Facciotto (2008) evalúa el área de cultivos energéticos de *Salix spp.* en Europa con 15.000 hectáreas en Suecia, 1.175 en el Reino Unido, 24.000 y en Rumania. En el caso de *Populus spp.*, sus estimaciones alcanzan 5.350 ha en Italia, además de 500 hectáreas plantadas con *Robinia pseudoacacia* en el mismo país.

En la zona del Mediterráneo, las especies de *Eucalyptus spp.* han sido probados como los cultivos energéticos, principalmente en Italia, Grecia, Portugal y España (Ortiz *et al.* 2010). Sin embargo, la información publicada sobre el rendimiento de biomasa de eucalipto de alta densidad de monte bajo de corta rotación es todavía escaso. Ceulemans *et al.* (1996) estudiaron las plantaciones de muy alta densidad en Grecia por 2 rotaciones años, en tierras fértiles de cultivo, se obtuvieron 25,5 t verdes/ha/año para 20.000 árboles/ha, densidad, y sólo 10,4 t verdes/ha/año en suelos pobres, por 10.000 árboles/ha - la densidad de plantación. En Portugal, Pereira *et al.* (1996) obtuvieron rendimientos altos - de 16 a 21 t/ha/año de entre 20.000 y 40.000 árboles/ha, densidades de plantación -. En el norte de España, varias empresas de celulosa y energía hicieron ensayos en los años noventa con SRC eucalipto de alta o muy alta densidad, pero los resultados no se publican. En consecuencia, a Ortiz *et al.* (2010), los principales factores tales como el efecto de la densidad de plantación y la rotación en la brotación capacidad de los cultivos no se han estudiado todavía.

En la cuenca mediterránea de Europa, se ha producido un fuerte debate en torno a la conveniencia de maximizar el rendimiento en densidades muy altas y las rotaciones cortas, a pesar de las operaciones de cosecha más caros que utilizan como forraje modificados - y las dificultades esperadas de crecimiento en las rotaciones adicionales - frente a la utilización de densidades de plantación menores con edades de rotación más largos, a fin de que las operaciones de extracción más barata y con menor impacto ambiental, incluso el uso de maquinaria forestal, tales como jefes de recolección acumulativas (Tolosana 2009, AEBIOM 2009). La primera alternativa - 2 años edad de rotación, la densidad de plantación más alta de 3.500 árboles ha - ha dado en llamar el modelo europeo para el caso del álamo (Spinelli y Nati 2007, Tolosana *et al.* 2010.) Mientras que el segundo - edad de rotación cerca a 5 años y la densidad de plantación de 3.000

árboles bajos/ha-ha sido referido como "modelo americano" en el caso de *Populus spp.* o *Salix spp.* como cultivos energéticos (Dopazo *et al.* 2008).

En España, el coste de *Populus spp.* SRC oscila desde 190 €/ha/año (cosecha por prensado) a 210 €/ ha/año (cosecha de chipping) con rotación cada tres años (un 15 años, cinco ciclos de rotación), excluyendo costos de riego que son muy variables en función del coste y los requisitos de agua y el tipo de riego. Por lo tanto, sólo es adecuada para zonas de producción muy altas (alrededor de 30-35t/ha). En consecuencia, los costos de producción de biomasa de *Populus spp.* en España puede estimarse en 20-40 €/t de biomasa seca (Carrasco y Sixto 2007). En resumen, se puede decir que, con bajos costos de inversión, los rendimientos buenos, y los ingresos relativamente altos por hectárea, SRC puede ofrecer márgenes de beneficio satisfactorios después de unos períodos de rotación. Para amortizar los altos costos de inversión, altos rendimientos y ganancias elevadas durante un largo tiempo de vida de una plantación de SRC son necesarios. Además, el reciente aumento de los precios mundiales de los cereales es probable que haya alterado el equilibrio en la dirección de los cultivos alimentarios anuales (MARM 2010).

## 1.2. ESTADO DEL ARTE

### 1.2.1 Clasificación de recursos biomásicos de origen agrícola y forestal en condiciones mediterráneas

Atendiendo a su definición, la biomasa leñosa primaria a nivel mundial se clasifica de la siguiente forma según su procedencia basándose en la indicada por la *Unified Wood Energy Terminology* (FAO 1998):

- a) Combustibles de madera: En esta categoría se incluyen todos los tipos de biocombustibles derivados directa o indirectamente de los árboles y arbustos que crecen en tierras forestales y no forestales.
  - i. Directos: Madera extraída directamente de masas forestales, procedente de tratamientos silvícolas tales como clareos, podas, prevención de plagas, etc.



**Figura 17.** Cosecha de trozas delgadas de coníferas para uso energético mediante procesadora y tractor autocargador  
Fuente: Elaboración propia

- ii. Indirectos: Subproductos industriales derivados de industrias primarias de la madera (aserraderos, fábricas de tableros de partículas, plantas de fabricación de pasta de papel) y secundarias (ebanistería, carpintería), tales como residuos del aserrado, restos del canteado y el escuadrado, aserrín, virutas y astillas, licor negro, etc.



**Figura 18.** Acopio de desechos provenientes de aserraderos  
Fuente: Elaboración propia

- iii. Recuperados: Biomasa leñosa derivada de todas las actividades económicas y sociales ajenas al sector forestal, como desechos de la construcción, demolición de edificios, contenedores, cajas de madera y otros que se queman tal cual están o se transforman en astillas, pellets, briquetas o polvo.



**Figura 19.** Acopio de desechos de madera de diverso origen  
Fuente: AVEBIOM (2010)

- b) Agrocombustibles: Combustibles obtenidos como productos de la biomasa y subproductos agrícolas. Consisten principalmente en la biomasa derivada de los subproductos agrícolas y agroindustriales.
- i. Subproductos agrícolas: Se trata principalmente de material y subproductos vegetales derivados de la producción, cosecha, transporte y elaboración en zonas agrícolas. Esta categoría comprende, entre otros, mazorcas y tallos de maíz, tallos y cáscaras de trigo, etc.
  - ii. Subproductos agroindustriales: Subproductos de la elaboración de alimentos, como cáscaras de arroz, cáscaras de maní, residuos del prensado de la oliva y la uva, etc.

Para Pontt (2008) las fuentes biomásicas para la combustión y cogeneración son:

- a) Desechos de plantaciones forestales, principalmente fuste, ramas y cortezas.
  
- b) Desechos madereros originados en la industria de la madera tales como lampazos, aserrín, despuntes, viruta y corteza.
  
- c) Se consideran los desechos orgánicos provenientes de los cultivos de cereales maíz, trigo y cebada. Estos pueden destinarse alternativamente a la producción de biogás y a la producción de biocombustibles líquidos.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que en un país con clima Mediterráneo como España la orografía de fuertes pendientes (p.e. Comunidad Valenciana, Baleares y Cataluña) no facilita la movilización de la biomasa forestal residual proveniente del bosque; pendientes superiores al 30-35% hacen difícil y costoso el aprovechamiento silvícola (Vilaseca i Pradòs 2010). Esto hace necesario la realización de diversos estudios para un posterior aprovechamiento de otras fuentes biomásicas leñosas como lo son los cultivos agrícolas (frutales) y plantaciones dendroenergéticas.

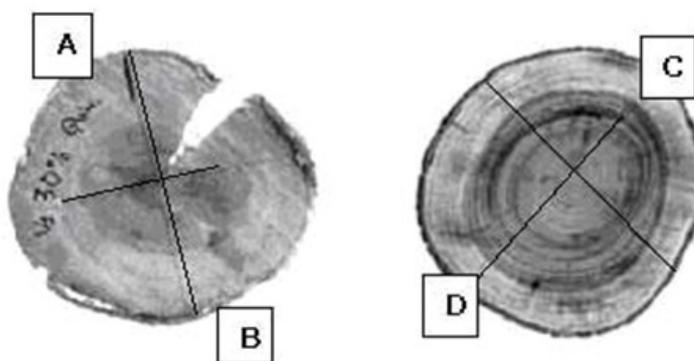
### **1.2.2 Caracterización morfológica de la biomasa de origen agroforestal**

#### *a) Porcentaje de albura y duramen*

El duramen y la albura presentan diferencias anatómicas, estructurales y químicas afectando estas diferencias los procesos industriales (Bamber y Fukazawa 1985).

Entre las propiedades y características de la madera que más afectan la calidad de los tableros se encuentran la densidad y la composición química. La densidad de la

madera y la composición química son, a su vez, características que cambian al pasar de madera de albura a duramen (Pelen *et al.* 1998). La acidez y el contenido de extraíbles también son factores importantes de considerar (Poblete y Sánchez 1991).



**Figura 20.** Discos del fuste de *Eucalyptus globulus* (izquierda) y *Acacia melanoxylon* (derecha) mostrando la marcación de un diámetro sin corteza (A-B) y un diámetro de duramen (C-D)  
Fuente: Monteoliva *et al.* (2012)

En las maderas duraminizadas se produce una serie de modificaciones, aparte de la muerte de las células parenquimáticas. Estas dicen relación con: la durabilidad natural, la permeabilidad, la oclusión de las punteaduras en coníferas, la formación de tílides en latifoliadas, modificación de la composición de las sustancias volátiles y modificaciones en la composición y proporción de compuestos accesorios (Díaz-Vaz 2003).

Al fabricar tableros de partículas con madera de albura y duramen se ha demostrado que existen diferencias en la calidad de los tableros obtenidos (Lelis *et al.* 1993; Dix y Roffael 1995).

Pelen *et al.* (1998) estudió el efecto de la madera de duramen y albura de *Acacia melanoxylon* sobre las propiedades de tableros de partículas, determinando que el duramen presenta un mayor contenido de extraíbles y un menor valor de pH que la albura. A medida que se incrementa la cantidad de duramen se mejoran las propiedades, salvo en el caso de tracción. Los tableros con 100% de duramen presentaron los mayores valores de módulo de rotura (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE) y los menores valores de hinchamiento y absorción de agua.

### b) Porcentaje de corteza

Las alteraciones más importantes que se producen al incorporar corteza, reemplazando a la madera, están relacionadas con la estructura anatómica y la composición química de este material (Poblete y Sánchez 1991).



**Figura 21.** Corteza y madera de un disco de *Quercus ilex*  
Fuente: Elaboración propia

La corteza se compone de dos capas: una capa interna fisiológicamente activa y una capa externa inerte de protección, usualmente de color oscuro, formada por células floemáticas muertas (Esau 1959, Moslemi 1974) y se diferencia de la madera tanto por su morfología y, de forma muy importante, por su composición química (Poblete y Roffael 1985).

Las propiedades de la corteza presentan amplias variaciones entre árboles y entre especies.

La cantidad de corteza en la madera rolliza varía apreciablemente con el tamaño de los trozos (Poblete y Sánchez 1991). En general, al aumentar el diámetro la proporción de corteza se reduce, y se ha determinado para pino insigne que corresponde en promedio al 10% del volumen (Martínez 1984) y son de densidad baja a intermedia (Martin y Crist 1968, Martin 1969, Cassens 1974). El peso específico de la corteza de tres especies del género *Pinus* (*P. ponderosa*, *P. lambertiana* y *P. jeffreyi*) varía entre 0,27 y 0,36. La corteza interna tiene una densidad mayor que la corteza externa, lo cual puede deberse a que está formada por células vivas y a la presencia de sustancias alimenticias (Cassens 1974).

Según Poblete y Sánchez (1991) el efecto de la inclusión de corteza sobre las propiedades físicas, las conclusiones de los diferentes trabajos no son coincidentes. Muszynski y McNatt (1984) señalan que al aumentar el contenido de corteza se provoca un aumento en los valores de estas propiedades. Lehmann y Geimer (1974), y Calvé *et al.* (1986) destacan que la estabilidad dimensional se ve disminuida cuando el nivel de corteza supera el 12%. Por lo que Poblete y Sánchez 1991 estudiaron el efecto de inclusión de *Pinus radiata* D. Don en la elaboración de tableros de partículas concluyendo que:

- i. Al agregar corteza desmejoran el aspecto y las características superficiales de los tableros.
- ii. La inclusión de corteza tiene un efecto positivo sobre las propiedades físicas. Los tableros con menos de 55% de corteza no cumplen los

requisitos de la norma DIN 68763. Estos últimos pueden ser mejorados agregando un aditivo hidrófobo.

- iii. Las características anatómicas de la corteza provocan una reducción de las propiedades mecánicas. La ausencia de elementos fibrosos longitudinales tiene un efecto significativo sobre la resistencia a la flexión y la resistencia a la tracción. Al evaluar las resistencias según la norma DIN 68763, la más restrictiva resulta ser la flexión estática, según la cual el nivel de corteza no debe superar el 10% del peso del tablero.
- iv. Finalmente, en el caso de considerar el límite de la norma para tracción podría incluirse hasta un 40% de corteza en los tableros.

Ahora, en el uso de corteza para la producción de pellets Filbakk *et al.* (2011) realizaron un estudio de pellets a partir de corteza, señalando que la corteza pura tenía mejores propiedades mecánicas en comparación con pellets de madera que contenía diversas concentraciones de corteza. Las diferencias no fueron importantes y la durabilidad estaba en la misma categoría de calidad en la norma EN 14961-2. Siendo un efecto positivo de la cantidad de vapor añadido. Las densidades aparentes de los pellets de mezcla fueron superiores a las de la madera pura y corteza. El contenido de cenizas aumentó con la cantidad de corteza en los pellets. Rhén *et al.* (2007) señalan que los pellets hechos de corteza tenían hasta un 50% de tiempo de combustión más largo en comparación con la de los pellets de madera del fuste, debido a diferencias en rendimiento de contenido de carbón. Los pellets fabricados industrialmente de aserrín de madera de fuste de pino y abeto se encontraron que tenían pequeñas diferencias en las características de combustión.

De esta manera Lehtikangas (2011) concluye que la corteza y residuos de la cosecha forestal son materias primas adecuadas para la producción de pellets, especialmente si el contenido de cenizas se controla.

A pesar de todo este conocimiento científico acumulado durante los últimos años, no disponemos en la actualidad de conocimiento suficiente sobre la evolución del duramen en especies leñosas mediterráneas. Tampoco de la influencia que la proporción y madurez del duramen de la biomasa a aprovechar pueda tener sobre el poder calorífico o, incluso, como material en la composición de tableros de partículas. Con respecto a la corteza, si bien existen estudios que determinan su influencia de esta en el contenido de tableros de partículas y la producción de pellets, éstos se limitan a las materias primas obtenidas de especies forestales tradicionales, no existiendo información al respecto de las especies forestales latifoliadas mediterráneas, cultivos energéticos o cultivos leñosos agrícolas.

### **1.2.3 Caracterización física de la biomasa de origen agroforestal**

#### *a) Determinación de la humedad*

La madera de árboles recién cortados presenta un alto contenido de humedad (H%) que varía según la especie, la estación del año, la región geográfica y el lugar de crecimiento del árbol (Albin y Jaramillo 1980).

**Tabla 3.** Variación estacional del contenido de humedad en especies forestales (%)

<b>Especies arbóreas</b>	<b>Primavera (H%)</b>	<b>Verano (H%)</b>	<b>Otoño (H%)</b>
<i>P. halepensis</i>	112.9	58.1	111.1
<i>Q. coccifera</i>	76.4	35.1	80.5
<i>P. lentiscus</i>	113.3	43.8	104.9
<i>A. unedo</i>	113.7	57.8	114.4
<i>P. latifolia</i>	82.5	54.2	79.7
<i>C. incanus</i>	125.1	49.3	171.0
<i>E. manipuliflora</i>	88.3	43.6	106.0

Fuente: Liodakis *et al.* (2011)

La tabla 3 muestra el alto porcentaje de humedad de las especies, como consecuencia de las lluvias intermitentes y temperaturas suaves características de las zonas Mediterráneas (Sabater *et al.* 2008, Giorgi y Leonello 2008). Como era de esperar, todas las especies forestales absorben menos humedad durante el período de verano, seguido de otoño y primavera Liodakis *et al.* (2011).

En la industria, el rango ideal del CH para el viruteado de la madera destinada a la fabricación de tableros de partículas es, según Kollmann (1959) y FAO (1968) entre 30 y 50%. Entre estos límites, el consumo de energía es bajo, el porcentaje de polvo es pequeño y el consumo de combustible necesario para el secado no es excesivo.

#### b) *Determinación de densidad*

Una propiedad fundamental a analizar en cualquier especie es la densidad básica de la madera, definida como el peso de la madera seca (anhidra) dividido por su volumen verde, es decir por encima del punto de saturación de la fibra (H%  $\geq$

30%) (Kollman 1959, INFOR-CONAF 1997, Zobel y van Buijtenen 1989, Zobel y Jett 1995, Downes *et al.* 1997).

La densidad básica de la madera depende de varios factores (Libby 1969), muchos de ellos propios de cada especie y otros relacionados con el medio ambiente (Prado y Barros 1989), según las características de la madera como: tipos de células, diámetros de lúmenes y espesor de las paredes celulares. Además otras características como el contenido de extraíbles inciden también en la variación de esta propiedad (INFOR-CONAF 1997, Zobel y Van Buijtenen 1989, Downes *et al.* 1997). En términos generales, conocer los patrones de variación de la densidad básica es importante para definir la utilización más adecuada de la madera (Tomazello 1985) y, además, para conocer el grado de homogeneidad de la materia prima que se entrega a la industria forestal maderera (Quilhó *et al.* 2006).

La densidad depende del tamaño de los vasos y de la cantidad de los mismos, del espesor de la pared, del diámetro de las fibras y de la composición química de la madera, de tal forma que dos maderas con densidades similares pueden ser muy distintas en cuanto a las características anteriores (Villena, 2003).

Además, la densidad es el descriptor primario de mayor importancia en numerosas propiedades tecnológicas, independientemente si el objetivo es producción de madera sólida o pulpa (López *et al.* 2003).

Entre las especies la densidad varía de 0,2 a 1,3 g/cm<sup>3</sup> como valores extremos (Delmastro *et al.* 1980, Downes *et al.* 1997). Existen diferentes experiencias al respecto en distintas especies forestales, por ejemplo Rodríguez y Vergara (2008) determinaron que *Pinus canariensis* alcanzó 0,503 g/cm<sup>3</sup> a 12% de humedad, Nicholas *et al.* (1994) y Haslett (1989) encontraron para *Acacia melanoxylom* una

densidad básica de  $0,471 \text{ g/cm}^3$  a  $0,593 \text{ g/cm}^3$  y una densidad verde de  $0,972 \text{ g/cm}^3$  a  $1,04 \text{ g/cm}^3$ . Para Davel *et al.* (2005) en *Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco la densidad básica media de la madera madura para la población analizada fue de  $0,381 \text{ g/cm}^3$ . Por último, Omonte y Valenzuela (2011) determinaron la variación radial y longitudinal de la densidad básica de la madera, a lo largo del fuste, fueron determinadas en árboles de una plantación de *Eucalyptus regnans* de 16 años donde la densidad disminuyó levemente, desde la médula ( $0,403 \text{ g/cm}^3$ ) hasta aproximadamente el 15% del radio ( $0,390 \text{ g/cm}^3$ ), para luego aumentar fuertemente hacia la periferia ( $0,457 \text{ g/cm}^3$ ).

Algunos estudios también demuestran la influencia del régimen de crecimiento sobre la densidad de la madera. Así Oliver-Villanueva *et al.* (1996) y Oliver-Villanueva y Becker (1993) demuestran para frondosas de vasos agrupados que crecimientos diametrales acelerados y mayores espesores de anillos de crecimiento llevan a un aumento de la densidad e la madera. Por el contrario, las coníferas se comportan de forma totalmente opuesta (Hapla *et al.* 2000). Las frondosas de vasos difusos no muestran una relación significativa entre el espesor medio del anillo de crecimiento y la densidad de la madera (Sachsse y Oliver-Villanueva 1991).

Algunos autores señalan que la densidad influye en el volumen de material a compactar, en el consumo de adhesivo, en las propiedades de resistencias mecánicas y en el acabado superficial del tablero (Vital *et al.* 1974). En otras palabras, el volumen de madera a incorporar en un tablero, para una densidad determinada, varía dependiendo de la densidad de la materia prima (Poblete 2001). Este antecedente es de consideración en el sentido de que al usar materias primas de baja densidad resultan tableros de mayor estabilidad dimensional (Peredo y Lizama 1993).

Si bien existen estudios que determinan la densidad de las especies forestales mediterráneas, específicamente para encina (Voulgaridis 1993, CPF 2004, CREAMAH 2011), también los hay para cultivos energéticos como *Populus spp.* (Díaz *et al.* 2002, Jovanoski 2011) y para *Paulownia spp.* (Hakan-Akyildiz y Sahin-Kol 2009, Sobhani *et al.* 2011) no está especificado en qué condiciones fueron muestreadas, tampoco la edad, tipo de muestra (fuste, ramas, con o sin corteza), etc. Un caso muy distinto es el que ocurre en los cultivos agrícolas leñosos donde información sobre densidad de la madera en cultivos agrícolas leñosos ha sido tratada por muy pocos autores como Fernández (2009) y Passialis y Grigoriou (1999) obteniendo éstos resultados muy dispares, por lo que resulta necesario establecer estos valores que serán utilizados posteriormente en este estudio.

### **1.2.4 Caracterización química de la biomasa de origen agroforestal**

La madera está constituida fundamentalmente por materias orgánicas tales como: carbono (50%), hidrógeno (6,2%), oxígeno (43%) y nitrógeno (0,1%) (EN 14918). Los elementos fundamentales de la madera al estar combinados con otros, forman en general dos grupos de sustancias, las que conforman la pared celular, donde se encuentran las principales macromoléculas, celulosa, hemicelulosa (poliosas), lignina y también pequeñas cantidades de sustancias pécticas, que están presentes en todas las maderas; el otro grupo lo conforman las sustancias de baja masa molar conocidas también como sustancias extraíbles que se encuentran en menor cantidad (Browning 1967).

Anselmo Payen en 1838, fue la primera persona en reconocer la composición natural de la madera (Adler 1977). Encontró un tratamiento para la madera con

ácido nítrico con el que removía parte de la sustancia leñosa dejando a su paso un material fibroso al que llamo celulosa. También notó que el contenido de carbón en la madera era distinto al del material removido. A esta fracción rica en carbón que envolvía a la celulosa en la madera la llamó “la materia incrustante”; más tarde el concepto de lignina fue acuñado por F. Schulze en 1865. Sjoström (1993) menciona que en 1819 De Candolle ya había introducido el concepto de lignina derivado de la palabra latina lignum usada antiguamente para referirse a la madera.

Fengel y Wegener (1984), realizan una separación de los componentes químicos de la pared celular. Es así como describen por un lado a los principales componentes macromoleculares de la pared (celulosa, poliosas o hemicelulosas y lignina) y por otro a los componentes de bajo peso molecular (materia orgánica o extraíbles y sustancias minerales o cenizas). Esto obedece a que el primer grupo se presenta en todas las maderas y el segundo está más relacionado a maderas particulares y cuenta con variaciones cualitativas y cuantitativas. En todo caso, las proporciones y la composición química de la lignina y las poliosas difieren entre coníferas y latifoliadas, mientras que la celulosa es un componente uniforme en todas las maderas. Dentro de los componentes lignocelulósicos, la glucosa y la xilosa son los azúcares más importantes (Cullen y Kersten 1996).

La proporción de estos componentes varía con la especie, entre la madera de árboles de la misma especie y en diferentes partes del propio árbol, en la madera de la albura y duramen, en dirección radial y longitudinal. Así también, los parámetros edafoclimáticos influyen en la composición química, ya que se presentan diferencias entre maderas que provienen de zonas templadas con las que provienen de zonas tropicales. (Fengel y Wegener 1984).

**Tabla 4.** Porcentaje de participación de algunos componentes químicos en coníferas y latifoliadas

Componentes	Coníferas	Latifoliadas
Holocelulosa	59,8 – 80,9	71,0 – 89,1
Celulosa	30,1 – 60,7	31,1 – 64,4
Poliosas	12,5 – 29,1	18,0 – 41,2
Pentosas	4,5 – 17,5	12,6 – 32,3
Lignina	21,7 – 37,0	14,0 – 34,6
Extractivos	0,5 – 10,6	0,2 – 8,9

Fuente: Tsoumis (1982)

La materia inorgánica presente en la biomasa juega un papel importante en los diferentes procesos de utilización de esta materia prima alternativa. Al igual que en los combustibles fósiles sólidos, muchos efectos de los componentes inorgánicos de la madera son considerados como negativo, incluidos los problemas ambientales y tecnológicos (Suárez-García *et al.* 2002). Por ejemplo, los metales alcalinos, azufre o cloro pueden ser liberados durante las transformaciones térmicas de la biomasa, provocando corrosión en caliente y las emisiones de contaminantes a la atmósfera (Bridgwater 1995, Turn *et al.* 1998).

Los principales iones metálicos tóxicos peligrosos para los seres humanos, así como otras formas de vida son Cr, Fe, Se, V, Cu, Co, Ni, Cd, Hg, As, Pb, Zn, etc. Estos metales pesados son de interés específico debido a su toxicidad, bioacumulación y tendencia a persistir en la naturaleza (Friberg y Elinder, 1985, Garg *et al.* 2007, Randall *et al.* 1974).

Liodakis *et al.* (2011) determinaron para diferentes especies arbóreas y arbustivas de climas mediterráneos los siguientes valores de metales pesados:

**Tabla 5.** Composición química de especies forestales y arbustivas mediterráneas.

<b>Especies arbóreas</b>	<b>H (%)</b>	<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Zn</b>	<b>Cu</b>	<b>Pb (<math>\text{bm}^{-1}</math>)</b>
		<b>(mg/ g)</b>						
<i>P. halepensis</i>	6.7	98.6	32.4	73.8	14.6	114.8	52.2	600
<i>Q. coccifera</i>	6.7	77.0	95.6	33.0	18.9	54.2	36.2	560
<i>P. lentiscus</i>	6.7	70.4	106.4	44.2	10.2	105.6	20.1	580
<i>A. unedo</i>	7.0	63.1	108.7	32.8	7.9	105.1	46.1	620
<i>P. latifolia</i>	7.1	34.1	109.9	66.4	8.5	52.6	8.1	600
<i>C. incanus</i>	6.8	82.2	58.4	73.8	8.1	97.6	16.1	480
<i>E. manipuliflora</i>	6.5	59.2	139.5	66.0	12.3	40.2	12.3	460

Fuente: Liodakis *et al.* (2011)

En el lado positivo, los componentes inorgánicos de la biomasa pueden actuar como catalizadores (o precursores de catalizador) de la pirólisis y la gasificación de las reacciones, lo que ocurre, por ejemplo, con KCl durante la pirólisis de paja de trigo (Jensen *et al.* 1998). En general, los rendimientos de productos de pirólisis dependen en gran medida de la naturaleza de la presente materia mineral (Raveendran, 1995).

La quema de biomasa también es una fuente de activos radioactivos que contienen las partículas de carbono (Langmann *et al.* 2009, Ramanathan *et al.* 2001), que abarcan varios componentes tóxicos, incluyendo compuestos cancerígenos y/o mutagénicas (Kocbach *et al.* 2006). También hay fuerte evidencia de que las infecciones respiratorias agudas, la enfermedad pulmonar obstructiva crónica y otras enfermedades respiratorias están asociadas con el

humo de biomasa en interiores (Torres-Duque 2008). Partículas de humo de madera parecen afectar a factores tales como la inflamación y la coagulación de la sangre, se supone que participan en la enfermedad y mortalidad cardiovascular (Barregard *et al.* 2006).

Los métodos físicos, tanto de cromatografía y espectroscopia, han hecho grandes avances en el análisis químico de la madera. Estas herramientas han ayudado en el estudio de la lignocelulosa y vegetales carbohidratos de la pared celular. El procedimiento acetato de alditol con cromatografía gas-líquido (GLC) ha sido utilizado muy efectivamente por Darvill *et al.* (1980) en el estudio de los polisacáridos de la pared celular de plantas. El uso de cromatografía líquida de alta presión (HPLC) para el análisis de carbohidratos fue descrito por Conrad y Palmer (1976).

A la rama de la química que se encarga del estudio cuantitativo de los reactivos y productos que participan en una reacción se le llama *estequiometría*. Los coeficientes estequiométricos obtenidos al balancear la ecuación, nos permiten conocer la cantidad de productos a partir de cierta cantidad de reactivos, o viceversa (Barzel y Biham 2012). Una razón estequiométrica es un parámetro constante y universal para cada par de participantes en la reacción (Beltran-Heredia *et al.* 2001) Se obtiene con el cociente entre dos coeficientes estequiométricos teniendo las ecuaciones químicas balanceadas (Contreras 2004).

### 1.2.5 Caracterización energética de la biomasa de origen agroforestal

#### a) Poder calorífico

El poder calorífico se define como el calor desprendido por kilogramo de combustible en combustión completa a la presión y temperatura atmosférica normal, a cuyo efecto son enfriados de nuevo los productos de la combustión hasta la temperatura de partida (0°C) (Kollman 1959 y Moglia *et al.* 2007). García y Bauer (1996), indican que el calor de combustión o entalpía es la cantidad de calor desprendida de la muestra cuando oxida a volumen constante –presión constante- energía aprovechable. La energía almacenada en los tejidos vegetales se determina dentro de un calorímetro adiabático donde se igualan las temperaturas interna y externa, siendo el calor interno el aprovechable ya que no hay fuga de éste.

Debe distinguirse el PCS del PCI, según que el agua obtenida en la combustión se encuentre en estado líquido o en estado de vapor respectivamente. Siendo la única magnitud realmente utilizable en la práctica es el PCI, ya que el agua producida en la combustión se encuentra en forma de vapor en los gases emitidos por los motores y los quemadores (Wauquier 2004)

El poder calorífico de las maderas anhidras y sin cenizas varía tan poco que puede contarse con un valor medio de 4.500 kcal/kilogramo, en términos generales, para la técnica de combustión (Kollmann 1959).

Liodakis *et al.* (2005) determinaron el poder calorífico superior (PCS) para especies típicas de clima Mediterráneo y que son frecuentemente devastadas por incendios forestales (tabla 6).

**Tabla 6.** Poder calorífico superior (PCS) para especies arbóreas de clima Mediterráneo

<b>Especies forestales</b>	<b>PCS (GJ/t)</b>
<i>Cupressus sempervirens</i>	21,4
<i>Olea europaea</i>	21,9
<i>Pinus brutia</i>	20,7
<i>Pinus halepensis</i>	21,7
<i>Pistacia lentiscus</i>	21,5
<i>Quercus coccifera</i>	20,1

Fuente: Liodakis *et al.* (2011)

Siendo el más alto PCS de *Olea europaea* (21,9 GJ/t) y el más bajo *Quercus coccifera* (20,1 GJ/t). Con el fin de establecer una comparación, se puede señalar que, en términos generales, a nivel mundial FAO (2011a) estipula valores medios de PCS de 20,21 GJ/t y de PCI de 14,6 GJ/t para las especies leñosas de origen agrícola y forestal.

#### *b) Cenizas*

La materia inorgánica o ceniza, se compone principalmente por iones metálicos tales como potasio, calcio y magnesio (Fengel y Wegener 1984). Como masa alcanzan generalmente tan solo el 1% del peso seco del árbol (Sjostrom 1993), pero en algunas especies puede ser muy superior (p.e. más del 3% en *Prosopis tamarugo*, según Donoso *et al.* 1989). Liodakis *et al.* (2011) determinaron,

específicamente para especies leñosas de climas mediterráneos, los siguientes porcentajes de cenizas:

**Tabla 7.** Contenido de cenizas de especies forestales y arbustos mediterráneos

<b>Especies arbóreas</b>	<b>Cenizas (%)</b>
<i>Pinus halepensis</i>	3,1
<i>Quercus coccifera</i>	3,4
<i>Pistacia lentiscus</i>	4,8
<i>Arbutus unedo</i>	3,7
<i>Phillyrea latifolia</i>	3,8
<i>Erica manipuliflora</i>	4,8

Fuente: Liodakis *et al.* (2011)

Por lo que, para Liodakis *et al.* (2011) los valores de cenizas de biomasa leñosa de especies típicas mediterráneas se encuentran entre 3,1 y 4,8 %.

### c) *Materia Volátil*

Al calentarse la madera seca por encima del punto de ebullición del agua, se inicia la segunda fase de pirólisis con la liberación de la materia volátil y la descomposición térmica de la madera la leña que comienza a humear y se compone principalmente de una nube de gotitas combustibles de gases e hidrocarburos que se oxidan sólo bajo altas temperaturas y en presencia de oxígeno (O), lo que produce llamas largas y brillantes, que son características de la combustión de la leña seca (Hellwig 1986).

Al liberarse completamente la materia volátil de la madera, permanece como producto residual el carbón sólido junto a la ceniza no combustible (Sami *et al.* 2001).

**Tabla 8.** Materia volátil en cultivos agrícolas y en follaje de una especie forestal

<b>Especies</b>	<b>Materia volátil (%)</b>
Podas de olivo	77.9
Semilla de olivo	70.1
Melocotón	74.6
Acículas de pino	71.5
Cardo	72.6

Fuente: Vamvuka y Sfakiotakis (2011)

Los resultados obtenidos para especies mediterráneas por Vamvuka y Sfakiotakis (2011) coinciden con el 74 a 83 % de materia volátil obtenida por Fuwape y Akindele (1997) para otras especies arbóreas tropicales.

A pesar de todo este conocimiento científico acumulado durante los últimos años, no disponemos en la actualidad del conocimiento suficiente con respecto a la caracterización energética de la biomasa en especies leñosas mediterráneas, lo que incluye principalmente a la especie forestal en estudio y los cultivos agrícolas leñosos. Tampoco de la influencia que, por ejemplo, el poder calorífico pueda tener sobre los productos posibles de obtener de la biomasa a aprovechar.

### **1.2.6 Cálculo de existencias y posibilidades de biomasa agroforestal**

#### *a) Cuantificación de existencias y posibilidades*

La expresión básica de cuantía de madera más empleada es el volumen, ya sea de árboles o productos forestales madereros. Las mediciones necesarias para cubicar un árbol y calcular su volumen son costosas y lentas, es mejor estimar el volumen indirectamente a través de variables fáciles de medir como el diámetro a la altura del pecho (DAP), también llamado diámetro verdadero (a 1,3 m) y la altura total (HT) (Prodan *et al.* 1997).

El volumen de madera aprovechable se calcula usualmente como un porcentaje del volumen total, o con otras metodologías donde intervienen numerosas variables y estimaciones visuales (diámetro, clase de sitio, clase de copa, sanidad, forma, producción de trozas) (Chauchard y Sbrancia 2005, Martínez Pastur *et al.*, 1997).

Tradicionalmente, los valores de diámetros a diferentes alturas de los árboles es una tarea compleja de realizar, debido a la dificultad natural de su medición, aun más en especies que presentan formas irregulares.



**Figura 22.** Medición de diámetros del fuste a diferentes alturas  
Fuente: Noguera (2008)

Normalmente a través de la tala de árboles forestales se procede a la medición de diámetros a diferentes alturas (Salas *et al.* 2005). La medición de volumen de árboles talados puede ser realizada asumiendo la similitud de cada una de las secciones del fuste como un determinado sólido de revolución, considerando la parte basal como un neiloide, la parte media como un cilindro o paraboloides y la parte superior como un cono (Prodan *et al.* 1997).

Debido a la dificultad en la determinación de los puntos a lo largo del fuste de cada uno de los sólidos de revolución, son empleadas normalmente en la práctica forestal fórmulas de aproximación del contenido volumétrico de cada sección de Huber (1828), Smalian (1837) y Newton (Yavuz 1999, Prodan *et al.* 1997).

Todas las fórmulas de aproximación anteriores son válidas cuando la forma de la sección se asemeja a un cilindro o paraboloides. En caso de asemejarse la troza a un cono o neiloide la fórmula de Huber tiende a subestimar y la de Smalian a sobreestimar el contenido volumétrico (Prodan *et al.* 1997). Sin embargo, Yavuz

(1999) asegura que de estas fórmulas, debido a la simplicidad y el espíritu práctico Huber es con frecuencia la más usada para la valoración de volumen de fuste.

Otra metodología clásica que ha sido utilizada para cumplir con este objetivo; es el método de Bitterlich consiste en contar los árboles, realizando un giro de 360°, cuyos diámetros sean iguales o mayores que una abertura angular equivalente a  $(\text{sen } \theta/2)$ , donde  $(\theta)$  es un ángulo fijo, cuyo vértice es el punto central de la unidad de muestreo (Husch *et al.* 1972). De esta manera, cuanto mayor sea el diámetro, mayor será la probabilidad del árbol de entrar en la muestra, y así la probabilidad de selección de los árboles será proporcional al área basal, diferente del método de parcelas de área fija, cuya probabilidad es proporcional a la frecuencia (Pellico Netto y Brena 1997). La muestra de conteo angular resulta de la determinación del número de árboles de un rodal, cuyos diámetros, a partir de un punto fijo, aparece superior a un valor angular constante previamente determinado (Finguer 1992, Loetsch *et al.* 1973, Moscovich y Brena 2006).

El uso del relascopio de espejos de Bitterlich, instrumento que permite estimar con un alto poder de significancia el volumen total de los árboles, además, la medición de altura, pendiente, distancia y área basal del rodal mediante el muestreo puntual horizontal (Salas *et al.* 2005). Aunque los valores de densidad por unidad de área no pueden ser obtenidos, el número de árboles muestreados por punto puede ser usado como un indicador de densidad (Meya *et al.* 2001).

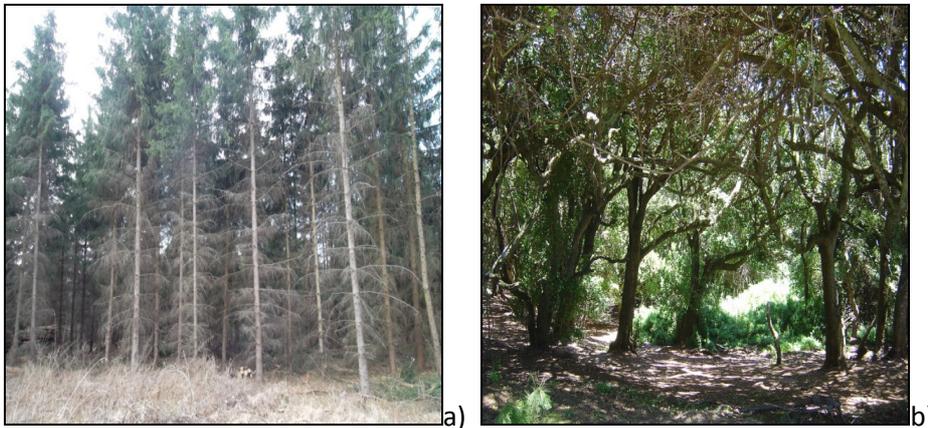
El volumen total de una superficie dada será la suma de los volúmenes individuales medidos por el método de Bitterlich (Moscovich y Brena 2006)

La dificultad en la determinación directa del volumen mediante la cubicación de secciones, ha provocado el desarrollo de expresiones matemáticas que, basadas

en una muestra objetivamente seleccionada y cuidadosamente medida, permitan estimar el volumen de los árboles sobre la base de mediciones simples a través de funciones de volumen (Prodan *et al.* 1997, Lencina *et al.* 2002).

La mayoría de las funciones de volumen han sido ajustadas para especies de fustes excurrentes, utilizando combinaciones de variables simples de medir, tales como el DAP, H y en ocasiones un factor de forma (Prodan *et al.* 1997).

Para el caso de especies de fuste delicuescente, en las cuales dos árboles de igual DAP y altura total pueden tener distintas alturas comerciales, estas funciones pueden considerar la altura comercial o la altura comienzo de copa, como variable predictora (Higuera 1994).



**Figura 23.** a) Rodal de fuste excurrente, b) Rodal de fuste delicuescente

Fuente: Elaboración propia

En la literatura se mencionan distintos tipos de funciones de volumen, pero las principales son:

- i. Los modelos de volumen local relacionan el volumen del árbol con sólo una variable dependiente, generalmente el diámetro normal o de referencia o transformaciones y potencias de esta misma variable. El calificativo de local se debe a que son de aplicación limitada al área, para lo cual es aplicable la relación diámetro/altura implícita en el modelo de volumen; generalmente una cierta clase de edad y un mismo sitio (Lencina *et al.* 2002).
  
- ii. Las funciones generales de volumen son modelos que estiman el volumen con dos o más dimensiones del árbol, por lo general el diámetro y la altura total, pero también la edad, la densidad y la calidad de sitio expresada a través del índice de sitio o la altura dominante a una edad determinada (Costas *et al.* 2006). Son de aplicación más amplia que las locales, debido a que la relación de las dimensiones está explícita en el modelo, lo que facilita su uso para diferentes rodales en lugares diferentes (Prodan *et al.* 1997).
  
- iii. Debido a la poca flexibilidad de las funciones anteriores se han desarrollado nuevos métodos para la determinación directa de volúmenes hasta un determinado índice de utilización o entre dos límites de utilización. Dentro de estos métodos están las funciones de razón, que estiman el volumen hasta un determinado índice como un porcentaje del volumen total del árbol (Cao *et al.* 1980) por medio de dos métodos, el primero corresponde a una ecuación de volumen para predecir el volumen total del árbol; y el segundo corresponde a una de transformación para estimar la proporción de volumen hasta un índice de utilización especificado (Prodan *et al.* 1997, Barrio Anta 2007 y Trincado *et al.* 1997).

En base a la función de razón de Burkhardt (1977) Trincado *et al.* (1997) desarrolló una función de dos parámetros: diámetro comienzo de copa y volumen ( $m^3$ ) con corteza hasta comienzo de copa, para fustes de árboles delicuescentes hasta el comienzo de copa.

El sistema de funciones de razón muestra una consistencia en la determinación volumétrica, no presentando entrecruzamiento de las curvas y permitiendo además mediante la utilización de ambas razones la estimación directa del diámetro dada una cierta altura y viceversa (Chauchard y Sbrancia 2005).

### *b) Experiencias de cuantificación de existencias y posibilidades*

Existen diversas experiencias de cuantificación de biomasa en especies forestales bajo condiciones mediterráneas de las cuales a continuación se darán algunos ejemplos, como Geldres *et al.* (2006) que estimaron la biomasa total de una plantación de *Eucalyptus nitens*, en clima de costa occidental de Chile con influencia mediterránea, una secuencia de edad de 4 a 7 años y alcanzó a 92 t/ha a los 4 años, 131 a los 5 años y 181 a los 6 años, con una densidad de 1.500 árboles/ha. Por su parte, Flores y Lee Allen (2004) estimaron la productividad potencial, utilizando el modelo ecofisiológico 3-PG, generando estimaciones de producción de madera del fuste de rodales de *Pinus radiata* D. Don de densidad normal, ubicados en la región mediterránea de Chile (VI y IX Regiones). Las estimaciones de productividad potencial variaron entre 14 y 44  $m^3/ha/año$ . Dentro del área de estudio, la mayor parte de la variación en la productividad potencial se debió a la precipitación. El modelo indicó variaciones considerables en la extensión y magnitud de las limitaciones de agua del suelo. Santelices (2005) realizó en la zona costera de la VII Región de Chile una plantación de *E. nitens* en

la primavera de 1993 (octubre), después de ocho años, la sobrevivencia media alcanzada fue de un 70%. Los crecimientos medios registrados fueron de 16,2 cm en DAP, 19,7 m en altura y 28 m<sup>3</sup>/ha por año. Un estudio de crecimiento de renovales de la especie nativa latifoliada *Drimys winteri* realizado por Reyes *et al.* (2009) en las cordilleras de los Andes y de la Costa de Chile, caracterizadas por el clima oceánico templado-húmedo (Cfsb) con gran influencia mediterránea, determinó que a los 28 años el crecimiento medio de los renovales (sin considerar mortalidad) en el sector de Hueicoya era de 12,8 m<sup>3</sup>/ha por año (10,3-16,2 m<sup>3</sup>/ha por año), en el sector Lenca A de 14,2 m<sup>3</sup>/ha por año (10,7-19,4 m<sup>3</sup>/ha por año), y en Lenca B de 11,1 m<sup>3</sup>/ha por año (8,7-14,6 m<sup>3</sup>/ha por año).

Si bien existen una gran cantidad de estudios realizados en este ámbito para especies forestales, no existen en literatura modelos matemáticos de predicción de volumen, biomasa ni mucho menos potencial energético en específico para la especie forestal mediterránea *Quercus Ilex*. Sí que existen primeras experiencias con cultivos energéticos de *Paulownia spp.* en España (Latorre y Ruano 1998, Jiménez *et al.* 2005), aunque no se disponen de datos contrastables para la zona de estudio. En cualquier caso, no se dispone de conocimiento científico sobre la influencia del crecimiento de esta especie sobre sus características energéticas.

Sin embargo, existen unos pocos modelos matemáticos de predicción de biomasa de cultivos leñosos agrícolas, por ejemplo, el desarrollado por Perpiña *et al.* (2009) que obtiene modelos para biomasa forestal y biomasa agrícola, pero de forma general. Otro ejemplo es el desarrollado por Fernández (2009), pero este solo abarca la predicción de biomasa (kg o t) y está limitada a la biomasa obtenida sólo en la poda, no se determina volumen (en m<sup>3</sup>) ni potencial energético (en GJ). Por lo que en este tipo de cultivos existe una imperiosa necesidad de obtener modelos matemáticos de predicción del material posible de obtener tanto en

podas como del árbol completo determinando el volumen para uso industrial (industria del tablero principalmente), y la biomasa y potencial energético para uso como biocombustibles.

### **1.2.7. Experiencias sobre planificación y gestión de la biomasa de base agroforestal**

Cabe citar que a nivel europeo según las previsiones hechas, es en Escandinavia y Centro Europa (Austria y Alemania), en donde existe mayor desarrollo en cuanto a la generación energética por biomasa, sobre todo biomasa residual forestal. Por tanto, es en estos países en donde primero se han desarrollado planes integrales para el aprovechamiento de la biomasa, a nivel municipal y comarcal (IDAE 2007).

A nivel nacional, hay que decir que se encuentran diferentes estudios de interés (Planes de aprovechamiento biomásicos), en distintas comunidades autónomas como Castilla-León, Aragón, Cataluña, Andalucía.

**a)** Plan de Aprovechamiento Energético de las Comarcas del Bierzo y Laciana (León) (Esteban *et al.* 2007).

El objetivo es la definición de un plan para la movilización y valorización de recursos biomásicos para consumo energético en las comarcas de El Bierzo y Laciana, en la provincia de León.

El plan que se prevee comprende la definición de acciones a corto plazo para la movilización energética de la biomasa, pero además la definición de actividades de demostración y desarrollo a fin de mejorar la viabilidad e incrementar en un

futuro la utilización sostenible de los recursos de biomasa que se generen en las citadas comarcas.

Objetivos del estudio:

1. Cuantificación de la biomasa agrícola, forestal y de cultivos energéticos que se pueden explotar de forma sostenible en las dos comarcas objeto de estudio.
2. Definición de alternativas y proyectos para la utilización energética de la biomasa en las comarcas consideradas, incluida la localización idónea de las plantas de conversión que se consideren.
3. Definición de los sistemas de recogida y logísticos más adecuados para abastecer la biomasa a los puntos de consumo identificados.
4. Análisis económico de los sistemas: Coste de la biomasa puesta en los lugares de consumo y estudio de la viabilidad económico financiera de las alternativas y proyectos planteados.
5. Definición de acciones de demostración y desarrollo relativas al uso energético de la biomasa en el área de estudio.

Resultados del estudio:

1. Se fomenta la producción de energía a partir de la biomasa que es un recurso autóctono, renovable y neutro respecto a las emisiones de efecto invernadero.
2. Mediante la puesta en valor de la biomasa forestal se prevé una reducción importante de los incendios forestales, cuya incidencia es muy alta en las comarcas estudiadas.
3. Mediante la realización de las labores silvícolas adecuadas se puede prever una mejora del estado actual de la masa forestal e incluso un

incremento de la superficie arbolada en sustitución del matorral que surge como consecuencia de los incendios.

4. Creación de un número importante de puestos de trabajo y se incrementa la actividad industrial y económica de las zonas de estudio.
5. Mediante el programa de demostración y desarrollo previstos asociados a las actividades comerciales a llevar a cabo dentro del proyecto se mejorará la competitividad de la biomasa y se incrementará la utilización futura de los recursos de biomasa producidos en las comarcas consideradas.

**b) Sistemas de Aprovechamiento de Biomasa en Castilla y León (Tolosana *et al.* 2008)**

Objetivos del estudio:

El objetivo general es evaluar sistemas de aprovechamiento de biomasa con diferentes tipos de corta y con diferentes sistemas de extracción de la biomasa para optimizar los sistemas de trabajo, evaluar la productividad y determinar los costos, produciendo una serie de manuales para orientar sobre las prácticas más adecuadas en el aprovechamiento de biomasa forestal.

- 1- *Sistema de trabajo 1* (para clareos o entresacas de masas no comerciales): el esquema de trabajo es un apeo con cosechadora multiárbol de árboles de pequeño tamaño, desembosque con auto-cargador de árboles completos o “partes de árbol” y apilado para pre-secado en cargadero y posteriormente astillado o triturado fijo en cargadero.

- 2- *Sistema de trabajo 2* (para cortas a hecho u otras finales) en que el esquema de trabajo es la separación del residuo durante la corta, desembosque en auto-cargador (a veces con compresor o con remolques de gran capacidad), pre-secado de restos en cargadero o borde de pista y astillado fijo en cargadero.
  
- 3- *Sistema de trabajo 3* (en cortas a hecho u otras finales) el esquema de trabajo consiste en separar el residuo durante la corta, pre-secado del residuo en monte y astillado móvil y saca de astillas en la propia astilladora o utilización de vehículos auxiliares con remolque descargando a contenedores de camión de transporte.

Resultados del estudio:

- 1- Cuantificación de biomasa residual forestal. Con esos datos se han ajustado tarifas de peso de biomasa en función de variables sencillas de medir (las tarifas de una entrada en función del diámetro normal y para las de varias entradas en función del diámetro normal, la altura total, la altura de la primera rama viva, el diámetro de copa, etc.).
- 2- Selección de sistemas de aprovechamiento y logísticos más adecuados. En el control de tiempos se ha empleado cronometraje discontinuo y continuo (Tolosana 1999, *Tolosana et al.* 2004) a la vez que se registraba el volumen de residuos manipulado.
- 3- Finalmente se determina la calidad de la astilla y su poder calorífico.

c) Evaluación del Potencial de Biomasa Residual en los Ecosistemas Forestales y los Medios Agrícolas en la Provincia de Huesca (CIRCE 2006)

Objetivos del estudio:

El objetivo principal de esta beca de investigación en materia de medio ambiente ha sido la aplicación de la metodología desarrollada en el proyecto LIGNOSTRUM (“Metodologías para evaluar el potencial de biomasa residual agrícola y forestal y sus posibles aplicaciones energéticas. Validación en la provincia de Teruel”, referencia AGL2002-03917) a la provincia de Huesca.

Resultados del estudio:

- 1- El resultado principal obtenido en el proyecto LIGNOSTRUM es el desarrollo de una metodología fiable, veraz y fácilmente extrapolable que permite cuantificar los residuos forestales y agrícolas (biomasa residual seca), con el propósito final de promover su valorización energética.
- 2- La evaluación de biomasa residual potencial y disponible en la provincia de Huesca se ha realizado en dos campos: agrícola y forestal. A su vez, la biomasa agrícola se ha dividido en dos grupos: biomasa de cultivos herbáceos y biomasa de poda de cultivos leñosos.

El estudio de evaluación de cada una de las biomásas que han sido objeto de estudio se ha dividido en tres partes de cara a su explicación:

- i. Estimación de la biomasa potencial.
- ii. Estimación de la biomasa disponible. En el caso de la biomasa agrícola la biomasa disponible se estima descontando de la biomasa potencial

aquella que ya está siendo utilizada con otros fines (agrícolas, ganaderos, industriales, etc.).

iii. Revisión y generación de resultados: planos y tablas resumen

**d)** Plan estratégico de biomasa forestal de ADF Montseny Ponent, Comarca del Vallés Oriental (Diputació Barcelona 2009)

Objetivos del estudio:

- 1- Elaboración de un plan para la explotación y puesta en valor de la Biomasa Residual Forestal en la comarca Montseny-Ponent.
- 2- Extracción y comercialización de la biomasa de forma mancomunada por parte de los diferentes municipios.

Resultados del estudio:

- 1- La previsión es que el proyecto de extracción de biomasa comience de forma gradual y experimental con la instalación de una caldera de biomasa en un equipamiento público ubicado en la población de El Brull.
- 2- La extracción y generación de biomasa en un principio sólo se destinará a la producción de energía para calentar equipamientos municipales y domicilios particulares a través de la instalación de calderas de biomasa subvencionadas por el ICAEN (Institut Català de Energies Renovables).
- 3- Las extracciones de biomasa se centralizarán a través de los 4 ayuntamientos adheridos al proyecto, que serán los encargados de escoger los equipos humanos que seleccionarán las zonas donde actuar. Se actuará de forma mancomunada.

Se trata de un proyecto que en la actualidad aún se está implementando.

e) Aprovechamiento Integral de Biomasa Residual en Enguera (Martí 2011)

Objetivos del estudio:

Elaboración de un plan integral de aprovechamiento de la biomasa existente en el municipio de Enguera, teniendo como fuentes principales de biomasa la biomasa residual forestal (BRF), la biomasa residual agrícola (BRA) y la biomasa residual industrial (BRI), que son las principales fuentes de producción de biomasa del Municipio.

Resultados:

- 1- En el TM de Enguera se pueden obtener anualmente 1994,26 tm de BRF, 4095,5 tm de BRA y 1750 tm de BRI, suponiendo esto un total de 7839,76 tm de biomasa residual anual aprovechable. En un periodo de 20 años supondrá un volumen de 156.795,2 tm. Estas cifras corresponden a la Biomasa Realmente Aprovechable, teniendo en cuenta los criterios de sostenibilidad.
  
- 2- Dentro de la BRF se tienen como especies de interés principalmente el *Pinus halepensis* y *Pinus pinaster*, los pies menores se pueden aprovechar al completo para biomasa y los pies mayores solo en las fracciones citadas, seleccionando los pies que se consideren oportunos como maderables. En cuanto a BRA, se utilizarán los restos de poda de aquellas especies agrícolas, principalmente el olivo. Como BRI se considerarán los alpechines producidos en la almazara de la Cooperativa del Campo de Enguera, que convenientemente deshidratados y tratados pueden ser una fuente interesante de biomasa.

- 3- La estacionalidad en la obtención de la biomasa propiciará que en los meses de verano se mantenga la producción prácticamente a cero, mientras que los meses invernales se mantengan unas puntas de producción bastante interesantes. Manteniéndose el resto del año la producción más o menos constante. El periodo más largo de explotación de la biomasa corresponderá a la Biomasa Residual Forestal, que será de nueve meses anuales (no habrá extracción los meses de Junio, Julio y Agosto). La Biomasa Residual Agrícola se obtendrá desde los meses de Enero hasta Abril o Mayo según evolucionen los trabajos. La Biomasa Residual Industrial se extraerá durante los meses de Noviembre, Diciembre y Enero.
- 4- Los sistemas de aprovechamiento y logísticos van a suponer en gran medida el éxito o el fracaso del proyecto de aprovechamiento biomásico, en la medida en que el acierto en la selección de los mismos garantizará un rendimiento óptimo y una reducción de los costos considerable. Será necesario un proyecto de ordenación de montes, en donde quede regularizado el aprovechamiento racional y sostenible de la Biomasa Residual Forestal del municipio.
- f) Sistema de evaluación del potencial de extracción de biomasa forestal residual a partir de parámetros de estación definidos en la provincia de Valencia. (Monllor 2012).

Objetivos del estudio:

Es la evaluación de los recursos biomásicos disponibles en la provincia de Valencia y su potencial de aprovechamiento a partir de la selección de parcelas representativas de las distintas tipologías de estrato, según

parámetros de estación definidos, valorizando así un recurso disponible y carente de uso en la actualidad.

Resultados del estudio:

- 1- Se ha diseñado un experimento para la elección de parcelas óptimas para la extracción de biomasa, atendiendo a las características intrínsecas de las mismas, volumen de existencias y crecimientos anuales registrados en ellas; además de parámetros de estación previamente definidos que pudieran ser utilizados como factores discriminantes.
- 2- Se eligieron los estratos forestales más relevantes para el aprovechamiento sostenible de la biomasa forestal.
- 3- Se identificaron aquellas teselas representativas dentro de cada estrato para su posterior estudio, tanto en gabinete como en campo, a través de inventarios forestales y cuantificación de biomasa.
- 4- Se analizaron y evaluaron los sistemas de aprovechamiento de BFR en las parcelas seleccionadas y los posibles sistemas logísticos monte-industria, con el fin de optimizar al máximo el rendimiento de las futuras explotaciones.
- 5- Finalmente el análisis de los resultados obtenidos así como la comprobación del grado de determinación evaluaron la capacidad de predicción y extrapolación a la totalidad de la extensión de la provincia de Valencia del diseño experimental planteado, dando resultados considerablemente positivos.

- g)** Análisis de gestión, aprovechamiento y valorización integral de la biomasa residual generada en las zonas verdes de la ciudad de Valencia. (Jamil-Sánchez 2012)

Objetivos del estudio:

Evaluar la viabilidad económica y medioambiental de la instalación, en el área metropolitana de la ciudad de Valencia, de una caldera de biomasa para la cogeneración de energía térmica y eléctrica utilizando los residuos vegetales producidos en las áreas verdes de la citada ciudad.

Resultados del estudio:

- 1- La estimación de la biomasa residual anual extraída no permite la instalación de una central de aprovechamiento energético de gran potencia, pero ofrece una buena potencialidad en cantidad de biomasa para un proyecto a pequeña escala. La planta debe ser capaz de procesar anualmente las 4.500 t de biomasa residual producidas en el mantenimiento de los jardines de la ciudad.
- 2- Los sistemas logísticos de recogida y evacuación actuales se consideran, con pequeñas modificaciones, adecuados para un futuro aprovechamiento energético de la biomasa residual.
- 3- Como consecuencia de la gran heterogeneidad de los materiales, la tecnología de revalorización energética que se propone es la Carbonización hidrotermal (HTC) para producir biocombustible sólido para su posterior utilización en una caldera.



## **CAPÍTULO 2: OBJETIVOS**



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

El objetivo general es investigar el potencial de valorización energética e industrial para el suministro sostenido de biomasa leñosa de base agroforestal a nivel local/comarcal en condiciones mediterráneas, teniendo en cuenta el gradiente altitudinal.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Para poder alcanzar el objetivo general formulado, la tesis tiene como objetivos específicos:

- 1- Seleccionar de especies y determinación del muestreo a realizar.
- 2- Caracterizar la morfología de la biomasa, donde se obtendrá el porcentaje promedio de albura, duramen y corteza por especie.
- 3- Determinar las propiedades físicas de la biomasa leñosa obteniendo principalmente la información sobre la higroscopia (contenido de humedad y secado) y densidad (básica, anhídrida y normal).
- 4- Caracterizar químicamente la biomasa leñosa por medio de un análisis elemental y secundario en todas las especies estudiadas.

## 2. OBJETIVOS

---

- 5- Determinar las propiedades energéticas de la madera por especie, determinando principalmente el poder calorífico, porcentaje de cenizas y volátiles.
- 6- Cuantificar el volumen de la biomasa aérea para todas las especies estudiadas a través de las relaciones entre distintas variables y la estimación del volumen promedio por árbol por especie y su factor de forma.
- 7- Cuantificar el potencial másico y energético por especie a través de la determinación del peso por árbol y toneladas por hectárea y de la determinación del potencial energético por árbol y superficie respectivamente
- 8- Analizar el material para todas las especies, según las diferentes normas existentes, tanto para fines energéticos (pellets) como para la industria (tableros de partículas).
- 9- Sentar las bases para la aplicación práctica de una valorización energética e industrial para el suministro de biomasa agroforestal a nivel local en municipios representativos de la Comunidad Valenciana.

## **CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS**

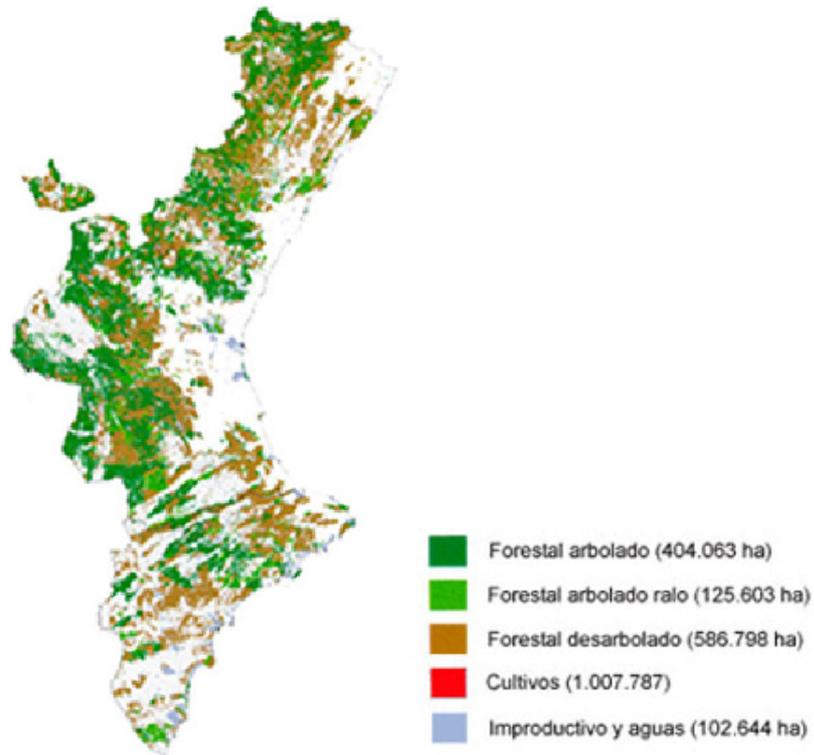


### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 SELECCIÓN DE ESPECIES

##### 3.1.1 Estudio previo de distribución de especies leñosas en el medio forestal y agrícola

El área de estudio comprende el litoral e interior de la Comunidad Valenciana (España) a lo largo del gradiente altitudinal.



**Figura 24.** Superficie por usos en la Comunidad Valenciana  
Fuente: IFN3 (2010)

Para la selección de especies se ha estudiado la distribución de especies leñosas cultivadas en la Comunidad Valenciana, tanto en el medio agrícola como en el forestal.

a) *Medio forestal*

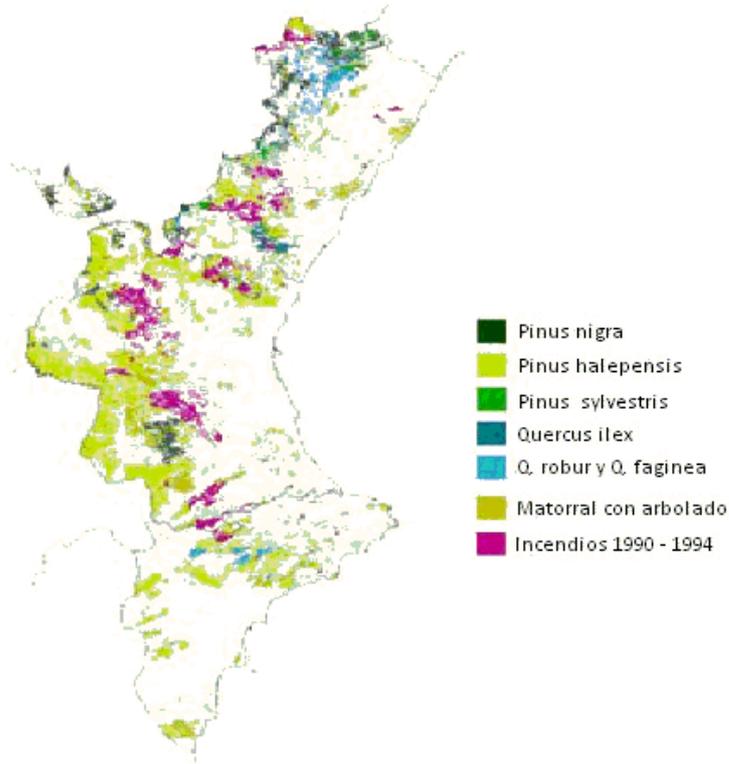
La tabla 9 muestra en hectáreas y porcentaje la superficie ocupada por las principales especies forestales de la Comunidad Valenciana

**Tabla 9.** Porcentaje de superficie ocupada por especies forestales en la Comunidad Valenciana

Especies	Superficie	
	(ha)	(%)
<i>Pinus halepensis</i>	518.664	39,2
<i>Pinus pinea</i>	1.572	0,1
<i>Pinus pinaster</i>	19.927	1,5
<i>Pinus nigra</i>	45.261	3,4
<i>Pinus sylvestris</i>	6.766	0,5
<i>Quercus suber</i>	6.700	0,5
<i>Quercus ilex</i>	95.729	7,2
<i>Quercus faginea</i>	5.668	0,4
<i>Juniperus Thurifera</i>	13.394	0,3
Otros	11.286	0,9
<b>Total</b>	<b>715.589</b>	<b>54,1</b>

Fuente: PATFOR (2011)

La especie dominante es la conífera *Pinus halepensis* con 518.664 ha (39,2%). En segundo lugar, pero a mucha distancia de la primera está la frondosa *Quercus ilex* con 95.729 ha (7,2%).



**Figura 25.** Distribución de especies forestales dominantes en la Comunidad Valenciana  
Fuente: PATFOR (2011)

Según la figura 25, se puede visualizar que la mayor extensión de superficie ocupada por *Pinus halepensis* se encuentra principalmente en la provincia de Valencia y *Quercus ilex* en la provincia de Castellón.

## b) Medio agrícola

España posee más de 4 millones de ha de cultivos agrícolas leñosos (INE España 2010) por lo que es necesario estudiarlos. La tabla 10 muestra como se distribuyen, en superficie (ha), los diferentes tipos de cultivos agrícolas leñosos en cada Comunidad Autónoma (CC. AA.) de España.

**Tabla 10.** Distribución por superficie de cultivos agrícolas leñosos por CC. AA.

CC.AA.	Cítricos	Frutales de clima templado	Frutales de clima subtropical	Frutales de fruto seco	Superficie (ha)	
					Olivos	Uvas
Andalucía	70.458	15.116	14.044	128.345	1.358.757	26.299
Aragón	2	39.672	377	65.251	48.327	35.859
Asturias	54	2.763	162	507	0	41
Illes Balears	1.770	696	492	20.934	5.964	1.392
Canarias	902	483	9.481	272	107	4.478
Cantabria	9	140	8	57	0	20
Castilla y León		3.167	280	3.565	4.818	50.280
Castilla - La Mancha	23	4.681	720	58.646	301.140	415.357
Cataluña	10.442	46.176	695	53.353	101.236	61.391
C. Valenciana	169.768	17.334	6.661	80.095	78.794	62.665
Extremadura	293	24.352	3.146	12.516	204.731	67.507
Galicia	113	2.705	357	4.071	17	9.359
Madrid	1	151	34	434	20.429	7.698
Murcia	33.718	28.393	336	77.114	19.765	33.045
Navarra	1	3.228	120	2.499	5.673	21.061
País Vasco	13	1.654	123	313	147	14.544
La Rioja		4.129	69	6.568	3.787	41.621
Ceuta	0	1	0		27	0
Melilla		0			6	0
<b>TOTAL</b>	<b>287.568</b>	<b>194.841</b>	<b>37.106</b>	<b>514.539</b>	<b>2.153.727</b>	<b>852.618</b>

Fuente: INE España (2009)

### 3.1.2 Especies leñosas seleccionadas

Tras el estudio previo se han clasificado las especies a estudiar en la presente tesis en:

a) *Especie forestal mediterránea*

La especie de carácter netamente forestal corresponde a encina (*Quercus ilex* L.).



**Figura 26.** Renoval puro de *Quercus ilex* en comarca de Els Ports  
Fuente: Elaboración propia

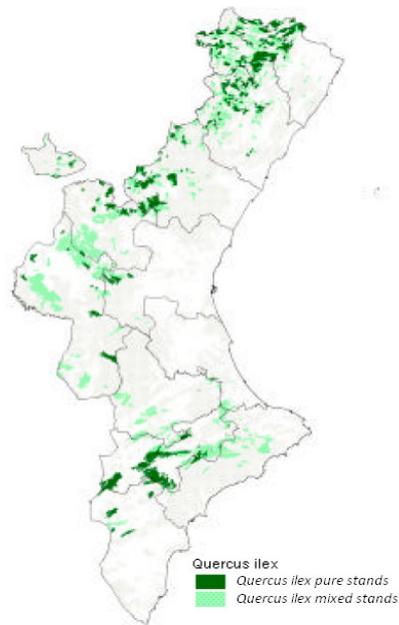
La encina es la especie frondosa más representativa del arco mediterráneo occidental (García Codron 2011). Si bien es indiferente al sustrato y son capaces de vivir en suelos pobres su presencia se centra en suelos (calizos-silicios) con mayor humedad. Su floración es desde finales de abril a principios de mayo, dependiendo de la localidad. Los frutos

maduran en octubre del mismo año. Su reproducción es de cepa y raíz (López de Heredia 2006).



**Figura 27.** Mapa de distribución de *Quercus ilex* en Mediterráneo  
Fuente: JRC (2006)

La encina ha sido también seleccionada por ser la especie de maderas duras más representativas de la Comunidad Valenciana. La presencia de la encina en los bosques puros y mixtos en esta región se muestra en la figura 28. Más del 70% de los puros se encuentran en la parte norte, en la provincia de Castellón, en el nivel superior con un gradiente altitudinal entre los 1.000 a 1.200 m s.n.m. Una parte importante de esta masa forestal es regeneración natural pura de encina luego de devastadores incendios en los bosques hace aproximadamente 30 años. Se ha elegido esta especie, al ser la frondosa más representativa de todo el arco mediterráneo occidental. No se han incluido en esta tesis especies de coníferas, al ser suficientemente estudiadas para su uso bioenergético o como materia prima para tableros durante los últimos años.



**Figura 28.** Distribución de *Quercus ilex* en bosques puros y mixtos de la Comunidad Valenciana  
Fuente: PGOF (2003)

**b) Cultivo energético leñoso**

Este corresponde a paulonia (*Paulownia spp.*), escogida por el potencial que representa por su rápido crecimiento y sus favorables características energéticas para la producción de biocombustibles sólidos (Falasca y Bernabe 2010).

La paulonia es una especie de procedencia asiática, principalmente en China y el Este de Asia, siendo muy abundante en el primero, que es donde el género *Paulownia spp.* es compuesto por siete especies (*P. fortunei*, *P. australis*, *P. elongata*, *P. tomentosa*, *P. kawakamii*, *P. fargesii* y *P. albiphloea*), además tiene un amplio rango de distribución y se pueden encontrar en esta región hasta los 2.400m s.n.m, tanto en las colinas

como en los valles. La tendencia general es, sin embargo, que la población y variación disminuye con la distancia desde el centro de distribución del género *Paulownia*, es decir, las zonas de los valles centrales y aguas abajo del río Yangtze (Zhao-Hua 1986).

Estos árboles también fueron introducidos a América del Norte, Australia, Europa y Japón. Se podría considerar como una planta de baja demanda de agua, a pesar de no crecer en zonas áridas (Caparros *et al.* 2008).

En la Comunidad Valenciana existen crecientes proyectos de cultivos de paulonia en crecimiento rápido, sobre todo en tierras agrícolas como alternativa a otros cultivos tradicionales (naranja, almendro, olivo, vid, etc.) (Sixto *et al.* 2007). Esto ha llevado en los últimos años a disponer de viveros especializados, parcelas conocidas de ensayo y de producción dentro de la Comunidad Valenciana.

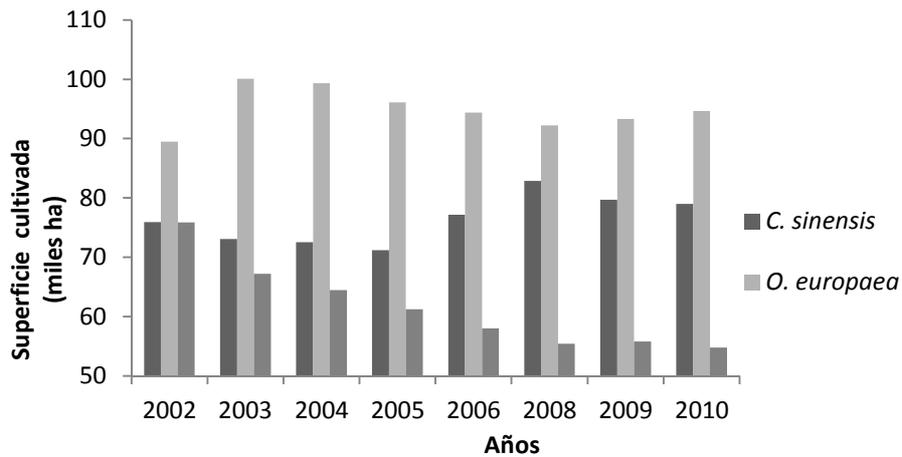


**Figura 29.** Plantación de *Paulownia spp.* de 12 meses en zona costera de la Comunidad Valenciana.

Fuente: Elaboración propia

c) *Especies agrícolas leñosas*

Los cultivos frutales escogidos en esta investigación son los que representan la mayor superficie ocupada en esta región (INE España-Censo Agrario 1999), poseen una importante oscilación, positiva o negativa, en superficie cultivada por año (figura 30) y presentan características arbóreas definidas (fuste y copa): *Citrus sinensis* (naranja), *Olea europaea* (olivo) y *Prunus amygdalus* (almendro).



**Figura 30.** Superficie cultivada de *Citrus sinensis*, *Olea europaea* y *Prunus amygdalus*. Comunidad Valenciana 2002-2010  
Fuente : Datos obtenidos INE España (1999). Elaboración propia.



a)



b)



c)

**Figura 31.** a) *Citrus sinensis* (naranja). b) *Olea europaea* (Olivo). c) *Prunus amygdalus* (almendro)  
Fuente: Elaboración propia

La tabla 11 muestra como se distribuyen en superficie los cultivos agrícolas leñosos en seleccionados para esta tesis en la zona de estudio, teniendo por referencia el total a nivel de país.

**Tabla 11.** Distribución de la superficie de los cultivos agrícolas leñosos seleccionados en la región de estudio.

<b>Región</b>	<b>Cítricos</b>	<b>Naranjos</b>	<b>Almendro</b>	<b>Olivos</b>
<i>España</i>	275.935	155.284	564.613	2.273.589
Comunidad Valenciana	179.541	96.322	98.120	89.636
Provincia Alicante	34.096	18.614	35.000	27.168
Provincia Castellón	40.528	10.872	31.551	32.002
Provincia Valencia	104.917	66.837	31.568	30.466

Fuente: INE España-Censo Agrario (1999)

Cabe señalar que la diferencia de superficie de la tabla 10 con respecto a la tabla 11 se debe a que se trata de información estadística de una década de diferencia y el uso de dos fuentes distintas es debido a que se tratan de explicar aspectos diferentes. En la fuente más antigua (tabla 11) es más específica y se tratan los cultivos por especie, citando concretamente las especies en estudio. En la tabla con datos más reciente (tabla 10) se tratan de tipos de frutales a nivel general, describiendo la situación del medio agrícola en España por CC. AA.

### 3.2 DISEÑO MUESTRAL DE ÁREAS Y TOMA DE MUESTRAS

El muestreo de las especies se realizó en distintas comarcas de la Comunidad Valenciana y a distintas altitudes.

a) *Especie forestal mediterránea*

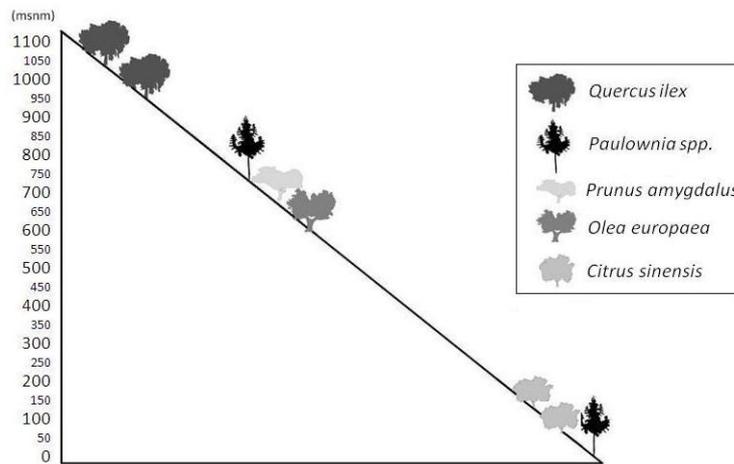
La encina fue muestreada en la Provincia de Castellón en la comarca de Els Ports (aproximadamente 1.000m s.n.m.).

b) *Cultivo energético leñoso*

La paulonia fue muestreada en la provincia de Valencia en la comarca de Safor (menos de 100m s.n.m.) y Requena-Utiel (aproximadamente 700m s.n.m.).

c) *Especies agrícolas leñosas*

El naranjo se muestreó en la provincia de Valencia en las comarcas de La Safor (sobre 100m s.n.m.) y La Ribera Alta (menos de 100m s.n.m.), el olivo y el almendro se muestrearon en la provincia de Castellón en la comarca del Alto Palancia (entre 600 y 700m s.n.m.).



**Figura 32.** Distribución de especies, a lo largo del gradiente altitudinal, en la Comunidad Valenciana  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.1 Selección de parcelas

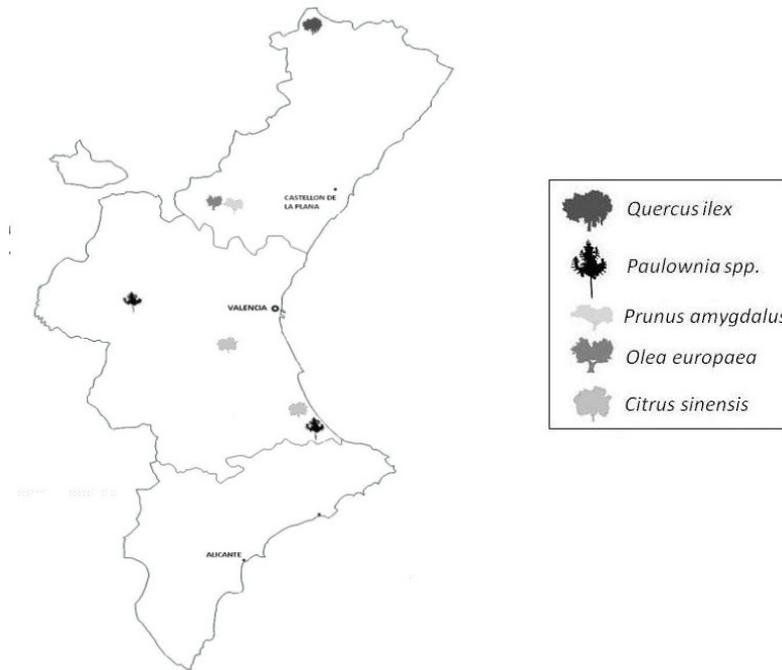
En la selección de parcelas se aplicaron los mismos criterios de selectividad en todas las especies estudiadas en esta investigación. Por lo que, se ha llevado a cabo un completo inventario para cada parcela de muestreo, a través de la documentación de la edad, el área basal, la densidad de población, diámetros y alturas de los individuos. Los datos promedios y desviación estándar se calcularon para cada parcela en cada rodal seleccionado, incluyendo los intervalos de confianza para cada parámetro.

Se seleccionaron de un mínimo de cuatro parcelas representativas por especie, de un tamaño mínimo de parcela de 0,25 hectáreas. Los criterios básicos de selectividad de parcelas, para efectos prácticos de medición y homogenización de los datos obtenidos, han sido los siguientes:

- 1- Una misma zona geográfica, a excepción del cultivo energético leñoso evaluado en dos zonas distintas (litoral e interior).
- 2- Representatividad, disponibilidad en el momento y accesibilidad.
- 3- Coetaneidad, con la salvedad de los cultivos agrícolas leñosos donde bastó con que sean árboles en edad productiva.
- 4- En los cultivos agrícolas leñosos no se consideró la variedad de la especie.
- 5- Requerimientos hídricos, edafológicos, climatología, altitud, etc.

Los antecedentes generales recopilados en cada plantación fueron los siguientes: coordenadas geográficas, parcela, especie, marco de plantación y tipo de riego (Ver Anexo 1).

La Figura 33 muestra la localización de los puntos de muestreo seleccionados.



**Figura 33.** Zonas de muestreo por especie en la Comunidad Valenciana  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.2 Selección de individuos

Para la selección de árboles se aplicaron las experiencias basadas en el método de Hapla y Saborowski (1984) para cada parcela, con el fin de obtener los individuos representativos que serán parte del muestreo. Una cifra aceptable, según este método, está en torno a 10 por cada 1.000 árboles a muestrear en un monocultivo por parcela. Cuanto mayor es el número de árboles seleccionados por parcela mayor representatividad tendrá ésta. Es decir, el tamaño de la muestra, si es adecuadamente grande, nos permite tener una mayor garantía de que se haya conseguido que los grupos sean homogéneos (Argibay 2009). Con el fin de optimizar la representatividad estadística y la economía de la investigación, el método de Hapla y Saborowski (1984) se aplica para la determinación del tamaño de muestra:

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

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 significación 2,5% (Sachs 1984). s= desviación estándar máxima. l= precisión absoluta deseada, que se define como  $l = 0,01 * d * x_{\min}$ . d= dada precisión relativa de 95%, de forma que  $d = 5$ .  $x_{\min}$  = valor promedio más bajo de todas las muestras.

También según el método desarrollado por Hapla y Saborowski (1987) y tras diferentes estudios estadísticos sobre características y propiedades de la madera con diferentes especies leñosas (Seeling 1991, Dix *et al.* 1992, Oliver-Villanueva 1993, Wobst 1995, Peters 1996, Hapla *et al.* 2000) una muestra de un mínimo de

15 árboles representativos por parcela es suficiente para alcanzar grados de confianza del 95%.

Siguiendo este método y las experiencias contrastadas con diferentes especies leñosas, se decidió tomar una muestra mínima de 15 árboles por parcela. En algunos casos, como en las especies agrícolas, se trata de árboles coetáneos, de un mismo origen y que se encuentran en iguales condiciones de sitio; minimizando, por tanto, la variabilidad que aportarían estos factores, podemos considerar que la elección mínima de individuos por parcela es una cantidad sobradamente representativa para realizar las estimaciones y los diferentes análisis pretendidos en este estudio. Siguiendo la recomendación de diferentes autores (Seeling 1991, Sauter 1992, Oliver-Villanueva 1993, Hapla *et al.* 2000), se tiene además la precaución de desestimar los árboles del borde de la parcela, los crecidos con fustes excesivamente horquillados y los que muestren afecciones considerables de hongos o insectos, ya que éstos no son representativos.

Los individuos seleccionados corresponden a aquellos que tras un análisis de distribución normal, donde se obtiene el promedio, desviación estándar (negativa y positiva), mínimos y máximos para las variables DAP y altura (H), se determina el rango aceptable para estas variables que debe cumplir el individuo seleccionado para ser considerado representativo de la parcela. Una vez localizados se eligen los 15 árboles al azar, evitando que sean colindantes, y se les miden las variables dendrométricas principales (diámetros, altura y/o longitud).

### 3.2.3 Toma de datos de muestras

Las mediciones dendrométricas son realizadas en árbol en pie, con forcípula para fuste y con pie de rey para ramas de diámetros inferiores a 15 cm. La altura del árbol se obtiene con un hipsómetro marca Suunto. Se utiliza, además, una cinta métrica para determinar densidad de plantación.



**Figura 34.** Determinación de diámetros con forcípula en fuste  
Fuente: Elaboración propia

En fuste, el DAP y el diámetro medio ( $D_m$ ) representativo se han obtenido siguiendo la metodología de Siostrzonek (1958) midiendo el diámetro máximo del fuste según la altura de medición, para luego con la forcípula girar  $22,5^\circ$  siguiendo el sentido de las agujas del reloj y registrando el diámetro correspondiente.

La toma de datos de ramas sólo se realiza en frutales, ya que a diferencia de paulonia y encina estos requieren de podas anuales o bianuales, siendo material biomásico que debe ser ponderado. También se realiza siguiendo la metodología de Siostrzonek (1958) para la determinación del diámetro representativo referencial ( $D_0$ ) a 5 cm de la base de la rama. La longitud de la rama se mide con una cinta métrica.

En la copa (sólo en frutales), la toma de datos de ramas se subdividió en 2 clases diamétricas (diámetros  $< 7,0$  cm y  $\geq 7,0$  cm) registrando el diámetro de la base, diámetro medio y diámetro superior ( $\geq 1,0$  cm) de la rama.

Por simple conteo y extrapolación se estima el número de ramas existente en la copa para todo el conjunto de ramas.

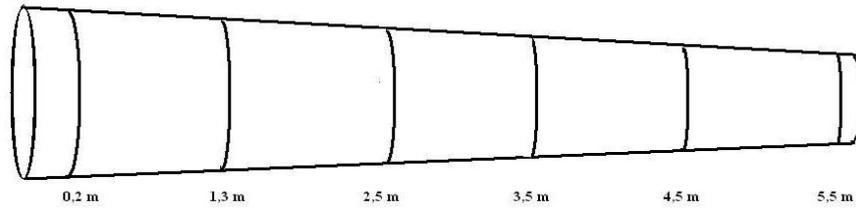
#### **3.2.4 Recolección de muestras**

La toma de muestras se dividió en ramas y fuste.

##### *a) Fuste*

Sólo se considera el fuste para el cultivo energético y la especie forestal, ya que estas especies (paulonia y encina) poseen uno del tipo escurrente, a diferencia de los frutales que poseen un fuste de estructura delicuescente.

En fuste la toma de muestras se realizó con la tala de los árboles seleccionados más representativos de cada parcela, obteniendo seis discos de muestras por individuo hasta los 5,5 m de altura del árbol aproximadamente, con el fin de obtener resultados más representativos.



**Figura 35.** Muestreo de fuste a seis alturas  
Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenidas todas las muestras, éstas fueron llevadas a laboratorio para su caracterización (análisis físicos, químicos y energéticos) de acuerdo a las normas técnicas establecidas. Con el fin de disponer de material suficiente para estos ensayos, se tomaron dobles discos de cada altura.

#### *b) Ramas*

Se tomaron muestras de este tipo de material, ya que los desechos de las ramas obtenidas de la poda o de la corta del árbol completo corresponden a biomasa residual que puede aportar como materia prima fundamentalmente para bioenergía, pero también se podrían incorporar a la industria del tablero de partículas.

Las ramas de primer orden se consideraron parte del fuste, ya que poseen características visuales similares a éste con respecto al resto de las ramas, por lo que no son representativas y no corresponden al tipo de ramas de podas, siendo éstas las de segundo y/o tercer orden.

La toma de muestras de ramas se subdividió en 2 clases diamétricas:

- i. Diámetro  $< 7,0$  cm: En éstas se seleccionaron tres ramas representativas por árbol muestreado, tomando como muestra la sección inferior y superior de cada rama. Las muestras fueron tomadas en las tres especies frutales seleccionadas en este estudio.
  
- ii. Diámetro  $\geq 7,0$  cm: En estas se seleccionó una rama representativa por árbol muestreado, debido a que es de mayor envergadura y, por lo general, corresponden a ramas productivas, tomando como muestra la sección inferior de la rama. Estas muestras fueron tomadas en naranjo y olivo, no se realizó en almendros, debido a que por su estructura, de pocas ramas, cortar una rama de esta envergadura supone una pérdida de producción de frutos importante en el árbol.



**Figura 36.** a) Ramas de diámetro  $< 7,0$  cm y b) Ramas de diámetro  $\geq 7,0$  cm  
Fuente: Elaboración propia

### **3.3 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA**

Tras la selección y medición de los árboles de estudio se procedió a la caracterización morfológica procedente de la biomasa de fuste y ramas, dependiendo de la especie, con el fin de poder estudiar su aptitud como materia prima para tableros o como biocombustible sólido.

En cada especie y en cada individuo seleccionado se determinó el porcentaje de albura, duramen, y corteza, ya que a priori se consideró que estos parámetros morfológicos de la madera y sus variaciones pueden influir en la elección del producto que se resuelva obtener de esta materia prima, tanto en el ámbito energético como en el industrial.

#### **3.3.1 Porcentaje de albura y duramen**

Las distintas características que presentan entre ellas la albura y el duramen (contenido de celulosa, lignina, resistencia al ataque microbiológico, etc.) influyen en los distintos productos que se puedan obtener (Poblete y Sánchez 1991). Por esto es necesario conocer sus porcentajes de participación.

En las muestras obtenidas en campo que contienen tanto albura como duramen primero se obtiene el área promedio, para luego determinar sus porcentajes, siguiendo la metodología descrita por Hapla *et al.* (2000) y Oliver-Villanueva y Becker (1993).

Para determinar el área de cada sección (albura y duramen) se determinó el área total y el área del duramen, obteniéndose el área de la albura con la resta de las

dos primeras áreas. Luego de tener los porcentajes de albura y duramen se calcula el porcentaje de corteza de la misma manera.

Para la correcta medición de los diámetros se utilizó la metodología de Siostrzonek (1958). Para su medición se requiere una regla graduada en el sistema métrico y su obtención es en metros cuadrados ( $m^2$ ) para luego transformarlo a porcentaje.

#### **3.3.2 Porcentaje de corteza**

En la industria forestal las alteraciones más importantes que se producen al incorporar corteza, reemplazando a la madera, están relacionadas con la estructura anatómica y la composición química de este material. Por esto la importancia de determinar el porcentaje de ésta, ya que varía entre árboles y especie (Poblete y Sánchez 1991).

El porcentaje de corteza en fuste y ramas se obtiene a partir del diámetro representativo por medio de la metodología de Siostrzonek (1958), sumándose la longitud que abarca en cada lado de la sección transversal medida.

En fuste se midió el diámetro total con forcípula "R" y se extrajo la corteza de ambos extremos del fuste por medio de un extractor de corteza, teniendo así un "r" promedio correspondiente al ancho de la corteza, siguiendo la metodología descrita por Oliver-Villanueva (1993).

En ramas, el porcentaje de corteza, se obtuvo de dos secciones de la rama, se tomó una muestra de la parte inferior y otra de la parte superior de la rama

estableciendo un promedio del porcentaje de corteza. En todos los casos estos resultados son expresados por medio de representaciones gráficas.

La norma que ha sido utilizada como base para este estudio en la determinación del contenido de corteza mínimo exigido en tableros es la DIN 68763.

### 3.4 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LAS ASTILLAS

#### 3.4.1 Determinación de densidad

Se determinó la densidad básica que es la relación de la masa en estado anhidro y el volumen con un contenido de humedad mayor o igual a 30% (estado verde), la densidad normal que es la relación entre la masa y el volumen de la madera con un contenido de humedad igual al 12%, y la densidad anhidra que es la relación entre masa y el volumen de la madera anhidra (seca), según Kollmann (1959).

Se toma cada muestra y se determinó el peso saturado, para luego secarla en una estufa marca Selecta modelo Select-Horn de temperatura máxima de 1100° C (ver figura 38) hasta peso constante, a una temperatura de  $103 \pm 2$  °C; determinándose en ese momento el peso seco de la muestra. Con estos datos se determinaron los valores de peso saturado y peso anhidro del material. Para comprobar que se logra el peso anhidro se realizaron pesadas diarias hasta una masa constante, en un intervalo de 24 horas. Para ello, se utilizó una balanza electrónica de precisión 0,001 g marca Mettler Toledo (ver figura 38).

La determinación de la densidad básica 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, y el más utilizado para la medición de material leñoso de formas irregulares. 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.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

El cálculo de densidad se realizó en fustes para encina y paulonia, mientras que en frutales se realizó en ramas.

La densidad se calcula mediante la siguiente fórmula (Olesen, 1971):

$$P_c = (m_c \times m_c^*) P_a$$

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



**Figura 37.** Determinación de la densidad de la madera por el teorema de Arquímedes, según Olesen (1971)  
Fuente: Elaboración propia

El material utilizado corresponde a un recipiente, una balanza de precisión electrónica y un armazón confeccionado para el sostén para la inmersión de las muestras, compuesto por una columna, un cable rígido.

### 3.4.2 Determinación de la humedad

Para ramas con diámetros < 7,0 cm, de acuerdo con la especificación técnica CEN/TS 14774, *Biocombustibles sólidos. Métodos para la determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa*, se pesa un recipiente de secado vacío aproximando a 0,1 g. En caso de que persista humedad en su interior, esta debe incluirse en el cálculo. Se seca el recipiente de la muestra en la estufa, pesándose antes y después del secado. Una vez pesado el recipiente de secado con la muestra, se coloca en la estufa a temperatura controlada ( $103 \pm 2$  °C). Se calienta el recipiente con la muestra, por 24 horas o más, hasta que se alcanza una masa constante.

En ramas mayores a 7,0 cm de diámetro no es posible seguir dicha norma, debido a las mayores dimensiones y lo irregular de las formas de estas, lo que hace imposible, por ejemplo, usar un tipo de recipiente estándar para todas las muestras, por lo que se ha optado por realizar una metodología propia para el secado y obtención del contenido de humedad.

Las muestras fueron pesadas directamente sobre la balanza de precisión de 0,0001 g sin necesidad de recipientes, lo mismo ocurrió al ingresarlas a la mufla, sólo se utilizó de base, sobre los ladrillos, una placa de aluminio con el fin de evitar el contacto directo de las muestras con la mufla, como precaución ante la posibilidad de desprendimiento de corteza.

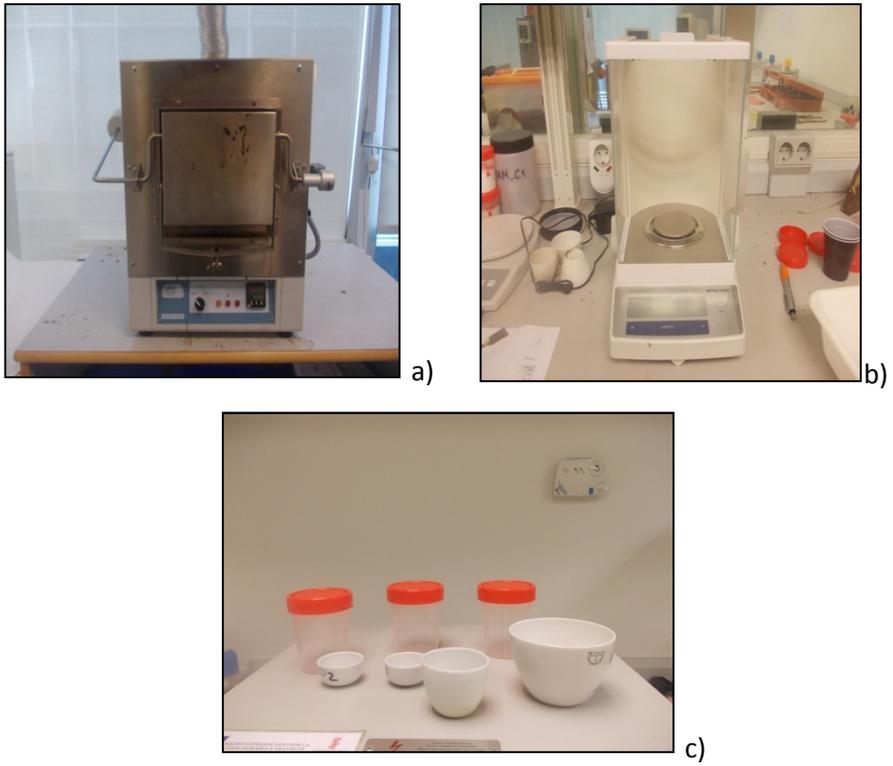
La determinación del contenido de humedad de la madera durante el secado, en ambos tipos de ramas, se obtiene utilizando la siguiente ecuación (Kollmann 1959):

$$CH = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100\%$$

Donde, CH es el contenido de humedad (%); Ph es el peso húmedo (g) y Ps es el peso secado en estufa (g).

Para ello, se requiere en el laboratorio los siguientes aparatos.

- Estufa de secado. Capaz de ser controlada a una temperatura de  $103 \pm 2$  °C, con circulación forzada y termostato para mantener temperatura estable
- Recipientes de secado adecuados. De material no corrosible, no oxidable, y resistente al calor, como por ejemplo bandejas metálicas o platos de vidrio o porcelana.
- Balanza. Con una precisión de 0,0001g para permitir pesar la muestra.



**Figura 38.** a) Estufa de secado, b) balanza de precisión de 0,0001 g, c) recipientes  
Fuente: Elaboración propia

### 3.5 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LAS ASTILLAS

Teniendo en cuenta las características del material se realizó el análisis químico que ayuda a prever el tipo de emisiones y productos resultantes de la combustión o gasificación de la biomasa, ayudando a la operación y/o diseño de la caldera y el gasificador de las fases posteriores. También se identificaron algunos otros micros componentes inorgánicos presentes en un análisis secundario. Ambos análisis fueron realizados en el laboratorio del Departamento de Química del ETSIAMN de la Universidad Politécnica de Valencia.



**Figura 39.** Laboratorio del Departamento de Química del ETSIAMN, UPV  
Fuente: Elaboración propia

Para realizar cada una de las determinaciones experimentales, en primer lugar hubo que adaptar la muestra. Para la realización de la mineralización se trabajó sobre la muestra seca, triturada, homogeneizada e incinerada en mufla a 450 °C. Para la determinación del nitrógeno (N) total se trabajó con la muestra seca, triturada y homogeneizada.

### 3.5.1 Determinación de la materia seca

La determinación del contenido en materia seca consistió en una desecación directa con aire forzado en una estufa a una temperatura de  $65 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , hasta alcanzar un peso constante, aproximadamente en 24 horas, calculando el residuo por diferencia de peso (Matissek *et al.* 1998).

Los materiales y equipos empleados en la determinación del contenido en materia seca han sido: Estufa de desecación con aire forzado y con regulación de la temperatura, desecador, cápsulas de porcelana y una balanza analítica con error de  $\pm 0,0001\text{g}$ .

El procedimiento consistió en introducir de 50 a 70 g de muestra (exactamente pesado) en una cápsula de porcelana previamente pesada y tarada. A continuación se colocó en la estufa a  $65 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta alcanzar un peso constante. Se dejó enfriar en el desecador y a continuación se determinó el peso de la muestra desecada.



**Figura 40.** Desecador con muestras para su secado  
Fuente: Elaboración propia

La cantidad de materia seca, es decir, el contenido de sustancia seca (SS) expresado como porcentaje se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ SS} = \frac{P (\text{seco} + \text{crisol}) - P (\text{crisol})}{P (\text{muestra})} \times 100$$

Donde, P (seco + crisol) es el peso (g) de la cápsula de porcelana más la muestra desecada. P (crisol) es el peso (g) de la cápsula de porcelana. P (muestra) es el peso (g) de la muestra fresca.

La diferencia porcentual entre el contenido en materia seca es el contenido en humedad de la muestra.

### **3.5.2 Mineralización y determinación del contenido en cenizas**

Posteriormente a la determinación de la materia seca se tritura la muestra desecada en un molinillo eléctrico de laboratorio, para facilitar el proceso de análisis y sobre todo para lograr una buena homogeneización de las muestras. Las muestras secas, trituradas y homogeneizadas se guardan en viales de plástico correctamente etiquetados.

En la mineralización de la muestra, se destruye toda la materia orgánica en cápsulas o crisoles de porcelana por incineración en horno de mufla a 450 °C (MAPA 1994).

Los materiales y aparatos necesarios para la realización de la mineralización son (Figura 41):

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

- Horno de mufla (Selecta/Select-Horn y Carbolite CWF-100).
- Balanza analítica con error de 0,0001 g (Cobos CB Complet).
- Placa calefactora.
- Embudo y filtro Whatman.
- Pipeta de 5 mL y material de vidrio volumétrico.



**Figura 41.** Materiales y aparatos utilizados en la mineralización  
Fuente: Elaboración propia

Los reactivos utilizados fueron ácido clorhídrico concentrado con una densidad de 1,19 g/L y agua destilada.

El procedimiento experimental consiste en pesar 2 g de la muestra molida en el crisol de porcelana previamente tarado e identificado. Se introduce en la mufla fría y se eleva la temperatura a 450 °C manteniéndose durante dos horas. Tras sacarlo de la mufla se deja enfriar, observando que las cenizas obtenidas son generalmente claras. A continuación, se humedecen las cenizas con 2 o 3 mL de agua destilada y 2 mL de ácido clorhídrico concentrado, agregándolo lentamente. En la campana de extracción, se calientan los crisoles sobre placa calefactora a unos 60 °C, durante 5 minutos aproximadamente, hasta la aparición de los primeros vapores. Por último se filtra, enjuagando el crisol tres o cuatro veces con agua templada destilada y se enrasa a 50 mL en un matraz aforado.

El contenido mineral total (porcentaje de cenizas) sobre material vegetal fresco se calcula mediante la fórmula:

$$\text{Cenizas (\%)} = \frac{P_1 - P_2}{P} \times 100$$

P es peso de la muestra, en gramos.  $P_1$  es peso del crisol con las cenizas, en gramos.  $P_2$  es peso del crisol vacío, en gramos.

#### **3.5.3 Análisis elemental**

El conocimiento del contenido de C, H, O, N y S en la biomasa nos permite predecir los compuestos que se producirán y/o desprenderán en la combustión, digestión u otros procesos determinando las cantidades de productos obtenidos y calor desprendido en las mismas. Estos productos de las reacciones serán

biocombustibles o residuos sólidos y gaseosos (emisiones). Por lo que resulta necesario conocer los valores de estos y las concentraciones máximas permitidas principalmente por la industria de los pellets (EN 14961-2), ya que la normativa de la industria del tablero no contempla el análisis elemental como un factor determinante en la fabricación de sus productos. El análisis se dividió en restos de corta (árboles frutales) y árboles enteros (cultivo energético y especie forestal), según la norma EN 14918.

#### *a) Determinación del carbono*

Para determinar el porcentaje de carbono (C) se utilizó la siguiente fórmula:

$$C = 100 - (\text{CH \%} + \text{Cenizas \%} + \text{Volátiles \%})$$

Donde, C es porcentaje de carbono y CH% es contenido de humedad.

#### *b) Determinación del nitrógeno total*

La determinación del contenido en N total en la muestra se realiza por el método convencional de Johan Kjeldahl (Mckenzie 1994). En la cual la digestión de los compuestos orgánicos se produce en medio ácido, en una batería de digestión a 420°C, con tubos especialmente resistentes a las temperaturas altas y a la corrosión. El medio ácido es ácido sulfúrico concentrado y como resultado de la digestión se obtienen sulfato amónico, dióxido de carbono y agua principalmente. La destilación se lleva a cabo en la unidad de destilación, la cual aporta un volumen de hidróxido sódico fijado, y recoge el amonio liberado en la destilación sobre ácido bórico, de forma automática. El producto de la destilación se determina volumétricamente.

Los materiales empleados para la determinación de N total son (Figura 42 de izquierda a derecha):

- Sistema automático de destilación (Kjeltec 2100).
- Equipo de digestión (Foss Tecator, Höganäs, Sweden).
- Material de vidrio volumétrico.



**Figura 42.** Materiales para determinación de N  
Fuente: Elaboración propia

Los reactivos empleados en la determinación del contenido en N total son:

- Catalizadores: mezcla de sulfato potásico, sulfato de cobre y selenio puro en proporción de peso 10-1-0.1.
- Ácido bórico al 2% con disolución indicadora.
- Mezcla ácida: mezcla de 5 volúmenes de ácido fosfórico concentrado por cada 100 volúmenes de ácido sulfúrico concentrado.
- Disolución de ácido sulfúrico 0.05 N.
- Disolución de hidróxido sódico al 40%.

El método experimental para la determinación se realiza en tres pasos; digestión, destilación y valoración. Para realizar la digestión, se pesan cantidades de muestra

seca y triturada aproximadas de 0,5 g, siendo necesario conocer el peso exacto de la muestra con una balanza analítica, se pasa la muestra al tubo especial de digestión y se añade la mezcla de catalizadores y 10 mL de la mezcla de ácidos. Se agita suavemente el tubo digestor y por último se deja reposar para evitar excesiva formación de espuma, colocándolo seguidamente en el bloque digestor a 420 °C, durante 30 minutos. Al mismo tiempo que se prepara la muestra para la digestión se preparará un blanco.

Para la destilación, se sacan los tubos en el soporte porta-tubos y se dejan enfriar durante 10 minutos. Transcurrido dicho tiempo se añaden con precaución 50 mL de agua destilada a cada tubo, se coloca el tubo de digestión en la unidad de destilación previamente preparada y ajustada, se sitúa en la unidad de destilación un Erlenmeyer de 250 mL, con 15 mL de la mezcla de ácido bórico-indicador, el cual recoge el NH<sub>3</sub> destilado al añadir el hidróxido sódico, y una vez recogidos de 100 a 125 mL de destilado, se valora el producto de destilación con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.05 N, hasta el viraje de verde a rojo pálido, anotando el volumen de ácido gastado hasta el punto de equivalencia.

Para calcular la cantidad de N total expresada en porcentaje sobre la materia seca, se realiza la siguiente fórmula:

$$N_{\text{total}} = \frac{(V_{\text{muestra}} - V_{\text{blanco}}) \times f \times n}{P} \times 14 \times 100$$

Donde, V<sub>muestra</sub> es Volumen (mL) de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> gastado en la muestra. V<sub>blanco</sub> es Volumen (mL) de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> gastados en el blanco. f es Factor del H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. n es Normalidad del H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. P es Peso (mg) de la muestra.

Los resultados quedan expresados en % de N total.

El N es un elemento en que, además, su concentración es monitoreada al igual que los elementos secundarios.

Los elementos químicos analizados C, H, O, N, S son utilizados principalmente para el cálculo del poder calorífico inferior, a excepción del C y S que no son requeridos como tal, pero se determinaron sus valores por las combinaciones que se pueden dar en diversas formas, principalmente con H, O, y otras sustancias que pueden, posteriormente, participar o no en la combustión (IDAE 2007).

Finalmente el S junto al análisis secundario fue determinado por el laboratorio químico del Laboratorio Agroalimentario de la Generalitat Valenciana.

#### **3.5.4 Análisis secundario**

La biomasa leñosa para la producción de biocombustibles presenta la dificultad de que está formada por sustancias estructuralmente complejas difíciles de degradar (Barradas 2009).

De igual forma es importante determinar el contenido de elementos que pueden dañar el medio ambiente o a las personas, como los metales pesados o algunos óxidos que se pueden formar por la combustión de la biomasa o que ya se encontraban incorporados en la madera, sobre todo en biomasa de base agrícola, a través de suelos agrícolas contaminados. Por esto, se determinaron los elementos químicos que son monitoreados en la producción industrial de pellets (norma EN 14961-2) y de la industria del tablero (norma EPF).

#### *a) Determinación de elementos metálicos y azufre por ICP*

En el interior de un plasma los átomos presentes sufren procesos de excitación térmica y de emisión de luz. Cada elemento tiene una estructura electrónica definida que le confiere unas líneas de emisiones características y distintas del resto de los elementos de la tabla periódica. La intensidad de luz emitida en cada una de estas líneas está relacionada con la concentración de átomos en el plasma siempre que este plasma permanezca estable.

Para realizar mediciones con el ICP es necesario ajustar la longitud de onda de cada línea de emisión a emplear y calibrar el equipo para cada elemento correlacionando la intensidad emitida con la concentración del elemento a determinar. Emisión atómica en ICP.

El espectrofotómetro de emisión atómica en plasma es un equipo Varian Vista AX (figura 43) y se emplea para determinar la concentración de Pb, Cr, Ni, Zn y S de la disolución mineralizada.



**Figura 43.** Espectrofotómetro de emisión atómica ICP para determinar los minerales y S  
Fuente: Elaboración propia

Para la determinación, en una gradilla, preferentemente la central con tubos grandes, se coloca el blanco (patrón 0) y todos los patrones de trabajo. En otra gradilla se coloca un control y las muestras, que el equipo lee a continuación de los patrones, entre las muestras se colocan controles que consisten en disoluciones que tengan concentración conocida de los elementos a determinar. Dichos controles se colocan como máximo cada 17 muestras o el final de la series cortas.

Con este método se miden los diversos elementos a varias longitudes de onda, empleándose una longitud de onda u otra en función de la concentración de la muestra.

Este equipo es capaz de realizar todos los cálculos, ajustando las lecturas a una ecuación del tipo  $I = a + b [M]$  (lineales) o del tipo  $I = a + b [M] + c \cdot [M]^2$  (cuadrática), de manera que presenta los resultados en concentración.

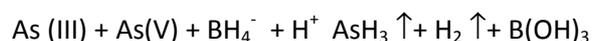
La relación de longitudes de onda empleadas para cada uno de los elementos analizados por el ICP han sido:

#### *b) Determinación de arsénico por fluorescencia*

Se puede aplicar a la determinación de arsénico (As) en muestras de concentraciones de As superiores a 2 µg/L y hasta 100 mg/L realizando una dilución.

La muestra se prepara, destruyendo la materia orgánica y dejando libre el As en forma de As (V). Tras la digestión se realiza una dilución adecuada y se introduce la muestra en el equipo analizador.

Dentro del analizador, el As reacciona con borohidruro sódico según la reacción:



El As III reacciona rápidamente con el borohidruro mientras que el As V lo hace con lentitud, por ese motivo se añade yoduro a la disolución de la muestra para que reduzca previamente el As (V) a As (III).

La arsenamina formada es arrastrada por una corriente de argón (Ar) hasta la celda de medida. La combustión del H que formado en la reacción produce la atomización del As, que siendo irradiado por una lámpara de cátodo hueco de As, emite fluorescencia, que es medida y correlacionada con la concentración.

El equipo empleado es un analizador PS Analytical compuesto por los siguientes módulos:

- Porta muestras con sus vasos
- Generador de hidruros
- Detector de fluorescencia EXCALIBUR
- Ordenador con Software Avalon

Los patrones empleados son disoluciones comerciales preparadas de patrones trazables, normalmente de 1.000 ppm, a partir de ésta concentración, se preparan patrones de 0,1; 0,2; 0,5 y 1.0 µg L-1 para realizar la calibración.

#### *c) Determinación de mercurio por espectroscopia de absorción atómica mediante analizador automático*

El mercurio (Hg) es un elemento metálico cuya presencia debe ser controlada. El objetivo de este procedimiento es determinar el contenido en Hg en la muestra por espectroscopia de absorción atómica mediante analizador automático (AMA).

El analizador AMA de Hg determina trazas en distintas matrices, realizando un secado previo de la muestra a 150 °C para una posterior combustión que descompone la muestra a 700-800 °C en un ambiente rico en oxígeno eliminando elementos interferentes. Un amalgamador de oro (Au), que se encuentra a 900 °C, recolecta todo el mercurio de los gases desprendidos de la muestra, retiene el vapor de Hg sobre un tubo cerámico de oro-plata y envía el Hg al sistema de cubeta a través de un rápido calentamiento.

El espectrómetro de doble cámara determina específicamente Hg en un rango dinámico; el sistema de detección está basado en un espectrómetro estándar de absorción atómica con una longitud de onda específica de 253,7 nm. El rango de calibración va desde 0,01 a 30 ng L<sup>-1</sup>.

Una vez que se obtuvieron los resultados se pudo establecer los niveles de concentración de los elementos químicos analizados, determinando si sus valores se encuentran dentro de los límites establecidos por las normas ya señaladas.

### 3.6 CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS ASTILLAS

Se caracterizó energéticamente las astillas de las especies en estudio para establecer su capacidad como biocombustible sólido (pellets, briquetas). La que se ha llevado a cabo en los laboratorios del Instituto de Ingeniería Energética (IIE) durante 2011.

Se pretende conocer el poder calorífico, porcentaje de cenizas y volátiles, análisis elemental (CHON), análisis de elementos secundarios.

En la actualidad, las normas referentes a biocombustibles sólidos son desarrolladas por el AEN/CTN 164 (Jiménez y Sánchez 2007) y entre ellas las usadas en este estudio son:

1. EN CENT/TS 14918 EX *Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico.*
2. EN CENT/TS 14961 EX *Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles.*
3. EN CENT/TS 15234 EX *Biocombustibles sólidos. Aseguramiento de la calidad del combustible.*
4. EN CEN/TS 14775 EX *Biocombustibles Sólidos. Método para la determinación del contenido de ceniza.*

Para la determinación del porcentaje de cenizas, tiempos y temperaturas de combustión se ha usado una mufla a temperatura máxima 1.100°C (figura 38).

#### 3.6.1 Poder calorífico

El poder calorífico se define como el calor desprendido por kilogramo de combustible en combustión completa a la presión y temperatura atmosférica normal (Kollman 1959 y Moglia *et al.* 2007). Siendo el método de ensayo aplicado basado en la norma UNE-EN 14918.

Las muestras analizadas se han dividido en dos tipos: ramas  $< 7,0$  cm y  $\geq 7,0$  cm. Cuando corresponda, dentro de este tipo de muestras existen dos subgrupos, el primero denominado “mezcla” que es el material astillado de la rama en su estado natural que comprende madera y corteza y la segunda que es “corteza”, que se trata sólo de este material.

Las muestras obtenidas corresponden a muestras recién cortadas, llevadas directamente a laboratorio para su análisis, por lo que no han logrado su secado natural. Por lo que, se debe tener en cuenta que cuando la madera tiene agua su poder calorífico se reduce, primero por el propio contenido de agua y segundo porque parte de la energía calorífica de la madera se invierte en evaporar agua (Vignote y Martínez 2006).

Para poder efectuar las pruebas es necesario que las muestras se transformen en aserrín o fragmentos menores a 5 mm. En el caso de las muestras de diámetros  $\geq 7,0$  cm se utilizó un triturador portátil marca Garland modelo BGS 2400, luego de ser triturado el material fue fragmentado en partes más pequeñas en un molino marca IKA-WERKE modelo M20 obteniendo el aserrín. En ramas con diámetros  $\geq 7,0$  cm, una vez obtenidas las astillas (5 cm de longitud como máximo), se dejan secar 2 días, para introducirlas en un martillo de trituración marca Oliotechnology

modelo ETCR110 Trituradoras/afinadora 11kW obteniéndose el aserrín (0,5-5 mm).



**Figura 44.** Máquinas utilizadas para la transformación de la madera en astillas (astilladoras) o aserrín (molino) de diferentes tamaños.  
Fuente: Elaboración propia

Para determinar el poder calorífico superior (PCS) las muestras deben estar acondicionadas a  $23 \pm 2$  °C de temperatura y  $50 \pm 5$  % de humedad hasta peso constante, con una precisión de 0,001 g (balanza de precisión Mettler Toledo de 0,0001 g modelo AB 304-S/Fact). Una vez que las muestras se encuentran preparadas son quemadas bajo condiciones normalizadas, a volumen constante, a una atmósfera de presión, en un calorímetro de bomba automatizado marca Cal2k modelo ECO, calibrado por combustión de ácido benzoico certificado y utilizando un cablecín de níquel-cromo que funciona con alambre de ignición (diámetro de 0,16 mm). El método de preparación de muestra es el del crisol (crisol de cuarzo, de diámetros de 20 mm) y los resultados son entregados en MJ.



**Figura 45.** Calorímetro marca Cal2k modelo ECO, laboratorio del IIE-UPV.  
Fuente: Elaboración propia

El poder calorífico inferior (PCI) se puede calcular en base seca y libre de cenizas según la siguiente ecuación (norma UNE-CEN/TS 15234 EX):

$$q_{p,net,d} = q_{V,gr,d} - 212,2 \times w(H)_d - 0,8 \times [w(O)_d + w(N)_d]$$

Donde  $q_{p,net,d}$  es el poder calorífico inferior de la materia seca a presión constante (MJ/Kg);  $q_{v,gr,d}$  es el poder calorífico superior de materia seca (MJ/Kg);  $w(H)_d$  es el contenido en H, en porcentaje de masa, del biocombustible (seco) libre de humedad (incluyendo el H del agua de hidratación de la materia mineral así como el H en la sustancia del biocombustible);  $w(O)_d$  es el contenido en oxígeno, en porcentaje de masa, del biocombustible libre de humedad;  $w(N)_d$  es el contenido en N, en porcentaje en masa, del biocombustible libre de humedad.

El Poder Calorífico Inferior (a presión constante) según se recibe (biocombustible húmedo) se puede calcular a partir del poder calorífico inferior en base seca según la ecuación (norma CEN/TS 15234 EX):

$$q_{p,net,ar} = q_{p,net,d} \cdot \frac{100 - M_{ar}}{100} - 0,02443 \times M_{ar}$$

Donde  $q_{p,net,ar}$  es el poder calorífico inferior según se recibe a presión constante (KJ/Kg);  $q_{p,net,d}$  es el poder calorífico inferior para ateria seca a presión constante (KJ/Kg);  $M_{ar}$  es el contenido de humedad según se recibe (% en masa); 0,02443 es el factor de corrección de la entalpía de vaporización (a presión constante) para agua (humedad) a 25°C (MJ/Kg para el 1% en masa de humedad).

### 3.6.2 Cenizas

El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. En los procesos térmicos de aprovechamiento de la biomasa que incluyen la combustión, es importante conocer el porcentaje

contenido de ceniza en la biomasa, ya que en algunos procesos puede causar un deterioro de los equipos por formación de escorias.

El material (aserrín) fue clasificado de la misma forma que se hizo para el PC.

Se utiliza la norma EN 14775 EX: 01. Método para la determinación del contenido de cenizas. Biocombustibles sólidos. Se pesa una pequeña cantidad de la muestra en balanza de precisión de 0,0001 g, balanza de precisión Mettler Toledo de 0,0001 g, marca modelo AB 304-S/Fact se deseca y posteriormente se incinera a  $550\pm 10^{\circ}\text{C}$  en una mufla marca Selecta modelo Select-Horn (con temperatura máxima de  $1100^{\circ}\text{C}$ ).

Tras determinar un periodo de tiempo, la muestra se acondiciona a temperatura ambiente y se vuelve a pesar. El proceso se debe repetir hasta alcanzar peso constante.

Se calcula el contenido de cenizas como la cantidad de cenizas referidas a la muestra inicial desecada, expresada en porcentaje.

#### **3.6.3 Materia volátil**

La determinación de las materias volátiles se hace sobre la misma muestra seca sobre la que se determinó el contenido de humedad. Esto se realiza hasta una temperatura y tiempo determinado produciéndose una pérdida de peso que es lo que se considera como materias volátiles.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

---

Se utiliza una cápsula de platino tapada y se somete la muestra a una temperatura de  $950 \pm 20$  °C durante siete minutos, luego las muestras son trasladadas, por 20 minutos, a una mufla a 105°C para un descenso más suave de la temperatura del crisol. Una vez transcurrido este tiempo las muestras pasaron al desecador, para su enfriamiento a temperatura ambiente, antes de ser pesadas.

$$\text{Materia Volátil (\%)} = A - B$$

Donde A es la pérdida de peso en porcentaje (%) y B es la humedad en porcentaje (%).

Lo que permite estimar la cantidad de compuestos volátiles que evolucionan en las condiciones de este ensayo.

### 3.7 CARACTERIZACIÓN VOLUMÉTRICA DE LA BIOMASA AÉREA

#### 3.7.1 Relación diámetro y volumen fustal

Debido a que las dimensiones fustales, en frutales, no se condicen con las de árboles forestales, no se puede utilizar el DAP en la estimación de sus volúmenes, optándose por el diámetro a la altura media de cada fuste, y con la fórmula de Huber (1828) se logró estimar el volumen de cada árbol. Sin embargo, para algunas plantaciones de paulonia se mide a través del DAC, ya que no todas llegaban a 1,3 m de altura, en encina se mantiene el DAP como parámetro de referencia.

$$V_f = g_m \times H$$

Donde  $V_f$  es el volumen ( $m^3$ ),  $g_m$  el área basal ( $m^2$ ) en el punto medio de la sección y  $H$  la altura o longitud del fuste (m).

Una vez obtenido estos resultados, a través de gráficas, ecuaciones y del  $R^2$  se determinó la relación entre el diámetro y el volumen fustal para cada especie. Esta metodología es aplicable para las especies frutales y la forestal. Sin embargo, la determinación del volumen en el cultivo energético se determina de forma distinta, ya que existe un volumen aparente (el calculado con la metodología ya explicada) y un volumen real. Este último difiere del primero, ya que esta especie es hueca en la parte interna central del fuste, siendo este hueco de diámetro variable en altura, con un menor diámetro en la base (20 cm), aumentando al nivel del DAP (1,30 m), para luego ir disminuyendo en altura hasta la oclusión (sobre los 2,50 cm), por lo que se calculó el diámetro promedio del hueco a lo

largo de la altura del árbol, para así determinar su volumen y restarlo al volumen aparente obteniendo el volumen real.

### 3.7.2 Clases diamétricas

#### a) Fuste

Se determinaron las clases diamétricas del fuste para todas las especies de estudio, ya que es una variable que en frutales toma importancia cuando se decide arrancar una plantación, y es la variable principal en paulonia y encina para la determinación del volumen del árbol completo. Para su realización se miden los fustes más representativos. Estos se clasifican, en varios tipos de clases diamétricas de  $< 22,0$  cm subdividida en dos clases (7,0 a 15,0 cm y 15,0 a 22,0 cm) y  $\geq 22$ , cm. Los datos han sido normalizados, obteniéndose el promedio diamétrico de los frutales muestreados, desviación estándar ( $\sigma$ ) en su rango inferior y superior, mínimos y máximos.

#### b) Ramas

Se determina las clases diamétricas sólo para frutales. Para su realización se miden las ramas más representativas. Estas se clasifican en dos clases diamétricas ( $< 7,0$  cm y  $\geq 7,0$  cm). Los datos han sido normalizados, obteniéndose el promedio diamétrico de las ramas muestreadas, desviación estándar ( $\sigma$ ) en su rango inferior y superior, además de los mínimos y los máximos.

### 3.7.3 Morfología en fuste

El volumen, tanto en fuste como en ramas, de cada individuo ( $V_i$ ) se ha determinado a partir de un factor de forma  $f$ , que es el resultado entre el volumen real y el volumen del cilindro.

$$f = \frac{\text{Volumen real de la estructura}}{\text{Volumen del modelo}}$$

Este es un parámetro característico de la especie y clase diamétrica. No obstante, por su variabilidad estadística, se determinó la media y la dispersión para cada caso. Este factor puede normalizarse con la fórmula de Huber (1828) que define el *factor de forma verdadero* ( $f_v$ ).

Una vez localizados los árboles, se miden las variables dendrométricas principales (diámetros, altura y/o longitud) en fustes y ramas.

Se analizan por cada parcela los siguientes datos:

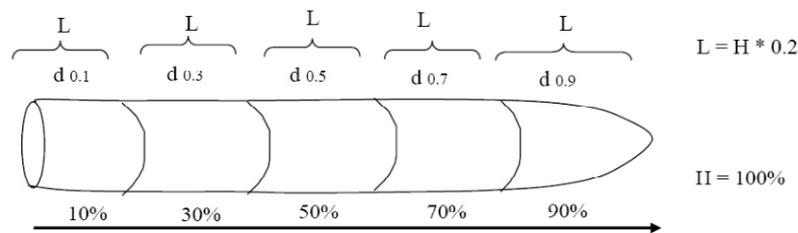
1. Fuste por árbol: diámetro medio ( $D_m$ ) en frutales, DAC y DAP en paulonia y DAP en encina, se obtienen al establecer con una forcípula el diámetro máximo, para luego girar  $22,5^\circ$ , en el sentido horario, obteniendo el diámetro más representativo según Siostrzonek (1958) (Oliver-Villanueva 1993). La altura del fuste se mide con cinta métrica en frutales e hipsómetro en paulonia y encina.

2. Copa por árbol: las ramas, en frutales, se evaluaron según la metodología de Hohenadl de 1936 (Prodan *et al.* 1997), ya que la conicidad de la rama no es lineal o continua, presenta irregularidades en su forma, es más bien discreta, por lo que se dividió en al menos cinco partes iguales midiendo un diámetro inicial y final para cada intervalo. Por último, se contabilizó el total de ramas del árbol para obtener el volumen de copa.

A continuación, la metodología explicada corresponde sólo a especies frutales, la que es necesaria para la determinación de la biomasa extraíble anualmente por labores referentes a la poda que no tienen lugar en las especies de paulonia y encina.

### 3.7.4 Determinación de volumen de ramas y copa

Como se señala anteriormente, se adaptó la metodología de Hohenadl (1936) dividiéndose en al menos tres partes iguales la rama midiendo el diámetro ecuatorial de la sección de forma que obtenemos un diámetro inicial y final para cada intervalo, tal como indica la Figura 46.



**Figura 46.** División del fuste en cinco partes iguales (Hohenadl 1936)  
Fuente: Prodan *et al.* (1997)

Por ende, el volumen de la rama es calculado con una adaptación de la fórmula de Hohenadl (1936) acotándolo al diámetro inferior, medio y superior de la rama:

$$V = \frac{\pi d^2}{4} \left( \frac{d_{0,1}^2}{d^2} + \frac{d_{0,5}^2}{d^2} + \frac{d_{0,9}^2}{d^2} \right) L$$

Donde V es el volumen (m<sup>3</sup>), L es el largo de la sección (m) y d es el diámetro (cm).

Con la estimación del volumen de las ramas medidas y su extrapolación al total aproximado de ramas contenidas en el árbol y/o extraídas de la poda, se determina la biomasa total de copa y/o el volumen podado respectivamente.

### **3.7.5 Relación volumen de copa y fustal**

Una vez conocido el volumen de fuste y el volumen de copa, se calculan funciones de ajuste obtenidas de una regresión simple, con el fin de establecer la relación del volumen de copa a partir del volumen ya cuantificado del fuste en cada especie frutal. Esto a través del R<sup>2</sup>.

### **3.7.6 Estimación de un modelo de predicción de volumen en ramas**

Para su evaluación se toman las variables diámetro inferior y longitud total de la rama. Así, por medio del software Statgraphics, se analizan modelos de regresión múltiples que definan funciones de volumen, ajustándose a modelos ya conocidos (Prodan *et al.* 1997): Näslund (1936/1937), Spurr (1952) y Schumacher-Hall (1933).

Se determina la ecuación de mejor ajuste entre el volumen y las variables utilizadas. Siendo la seleccionada, por medio del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y desviación estándar ( $\sigma_x$ ), como la ecuación a utilizar para el cálculo del volumen de residuos de podas.

### **3.8 CUANTIFICACIÓN BIOMÁSICA Y ENERGÉTICA POTENCIAL POR ESPECIE**

Para este capítulo se toma por referencia las estimaciones, ecuaciones y estadísticas descriptivas que se han obtenido del capítulo anterior sobre la determinación volumétrica de cada especie.

#### **3.8.1 Determinación del peso por árbol y toneladas por hectárea**

Para la cuantificación másica de la biomasa resulta necesario transformar los metros cúbicos obtenidos a una unidad de peso como kilos o toneladas, para esto basta con multiplicar el volumen ( $m^3$ ) obtenido anteriormente con la densidad básica ( $Kg/m^3$ ) consiguiendo así la biomasa contenida en un árbol, en kilos, subdividido en fuste, en ramas podadas, en copa y/o en árbol completo (biomasa aérea) dependiendo de la especie.

Una vez determinado el peso del árbol ( $Kg/árbol$ ), éste se multiplica por el número promedio de árboles por hectárea consiguiéndose las toneladas por hectáreas por especie.

#### **3.8.2 Determinación del potencial energético árbol y por hectárea**

Para la cuantificación del potencial energético de la biomasa resulta necesario transformar los Kg por árbol a MJ por árbol, lo que se logra al determinar el PCI promedio para cada especie. Por lo tanto, basta con multiplicar los Kg por árbol

por el PCI obteniéndose los MJ por árbol, posteriormente, y conociendo el número de árboles por hectárea, se consiguen los MJ/ha para cada especie.

Todos estos valores que se han logrado, son resultado de la adaptación de las ecuaciones obtenidas en la estimación del volumen de un árbol a ecuaciones ajustadas para Kg/árbol, t/ha, MJ/árbol y MJ/ha o GJ/ha.

### **3.9 ANÁLISIS DE LA ASTILLA**

Para determinar el potencial de fabricación de productos a partir de astilla de la madera en cada especie se analizaron los parámetros técnicos mínimos para la entrada de este material tanto en la industria de fabricación de biocombustibles sólidos (pellets) como en la industria de los tableros, principalmente en los tableros aglomerados de partículas.

Se contó con cuadros explicativos con los cuales se estableció si las diferentes propiedades y características analizadas en este estudio cumplen con la normativa vigente en ambos casos para cada especie.

#### **3.9.1 Tableros de partículas**

El análisis está fundamentado en la información obtenida de la guía técnica de la Federación Europea de Tableros “Standard for delivery conditions of recycled Wood del European Panel Federation” (EPF 2002), facilitada por ANFTA (Asociación Nacional de Fabricantes de Tableros).

#### **3.9.2 Biocombustibles sólidos: pellets**

Ésta se basó en el Manual para la certificación de pellets de madera para usos térmicos del Consejo Europeo del Pellet, que tiene como referencia la norma EN 14961-2.



## **CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN**



## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA

La caracterización morfológica implica la estadística descriptiva, en porcentaje, de ramas con diámetros < 7,0 cm e iguales o mayores a 7,0 cm.

Se ha determinado el porcentaje de albura, duramen, ya que es conocido que presentan diferencias entre sí (Hermoso 2001, Monteoliva *et al.* 2012), lo que puede influir en la elección del producto que se resuelva obtener de esta materia prima, tanto en el ámbito energético e industrial, ya que según Pelen *et al.* (1998) el duramen y la albura presentan diferencias anatómicas, estructurales y químicas. Estas diferencias afectan los procesos industriales (Bamber y Fukazawa, 1985). Por ejemplo, al fabricar tableros de partículas con madera de albura y duramen se ha demostrado que los tableros obtenidos son de diferentes calidades (Lelis *et al.* 1993; Dix y Roffael 1995).

#### 4.1.1 Especie forestal mediterránea

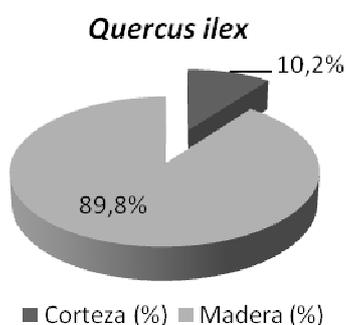
En la tabla 12 se presenta la caracterización morfológica (albura y corteza en porcentaje) y su estadística descriptiva para fuste.

**Tabla 12.** Caracterización morfológica del fuste de *Quercus ilex*

Parámetro	Min	- $\sigma$	Prom.	+ $\sigma$	Max	CV (%)
Albura	84,4...	87,2...	<b>89,8</b>	92,4...	93,3...	2,9
Corteza	6,7...	7,6...	<b>10,2</b>	12,8...	15,6...	25,7

La albura es dominante, con un 89,8 % en promedio, siendo el porcentaje restante correspondiente a la corteza. Así, el CV muestra que la variabilidad de la albura es mínima con 2,9 %, sin embargo, la variabilidad aumenta en la corteza a un 25,7 %, pero se mantiene dentro de los estándares aceptables de variación.

Los resultados obtenidos son un tanto diferentes a los obtenidos por Barboutis y Philippou (2007) quienes determinaron valores de 7,2% de corteza y, por ende, 92,8% de madera. Además, se quiso comparar con otra variedad de *Quercus* (*Quercus suber*) donde según Caritat *et al.* (1992) el porcentaje de corteza en estas varía entre un 17 a 20% siendo el restante madera con un 80 a 83%, por lo que los valores determinados en este estudio para encino resultan ser más intermedios si se comparan con otros estudios.



**Figura 47.** Porcentaje de albura y corteza en fuste de *Quercus ilex*.

Los resultados indican que es posible obtener propiedades adecuadas en tableros con una proporción de corteza igual o inferior a 30% (Poblete y Sánchez 1991). Siendo así, la encina se encuentra claramente dentro del parámetro indicado con respecto al porcentaje de corteza que posee que es de un 10,2%.

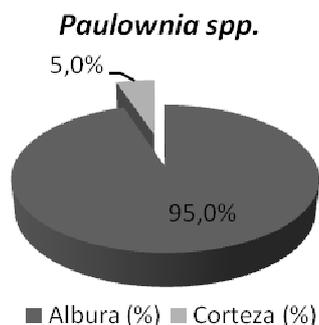
#### 4.1.2 Cultivo energético leñoso

En la tabla 13 se muestran estadísticas descriptivas en base al diámetro promedio general de todos los fustes muestreados de 12 meses de edad. Se presenta la caracterización morfológica (albura y corteza en porcentaje) y su estadística descriptiva para fuste.

**Tabla 13.** Caracterización morfológica del fuste de *Paulownia spp.*

Parámetro	Min	- $\sigma d$	Prom.	+ $\sigma d$	Max	CV (%)
Albura	93,7...	94,3...	<b>95,0</b>	95,7...	95,7...	0,7
Corteza	4,3...	4,3...	<b>5,0</b>	5,7...	6,3...	14,0

La albura es dominante, con un 95,0 % en promedio, siendo el porcentaje restante correspondiente a la corteza. Así, el CV muestra que la variabilidad de la albura es mínima con 0,7 %, sin embargo, la variabilidad aumenta en la corteza con 14,0 %, pero se mantiene dentro de los estándares aceptables de variación. Este resultado podría interpretarse como un bueno para la industria del tablero, ya que al haber menos corteza las propiedades físico-mecánicas de la madera se ven menos afectadas (Poblete y Sánchez 1991)



**Figura 48.** Porcentaje de albura y corteza en fuste de *Paulownia spp.*

Geimer y Crist (1980) encontraron propiedades mecánicas aceptables al incluir hasta un 29% de corteza. Por lo que paulonia se encuentra claramente dentro de los parámetros mencionados con respecto al porcentaje de corteza que posee del 5%.

#### **4.1.3 Especies agrícolas leñosas**

##### *a) Fuste*

No se pudo determinar las características morfológicas (porcentaje de albura, duramen y corteza) del fuste en frutales, ya que no fue posible realizar operaciones de tala de árboles por especie que resultaran suficientes para el estudio.

##### *b) Ramas*

La caracterización en ramas corresponde sólo a árboles frutales.

##### 1. Ramas de diámetro < a 7,0 cm

En la tabla 14, 15 y 16 se presenta la caracterización morfológica (albura, duramen y corteza en porcentaje) y su estadística descriptiva en ramas con diámetro < a 7,0 cm para todas las especies frutales.

**Tabla 14.** Caracterización morfológica en ramas con diámetro < a 7,0 cm de *Citrus sinensis*

Parámetro	Min	- $\sigma d$	Prom.	+ $\sigma d$	Max	CV (%)
Albura	95,1...	95,8...	<b>96,6</b>	97,5...	97,5...	0,9
Corteza	2,5...	2,5...	<b>3,4</b>	4,2...	4,9...	34,5

**Tabla 15.** Caracterización morfológica en ramas con diámetro < a 7,0 cm de *Olea europaea*

Parámetro	Min	- $\sigma d$	Prom.	+ $\sigma d$	Max	CV (%)
Albura	83,3...	85,2...	<b>87,2</b>	93,9...	89,2...	2,3
Corteza	7,1...	10,8...	<b>12,8</b>	38,8...	14,8...	15,9

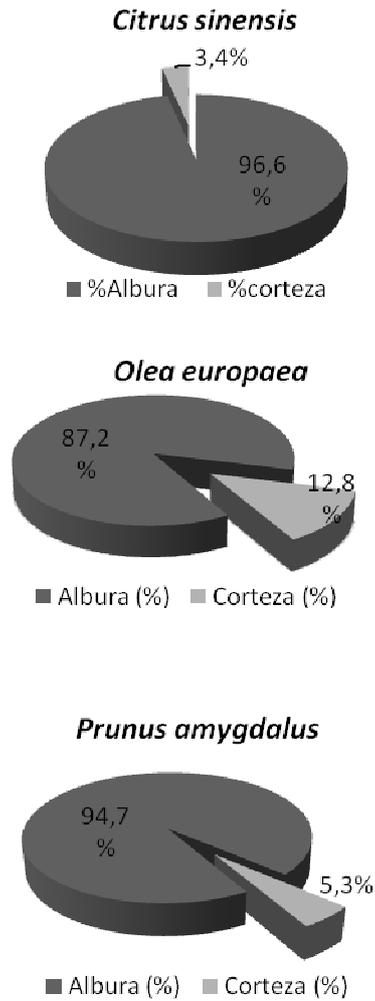
**Tabla 16.** Caracterización morfológica en ramas con diámetro < a 7,0 cm de *Prunus amygdalus*

Parámetro	Min	$\mu - \sigma$	Prom.	$\mu + \sigma$	Max	CV (%)
Albura	87,9...	92,3...	<b>94,7</b>	97,1...	99,1...	2,6
Corteza	0,9...	2,9...	<b>5,3</b>	7,7...	12,1...	45,6

Según las tablas 14, 15 y 16 la albura es dominante en frutales, desde 87,2 % en olivos, 94,7 % en almendro hasta un 96,6% en naranjos, siendo esta última donde tiene mayor presencia, lógicamente en desmedro de la corteza: a mayor porcentaje de albura menor porcentaje de corteza (3,4% en naranjos, 12,8 % en olivos y 5,3 % en almendros). Así la variabilidad representada en el CV muestra que la variabilidad de la albura es mínima con 0,9 a 2,6 %, sin embargo, en la corteza la variabilidad aumenta en naranjos y almendros con 34,5% y 45,6% respectivamente, manteniéndose un porcentaje de variabilidad muy aceptable para olivos (15,9 %). Esto último, se podría deber a que, según Poblete y Sánchez (1991), la cantidad de corteza en la madera varía apreciablemente con el tamaño

de los trozos, siendo la toma de muestras en olivos en ramas de diámetros más uniformes con respecto a naranjos y almendros.

En resumen, las tablas anteriores fueron representadas a continuación en la figura 49, donde se grafica el porcentaje de madera y corteza presente en ramas de las especies frutales estudiadas.



**Figura 49.** Porcentaje de albura y corteza en ramas con diámetro < a 7,0 cm por especie.

Resulta necesario determinar el porcentaje de participación de madera (en este caso sólo albura) y corteza, ya que mayor o menor concentración de ambos permitiría la obtención o no de ciertos productos y variaciones en ellos. Una de las alteraciones más notables al incluir corteza se produce a nivel del color del producto obtenido, debido a la anatomía y composición química de la corteza (Monteoliva *et al.* 2009).

## 2. Ramas de diámetro $\geq$ a 7,0 cm

En la tabla 17 y 18 se presentan la caracterización morfológica (albura, duramen y corteza en porcentaje) en ramas con diámetro  $\geq$  a 7,0 cm para naranjo y olivo, ya que para almendro no se muestrearon ramas con diámetro  $\geq$  a 7,0 cm.

**Tabla 17.** Caracterización morfológica en ramas con diámetro  $\geq$  a 7,0 cm de *Citrus sinensis*

Parámetro	Min	- $\sigma d$	Prom.	+ $\sigma d$	Max	CV (%)
Albura	80,0...	82,8...	<b>87,2</b>	91,6...	94,7...	5,1
Corteza	5,3...	8,4...	<b>12,8</b>	17,2...	20,0...	34,5

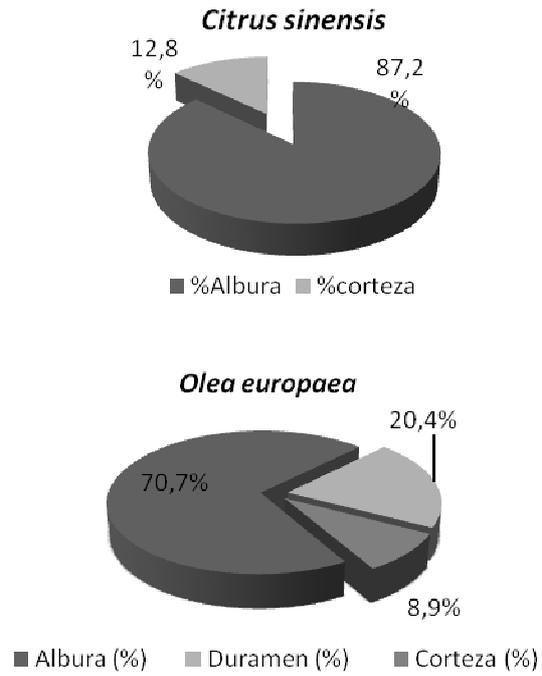
**Tabla 18.** Caracterización morfológica en ramas con diámetro  $\geq$  a 7,0 cm de *Olea europaea*

Parámetro	Min	- $\sigma d$	Prom.	+ $\sigma d$	Max	CV (%)
Albura	37,9...	55,3...	<b>70,7</b>	86,2...	94,6...	21,8
Duramen	0,0...	5,5...	<b>20,4</b>	35,2...	53,6...	72,8
Corteza	4,8...	6,7...	<b>8,9</b>	11,1...	14,7...	25,2

Según las tablas 17 y 18, vemos que para ramas  $\geq$  7,0 cm en olivos, la madera corresponde al 91,1 %, con un porcentaje importante de participación de duramen del 20,4 % (el resto es albura) a diferencia de naranjos que no lo presentan, lo que se debe a que olivos son árboles de mayor edad, encontrándose individuos de más de 50 años y en naranjos no superan los 15 a 20 años, por lo

que se estima que el duramen en estos últimos se forma posterior a esta edad. La muy alta variabilidad de la presencia de duramen (72,8% en olivos) se debe a que las parcelas seleccionadas eran de distintas edades, por lo que en el muestreo existen ramas jóvenes que no han alcanzado a desarrollar duramen u otras ramas de árboles adultos que si lo han desarrollado de gran manera.

Con respecto a la corteza, ésta presentó una mayor participación en naranjos que en olivos (12,8 % y 8,9 % respectivamente), también su variabilidad fue importante (34,5%) con respecto a olivos (25,2%), siendo este último considerado un valor que está dentro de lo normal. Lo que se puede deber a cada parcela de naranjos tenía una edad distintas, por lo tanto tamaño de muestras distintos, a diferencia de olivos que se dividió en parcelas jóvenes y adultas de igual edad por categoría, por lo que su variabilidad no fue mucha.



**Figura 50.** Caracterización morfológica en ramas de diámetro  $\geq$  a 7,0 cm por especie.

## 4.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICA

La caracterización física implica la estadística descriptiva, expresada en porcentaje, de ramas con diámetro  $< 7,0$  cm y  $\geq 7,0$  cm. Las principales variables que incluye la caracterización física son:

- a) Humedad: determinada por medio del secado de la materia prima hasta peso constante, tanto en estufa como al aire en todas las especies. En el caso de frutales, sólo para ramas  $< 7,0$  cm y para el cultivo energético y la especie forestal en fuste.
- b) Densidad: dividida esta última a su vez en básica, anhidra y normal.

### 4.2.1 Especie forestal mediterránea

#### a) Humedad

**Tabla 19.** Contenido de humedad, en porcentaje, en fuste de *Quercus ilex*

Min	- $\sigma d$	Prom.	+ $\sigma d$	Max	CV (%)
36,3...	37,5...	<b>39,0</b>	40,5...	42,1...	3,9

Si bien el contenido de humedad se encuentra dentro del rango esperado (39,0 %), con una mínima variación (CV= 3,9%), para Passialis (1985) este es del 62%. Pudiendo deberse esta diferencia a un sin número de variables a las que se les puede atribuir dicha variación en este parámetro, como lo son las diferentes épocas del año en que se tomaron la muestra, condiciones de traslado de la muestra a laboratorio, condiciones de sitio, etc.

## b) Densidad

**Tabla 20.** Densidad básica ( $\text{g/cm}^3$ ) en fuste de *Quercus ilex*

Min	- $\sigma$	Prom.	+ $\sigma$	Max	CV (%)
0,687...	0,709...	<b>0,732</b>	0,756...	0,772...	3,2

La tabla 20 muestra que la densidad básica en los individuos muestreados de encina es de  $0,732 \text{ g/cm}^3$ , siendo las variaciones entre individuos prácticamente nulas con un CV de 3,2%. Sin embargo, para CPF (2004) y CREAM-DMAH (2011), la densidad básica de esta especie es de  $0,870 \text{ g/cm}^3$  valor que tiende a ser más elevado. Estas diferencias entre densidades de una misma especie, según Gutiérrez-Vázquez *et al.* (2010) y Zobel y Talbert (1988), se pueden deber principalmente al efecto ambiental, es decir a la influencia de las diferentes condiciones de sitio donde pudiese establecerse esta especie, y en menor grado al control genético. Así, diferentes autores (Oliver-Villanueva y Becker 1993, Peters 1996, Seeling 1997) demuestran que en diferentes especies frondosas de vasos agrupados, como es el caso de la encina, el régimen de crecimiento diametral del fuste influye de forma directa sobre la densidad de la madera: a mayor crecimiento del anillo mayor densidad y viceversa.

**Tabla 21.** Densidad normal y anhidra ( $\text{g/cm}^3$ ) en fuste de *Quercus ilex*

Densidad	Min	- $\sigma$	Prom.	+ $\sigma$	Max	CV (%)
Normal	0,837...	0,850...	<b>0,895</b>	0,939...	1,027...	5,0
Anhidra	0,951...	0,966...	<b>1,017</b>	1,067...	1,167...	5,0

Los ensayos de densidad anhidra y normal junto a los resultados arrojados, son correspondientes con los datos por la densidad básica, por lo que la relación entre unos y otros valores dentro de una misma especie se mantiene.

La densidad normal determinada en este estudio se ajusta perfectamente a la obtenidas por CPF (2004) donde la densidad normal para encina alcanza 0,900 g/cm<sup>3</sup>. Sin embargo, para Voulgaridis (1993) un valor similar a este último corresponde a la densidad anhidra (0,930 g/cm<sup>3</sup>), cifra que se encuentra por debajo del 1,017 g/cm<sup>3</sup> obtenida en este estudio. Estas diferencias son atribuibles a las diferentes condiciones de sitio existentes y los regímenes de crecimiento del fuste derivados, como se explicó anteriormente.

#### 4.2.2 Cultivo energético leñoso

##### a) Humedad

Se determinó el CH en árboles de aproximadamente 12 meses de edad.

**Tabla 22.** Contenido de humedad, en porcentaje, en fuste de *Paulownia spp.*

Min	- $\sigma d$	Prom.	+ $\sigma d$	Max	CV (%)
54,7...	56,1...	<b>58,6</b>	61,1...	62,5...	4,3

En paulonia se obtuvo un CH del 58,6 % en promedio, que es la cifra más alta de todas las especies estudiadas, siendo un valor que prácticamente no varía en la plantación muestreada, prueba de esto es el CV que es del 4,3%. Esta cifra coincide con el estudio de Ciria (2011) quien señala que la humedad de esta especie está entre 50 a 75%.

## b) Densidad

**Tabla 23.** Densidad básica ( $\text{g/cm}^3$ ) en fuste de *Paulownia spp.*

Min	- $\sigma d$	Prom.	+ $\sigma d$	Max	CV (%)
0,270...	0,267...	<b>0,297</b>	0,327...	0,390...	10,1

La tabla 23 muestra una densidad básica obtenida de  $0,297 \text{ g/cm}^3$ , cifra muy similar a las obtenidas por Hakan-Akyildiz y Sahin-Kol (2009) quienes determinaron una densidad básica para paulonia de  $0,272 \text{ g/cm}^3$  y por Sobhani et al. (2011) que obtuvo  $0,260 \text{ g/cm}^3$  para esta especie.

Según Hakan-Akyildiz y Sahin-Kol (2009) la ligereza demostrada por la madera de paulonia es una ventaja importante, ya que de acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla 23, en España, ésta es la especie que posee la menor densidad con respecto a otros cultivos productores de madera, siendo *Populus spp.* quien le sigue en ligereza con  $0,330$  a  $0,370 \text{ g/cm}^3$  dependiendo de la localidad (Jovanoski 2011; Díaz et al. 2002).

**Tabla 24.** Densidad normal y anhidra ( $\text{kg/m}^3$ ) en fuste de *Paulownia spp.*

Densidad	Min	- $\sigma d$	Prom.	+ $\sigma d$	Max	CV (%)
Normal	0,281...	0,288...	<b>0,306</b>	0,323...	0,348...	5,6
Anhidra	0,319...	0,328...	<b>0,347</b>	0,367...	0,400...	5,6

En este estudio se determinó la densidad anhidra que alcanzó  $0,347 \text{ g/cm}^3$  y la normal que llegó en promedio a  $0,309 \text{ g/cm}^3$ . Siendo el primero, un valor que tiende a ser más alto que el obtenido por Hakan-Akyildiz y Sahin-Kol (2009) que fue de  $0,317 \text{ g/cm}^3$  y la densidad normal (12%) es de  $0,294 \text{ g/cm}^3$ , y que al igual

que la densidad anhidra tiende a ser menor que el obtenido en este estudio (0,306 g/cm<sup>3</sup>).

#### 4.2.3 Especies agrícolas leñosas

##### a) Humedad

Se determinó el contenido de humedad en árboles adultos para naranjos y olivos con ramas de diámetros <7,0 cm y ≥ 7,0 cm, y en árboles adultos para almendros donde sólo se muestrearon ramas de diámetros < 7,0 cm, en árboles jóvenes exclusivamente en olivos (con diámetros < 7,0 cm),

**Tabla 25.** Contenido de humedad, en porcentaje, en ramas de *Citrus sinensis*

Tipo de Árbol	Clasif.	Min	- $\sigma d$	Prom.	+ $\sigma d$	Max	CV (%)
Adulto	< 7,0 cm	34,8...	39,9...	44,1	48,4...	55,8...	9,6
	≥ 7,0 cm	29,2...	30,8...	34,0	39,2...	34,5...	9,6
<b>Promedio Total</b>		<b>29,2</b>	<b>33,4...</b>	<b>39,7</b>	<b>46,0...</b>	<b>55,8...</b>	<b>16,0</b>

**Tabla 26.** Contenido de humedad, en porcentaje, en ramas de *Olea europaea*

Tipo de Árbol	Clasif.	Min	- $\sigma d$	Prom.	+ $\sigma d$	Max	CV (%)
Adulto	< 7,0 cm	30,8...	33,6...	38,3	43,0...	47,1...	12,3
	≥ 7,0 cm	30,1...	30,3...	32,1	33,9...	34,5...	5,6
Joven	< 7,0 cm	36,3...	37,6...	40,3	42,9...	46,4...	6,6
<b>Promedio Total</b>		<b>30,1...</b>	<b>31,6...</b>	<b>36,9</b>	<b>42,2...</b>	<b>47,1...</b>	<b>14,3</b>

**Tabla 27.** Contenido de humedad, en porcentaje, en ramas de *Prunus amygdalus*

Tipo de Árbol	Clasif.	Min	- $\sigma$	Prom.	+ $\sigma$	Max	CV (%)
Adulto	< 7,0 cm	30,3...	31,7...	34,6	37,5...	39,6...	8,4
<b>Promedio Total</b>		<b>30,3...</b>	<b>31,7...</b>	<b>34,6</b>	<b>37,5...</b>	<b>39,6...</b>	<b>8,4</b>

En las tablas 25, 26 y 27 se puede observar que, en general, los CH de las muestras recién cortadas de las distintas especies analizadas son relativamente uniformes.

En el total de la muestra, sin discriminar en adultos y jóvenes, o en diámetros, se obtuvo un CH en naranjos de 39,7 %, en olivos de 36,9 % y en almendros de 34,6 %, que son valores ligeramente más altos que los obtenidos por Fernández (2009), quién señala que el CH de naranjos es de 36,0 %, en olivos es de 32,3%, pero en almendros la diferencia del CH es sustancial con solo un 23,0% en sus resultados. Lo que se podría explicar con que, sobre todo en esta última especie, las muestras fueron tomadas en épocas del año distintas, y en zonas geográficas diferentes, por lo que el CH del árbol varía considerablemente (Albin y Jaramillo 1980). Además, según Heinrich *et al.* (2007), el CH de la madera de frondosas duras recién cortada varía entre un 40 a 50%; luego de estar expuesta a la intemperie, en época no lluviosa, la humedad promedio baja cerca de un 30 %.

No obstante, tanto en naranjos como en olivos, se ejecutó el t-test tras comprobar la distribución normal de las muestras, con el fin de comparar las medias del CH de las dos muestras (< 7,0 cm y  $\geq$  7,0cm), dando por resultado, en ambas especies, que existe diferencia estadísticamente significativa para un nivel de confianza del 95,0 %. Por lo que, las muestras fueron analizadas por separado.

En árboles adultos, tanto en naranjos como en olivos se aprecia que los mayores contenidos de humedad son de ramas con diámetro  $< 7,0$  cm (44,1% y 38,3% respectivamente) en las ramas con diámetro  $\geq 7,0$  cm el CH es de 34,0% en naranjos y 32,1% en olivos, en almendros se obtuvo un CH de 34,6%. Los árboles jóvenes (olivos) poseen el mayor CH de las ramas muestreadas dentro de esta especie con un 40,3%. Sin embargo, tras el análisis de ajuste de las muestras a la distribución normal, se hizo el t-test para comparar las medias de las dos muestras en olivos (jóvenes y adultos), resultando que no existe diferencia estadísticamente significativa entre sus medias, para un nivel de confianza del 95,0%. Por lo que, el levemente mayor CH de los árboles jóvenes sobre los adultos sólo muestra una tendencia no significativa.

Los contenidos de humedad obtenidos están muy por encima del valor admitido del 10% (EN 14961-2 para biocombustibles sólidos) y de  $20\% \pm 5\%$  (norma EPF para tableros). Sin embargo, estos CH corresponden a trozos de ramas, por lo que para su transformación, ya sea en pellets o en tableros deben pasar primero por un proceso de astillado y posteriormente por otro proceso de molienda, para la reducción de tamaño de las astillas, por medio de un molino. En el primero se reduce la humedad cerca de un 10% y en el segundo cerca de un 5% (comunicación oral con empresa AKATA Group 2011), acercándose a los valores exigidos en la elaboración de los productos mencionados anteriormente.

El rango ideal del CH de la madera destinada a la fabricación de tableros de partículas es, según Kollmann (1966) y FAO (1968) entre 30 y 50%.

Si el CH sigue sin ser el óptimo, principalmente en el caso de los pellets, la materia prima obtenida debe someterse a un proceso de secado previo.

## b) Densidad

En la tabla 29 se observa que la densidad básica de las ramas de olivos adultos con diámetro  $\geq 7,0$  cm es superior a la densidad básica de las ramas de olivos adultos con diámetro  $< 7,0$  cm y a la densidad básica de los olivos jóvenes.

Tabla 28. Densidad básica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) en ramas de *Citrus sinensis*

Tipo de árbol	Clasif.	Min	- $\sigma$	Prom.	+ $\sigma$	Max	CV (%)
Adulto	$< 7,0$ cm	0,521...	0,520...	<b>0,576</b>	0,631...	0,740...	9,6
	$\geq 7,0$ cm	0,572...	0,623...	<b>0,666</b>	0,709...	0,758...	6,4
<b>Promedio Total</b>		0,521...	0,549...	<b>0,616</b>	0,684...	0,758...	10,9

Tabla 29. Densidad básica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) en ramas de *Olea europaea*

Tipo de árbol	Clasif.	Min	- $\sigma$	Prom.	+ $\sigma$	Max	CV (%)
Adulto	$< 7,0$ cm	0,549...	0,593...	<b>0,644</b>	0,695...	0,717...	7,9
	$\geq 7,0$ cm	0,660...	0,667...	<b>0,704</b>	0,741...	0,812...	5,3
Joven	$< 7,0$ cm	0,599...	0,605...	<b>0,618</b>	0,632...	0,639...	2,2
<b>Promedio Total</b>		0,549...	0,611...	<b>0,654</b>	0,698...	0,717...	6,7

Tabla 30. Densidad básica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) en ramas de *Prunus amygdalus*

Tipo de árbol	Clasif.	Min	- $\sigma$	Prom.	+ $\sigma$	Max	CV (%)
Adulto	$< 7,0$ cm	0,572...	0,620...	<b>0,668</b>	0,715...	0,766...	7,1
<b>Promedio Total</b>		0,572...	0,620...	<b>0,668</b>	0,715...	0,766...	7,1

En las tablas 28, 29 y 30 se puede observar que, en promedio, las densidades básicas de las muestras recién cortadas de las especies analizadas son bastante uniformes. En el total de la muestra, sin discriminar en adultos y jóvenes, o en diámetros, se obtuvo una densidad básica en naranjos de  $0,616 \text{ g/cm}^3$ , en olivos de  $0,654 \text{ g/cm}^3$  y en almendros de  $0,668 \text{ g/cm}^3$ .

Debido a la existencia de dos tipos de muestras ( $< 7,0 \text{ cm}$  y  $\geq 7,0 \text{ cm}$ ), en árboles adultos de naranjos y olivos, tras comprobar el ajuste de las muestras a la distribución normal, se ejecutó el t-test para comparar sus medias por especie, dando por resultado de que existe diferencia estadísticamente significativa entre ambos tipos de muestras para un nivel de confianza del 95,0 %. Por lo que, se puede concluir que el diámetro de la rama es directamente proporcional a la densidad de estas especies. Esto es, las ramas de menor diámetro poseen una densidad básica significativamente menor que las ramas de mayor diámetro en naranjos y olivos.

En árboles adultos, tanto en naranjos como en olivos se aprecia que las menores densidades básicas son de ramas con diámetro  $< 7,0 \text{ cm}$  ( $0,576$  y  $0,644 \text{ g/cm}^3$  respectivamente). En las ramas con diámetro  $\geq 7,0 \text{ cm}$  la densidad básica es de  $0,666 \text{ g/cm}^3$  en naranjos y  $0,704 \text{ g/cm}^3$  en olivos. En almendros se mantuvo la densidad básica de  $0,668 \text{ g/cm}^3$ . Los árboles jóvenes (olivos) poseen la menor densidad básica de las ramas muestreadas dentro de esta especie con  $0,618 \text{ g/cm}^3$ . Sin embargo, se ejecutó el t-test para comparar las medias de las muestras entre árboles jóvenes y adultos en olivos, resultando que no existe diferencia estadísticamente significativa entre sus medias, para un nivel de confianza del 95,0 %. Por lo que, la levemente menor densidad básica de los árboles jóvenes sobre los adultos sólo representa una tendencia no significativa.

Si bien se tratan de las mismas especies evaluadas y en condiciones climáticas similares para Fernández (2009b), la densidad de la madera de naranjos y almendros obtenida es mucho más elevada, siendo esta de 1,002 g/cm<sup>3</sup> y 0,981 g/cm<sup>3</sup>, aunque en este trabajo no se especifica el tipo de densidad estudiada. En contraste Passialis y Grigoriou (1999), si bien no evalúan las mismas especies, obtienen que para otras especies duras frutales como melocotón, manzano, cerezo, peral y damasco la densidad básica oscila entre 0,65 y 0,75 g/cm<sup>3</sup>. Estos valores están más en consonancia con los obtenidos en esta tesis.

**Tabla 31.** Densidad normal y anhidra (g/cm<sup>3</sup>) en ramas de *Citrus sinensis*

Densidad	Clasif.	Min	- $\sigma$	Prom.	+ $\sigma$	Max	CV (%)
Normal	< 7,0 cm	0,841...	0,868...	<b>0,881</b>	0,895...	0,892...	1,6
	≥ 7,0 cm	0,672...	0,685...	<b>0,707</b>	0,730...	0,760...	3,2
Anhidra	< 7,0 cm	0,942...	0,972...	<b>0,987</b>	1,002...	0,999...	1,6
	≥ 7,0 cm	0,753...	0,767...	<b>0,792</b>	0,817...	0,852...	3,2

**Tabla 32.** Densidad normal y anhidra (g/cm<sup>3</sup>) en ramas de *Olea europaea*

Densidad	Árbol	Clasif.	Min	- $\sigma$	Prom.	+ $\sigma$	Max	CV (%)
Normal	Adulto	< 7,0 cm	0,836...	0,856...	<b>0,887</b>	0,918...	0,949...	3,5
		≥ 7,0 cm	0,801...	0,852...	<b>0,884</b>	0,915...	0,940...	3,5
	Joven	< 7,0 cm	0,844...	0,869...	<b>0,891</b>	0,912...	0,917...	2,7
Anhidra	Adulto	< 7,0 cm	0,936...	0,959...	<b>0,993</b>	1,028...	1,063...	3,5
		≥ 7,0 cm	0,897...	0,955...	<b>0,990</b>	1,024...	1,053...	3,5
	Joven	< 7,0 cm	0,945...	0,973...	<b>0,997</b>	1,021...	1,027...	2,7

**Tabla 33.** Densidad normal y anhidra ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) en ramas de *Prunus amygdalus*

Densidad	Árbol	Clasif.	Min	- $\sigma$ d	Prom.	+ $\sigma$ d	Max	CV (%)
Normal	Adulto	< 7,0 cm	0,673...	0,695...	<b>0,734</b>	0,773...	0,837...	5,3
Anhidra	Adulto	< 7,0 cm	0,754...	0,779...	<b>0,822</b>	0,865...	0,937...	5,3

Se puede apreciar en las tablas 31, 32 y 33 que la densidad normal sigue la lógica de ser sistemáticamente menor que la densidad anhidra, al igual que la densidad básica es sistemáticamente menor que estas dos últimas (en tablas 28, 29 y 30).

Los ensayos de densidad anhidra y densidad normal junto a los resultados arrojados, son correspondientes con los dados por la densidad básica, por lo que la relación de variabilidad (CV) entre unos y otros valores dentro de una misma especie se mantiene en niveles muy bajos.

### 4.3 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

La discusión de los resultados obtenidos en la composición química elemental de la madera de las tres clases de árboles se basa en la comparación con la literatura encontrada al respecto para las mismas especies. En cuanto a una composición química secundaria de la madera de las especies estudiadas no se conocen estudios completos al respecto. Sin embargo, Krook *et al.* (2004) han determinado valores para el fuste de las especies forestales de coníferas más importantes en Europa que constituyen la base de aprovisionamiento de materia prima para la industria forestal, bien para tableros o para bioenergía (*Pinus spp.* y *Picea spp.*). Por lo que, en este ítem se establecerá una comparación de la concentración de los metales pesados para la especie forestal mediterránea, el cultivo energético leñoso y las especies agrícolas leñosos con respecto a los valores de referencia de especies coníferas forestales, ya que resulta relevante conocer las posibles diferencias de los elementos químicos de estas especies que no son tradicionalmente utilizadas en el sector industrial de base forestal con respecto a las especies que sí forman parte activa en este sector. Además, este estudio trata de dar alternativas que complementen a las especies forestales utilizadas tradicionalmente, por lo que es conveniente establecer esta comparación.

## 4.3.1 Especie forestal mediterránea

## a) Análisis elemental

Tabla 34. Concentración de los elementos principales en *Quercus ilex* (%)

Elemento	EN 14918	Fuste	Ramas s/hojas	Ramas c/hojas
	(%)	<i>Q. ilex</i>	<i>Q. ilex</i>	<i>Q. ilex</i>
C	-	39,0	39,0	39,0
H	6,2	-	-	-
O	42,0	-	-	-
N	-	0,2	0,4	0,7
S	%	0,02	0,02	0,05

H y O corresponden a valores promedio obtenidos de la literatura (UNE-EN 14918) y circunscritos a árboles enteros y que sólo serán utilizados en el posterior cálculo del PCI, ya que no son elementos requeridos en las especificaciones técnicas para la producción de pellets o tableros.

Según Ponce y Cárdenas (2004), el porcentaje medio de C está en el rango de 48% a 52% y el de N de 0,07% a 0,38%, siendo la primera muy distinta a la obtenida en este estudio que es para C de 39%. Sin embargo en el N el rango propuesto se acerca bastante el valor obtenido en este estudio. Alves *et al.* (2009) obtiene en N, para la madera de encina, 0,18% que es un valor muy cercano al encontrado en el fuste de esta especie en este trabajo. Sin embargo, Viejo-Montesinos *et al.* (1996) indican que el valor medio es de 0,63%. Por lo que en este elemento se encuentran muchas variaciones. A pesar de esto, Kasamaki (2007) determina que

el contenido de S para paulonia es de 0,02% valor que coincide plenamente con lo obtenido en este estudio.

b) *Análisis secundario*

**Tabla 35.** Estadísticas descriptivas, en mg/Kg, de los componentes secundarios que podemos encontrar en la madera de *Quercus ilex*.

Elemento	Fuste	Ramas s/hojas	Ramas c/hojas	Fuste Pino y
	<i>Q. ilex</i>	<i>Q. ilex</i>	<i>Q. ilex</i>	<i>Picea</i> *
As	< 0,03	< 0,03	0,04	0,03
Cr	0,5	1,0	1,2	0,06
Pb	< 0,6	< 0,6	< 0,6	0,07
Hg	2,7	5,2	14,7	0,06
Ni	0,3	0,5	0,7	0,01
Zn	3,8	6,9	-	9,6

\* Krook *et al.* (2004)

Según la tabla 35, casi todos los compuestos químicos analizados tienen presencia en la madera de encina, tanto en fuste como en ramas, a excepción de As y Pb, ya que es inexistente o muy baja su presencia en esta madera por lo que fueron imposibles de detectar.

Krook *et al.* (2004) han determinado valores del fuste para *Pinus spp.* y *Picea spp.* como las especies forestales de referencia para uso bioenergético en Europa. Según la tabla 35 estas presenta valores más bajos con respecto al fuste de encina en todos sus elementos excepto en As y Pb por lo explicado en el párrafo anterior.

### 4.3.2 Cultivo energético leñoso

#### a) Análisis elemental

**Tabla 36.** Concentración de los elementos principales en árboles enteros de *Paulownia spp.*

<b>Elemento</b>	<b>UNE-EN 14918 (%)</b>	<b>Fuste <i>Paulownia spp.</i></b>	<b>Ramas <i>Paulownia spp.</i></b>
C	-	58,6	58,6
H	6,2	-	-
O	42,0	-	-
N	-	0,4	0,5
S	%	0,03	0,03

Según la tabla 36 el porcentaje de C en paulonia es de 58,6%, en N es de 0,4% y en S es de 0,03%, siendo prácticamente iguales en las probetas extraídas del fuste y de las ramas. Estos valores son similares a los obtenidos por Kamisaki (2007) quienes obtienen para C un 49,5%, para N un 0,24% y para S un 0,02%.

b) *Análisis secundario*

**Tabla 37.** Estadísticas descriptivas, en mg/Kg, de los componentes secundarios que podemos encontrar en la madera de *Paulownia spp.*

Elemento	Fuste	Ramas	Fuste
	<i>Paulownia spp.</i>	<i>Paulownia spp.</i>	<i>Pino/Picea*</i>
As	0,036	0,033	0,03
Cr	0,8	1,3	0,06
Pb	< 0,6	< 0,6	0,07
Hg	1,5	6,0	0,06
Ni	1,1	0,8	0,01
Zn	19,7	15,8	9,6

\* Krook *et al.* (2004)

Según la tabla 37, casi todos los compuestos químicos analizados tienen presencia en paulonia, a excepción de Pb que es inexistente o tiene muy baja presencia en la madera de esta especie, por lo que fue imposible de detectar.

En general, el fuste de paulonia presenta valores más altos con respecto a los valores obtenidos por Krook *et al.* (2004) para fuste de *Pinus spp.* y *Picea spp.* en todos sus elementos excepto en As que son valores prácticamente iguales y en Pb que no está presente en paulonia o su concentración fue menor a la señalada en la tabla por lo que no fue detectado.

### 4.3.3 Especies agrícolas leñosas

El análisis elemental y el secundario han sido circunscritos solamente a material obtenido en podas.

#### a) Análisis elemental

**Tabla 38.** Concentración de los elementos principales en restos de frutales

Elemento	EN 14918 (%)	<i>C. sinensis</i>	<i>O. europaea</i>	<i>P. amygdalus</i>
C	-	35,0	36,8	34,6
H	6,1	-	-	-
O	41	-	-	-
N	-	0,6	0,5	0,3
S	%	0,04	0,03	0,02

El contenido de C es de 35,0% en naranjos, 36,8% en olivos y 34,6% en almendros. El contenido en N es de 0,6% en naranjos, 0,5% en olivos y 0,3% en almendros. Y por último, el contenido en S es de 0,04% en naranjos, 0,03% en olivos y 0,02% en almendros. Al comparar los resultados obtenidos en este estudio con la literatura existente podemos ver que resultan dispares. Así, Sánchez *et al.* (2002), para algunos frutales, obtiene para C un contenido medio de 45,5%. En cambio para N obtiene valores bastante similares (0,3%), al igual que en la madera de olivos. Por otra parte, el S no llega a ser detectado por este autor en la madera de ninguna de estas especies. Por ende, y en líneas generales, la composición elemental de las especies frutales no difiere demasiado entre sí.

b) *Análisis secundario***Tabla 39.** Estadísticas descriptivas, en mg/Kg, de los componentes secundarios en las maderas de las especies de frutales.

Elemento	<i>C. sinensis</i>	<i>O. europaea</i>	<i>P. amygdalus</i>	Fuste Pino/ <i>Picea</i> *
As	0,094	0,031	< 0,03	0,03
Cr	1,3	0,5	1,2	0,06
Pb	< 0,6	< 0,6	< 0,6	0,07
Hg	3,3	2,8	1,9	0,06
Ni	0,7	0,3	0,4	0,01
Zn	6,0	9,8	14,7	9,6

Según la tabla 39, casi todos los compuestos químicos analizados tienen presencia en todas las especies frutales estudiadas. Sin embargo, la presencia de Pb en la madera de estas especies es inexistente o es tan baja que fue imposible de detectar. Lo mismo ocurre con el As en el caso de la madera de almendro.

En general, el fuste de estos frutales presenta valores más altos con respecto a los valores obtenidos por Krook *et al.* (2004) para fuste de *Pinus spp.* y *Picea spp.* en todos sus elementos con algunas excepciones como en As para almendros y en Pb para todos los frutales que no están presentes o su concentración fue menor a la señalada en la tabla, por lo que no fue detectado. También la excepción se encuentra en el Zn en naranjos donde este estudio obtuvo un valor menor (6,0 mg/Kg) al que presenta el autor de referencia (9,6 mg/Kg).

#### 4.4 CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DE LA BIOMASA

La caracterización energética de la biomasa consiste en la determinación del poder calorífico (superior e inferior) expresado en MJ/Kg y del porcentaje de cenizas en ramas de diámetros < 7,0 cm y en ramas de diámetros iguales o mayores a 7,0 cm.

##### 4.4.1 Especie forestal mediterránea

###### a) Poder calorífico

La caracterización energética se determinó en fuste, ramas sin hojas, ramas con hojas y árbol completo de encina calculándose el PCI de los diferentes materiales como materia seca al 0% de humedad.

**Tabla 40.** Poder calorífico en *Quercus ilex*.

Material	PCS (MJ/Kg)	PCI (MJ/Kg)
Fuste	18,35	17,00
Ramas c/hojas	17,57	16,22
Árbol completo	17,76	16,41

En la tabla 40 se aprecia que el fuste posee el mayor PCI con 17,00 MJ/Kg, seguido por árbol completo con 16,22 MJ/Kg y finalmente las ramas con hojas con 16,20 MJ/Kg.

Tras la comprobación del ajuste a la distribución normal de las muestras, se realizó el t-test para comparar las diferencias entre las medias de las muestras entre fuste y ramas con hojas de esta especie, resultando que sí existe diferencia estadísticamente significativa entre sus medias, para un nivel de confianza del 95,0 %. Sin embargo, al realizar el t-test para comparar las medias de las muestras de las ramas con hojas con respecto al árbol completo, éste da por resultado que no existe diferencia estadísticamente significativa entre sus medias, para un nivel de confianza del 95,0 %.

Lo anterior se resumiría en que el fuste tiene mayor PCI que las otras muestras (ramas con hojas y árbol completo), ya que según Rodríguez-Rivas (2009) un PC mayor se presenta en aquellas especies que presentan mayor lignificación, que son más densas y que tienen mayor contenido de resinas, terpenos y aceites esenciales. Explicándose así el por qué de la tendencia a la disminución del PCI cuando se incorporaron muestras de ramas delgadas y, sobre todo, con hojas.

*b) Porcentaje de cenizas*

En la siguiente tabla se recogen los valores correspondientes a los ensayos de determinación del porcentaje de cenizas para encina.

**Tabla 41.** Porcentaje de cenizas en *Quercus ilex*

Material	Cenizas (%)
Fuste	1,8
Ramas c/hojas	3,2

La tabla 41 muestra el porcentaje de cenizas de dos materiales diferentes. La tendencia indica que el fuste posee un menor porcentaje de cenizas con un 1,8%

con respecto a ramas con hojas que producen prácticamente el doble de cenizas con un 3,2%. Lo que indica que el material más lignificado (fuste) presenta un porcentaje de cenizas más acorde con lo requerido por la norma EN 14775 (menor o igual a 1,5 %).

Estos resultados indican que la incorporación a la materia prima de ramas delgadas (con mayor porcentaje de corteza) y, sobre todo, con follaje con el objetivo de la producción de energía tendería a producir una disminución de su calidad para estos fines, con los perjuicios que las cenizas suponen para el funcionamiento y mantenimiento de las calderas (Obenberger 1997). Este es un factor a tener muy en cuenta, ya que la encina es una especie perenne, por lo que si se quiere obtener una mayor calidad en el producto final con fines energéticos posteriormente al raleo se aconsejaría realizar una actividad de descope o desrame, que sea previa al astillado en monte o a cargar las trozas al camión para su transporte desde el bosque a la planta.

Estos resultados no han podido ser contrastados con otros estudios de la misma especie y variedades de encina, ya que la información al respecto es muy escasa o nula. Sin embargo, en otras variedades del género *Quercus*, referidos principalmente a la madera del fuste, Bárcenas-Pazos *et al.* (2008) indican que, específicamente para *Quercus sebifera* y *Quercus tinkhami*, el porcentaje de cenizas promedio varía del 2,7% al 3,2%. Bodirlau *et al.* (2007) documentan para *Quercus robur* porcentajes de cenizas entre 0,1% y 1,3%. Para Fengel y Wegener (1984), en términos generales, las maderas de clima templado y frío están constituidas por 0,2 a 0,5% de cenizas.

Si bien estos resultados son dispares con respecto a los obtenidos en este estudio, cabe destacar que, al menos, las condiciones de sitio y variedad de especie son

claramente diferentes con respecto a los bosques de encina muestreados. Así, la variación del contenido de cenizas puede deberse a una adaptación fisiológica a condiciones de potencial hídrico de un suelo más o menos restrictivas (Bárcenas-Pazos *et al.* 2008)

#### c) Materia volátil

Se determinó la materia volátil que es expresado en la siguiente tabla.

**Tabla 42.** Porcentaje de material volátil en *Quercus ilex*

Material	Materia volátil (%)
Fuste	46,1
Ramas c/hojas	41,4

La tabla 42 muestra valores de materia volátil en encina que tiende a ser mayor en el fuste (46,1%) con respecto a ramas con hojas (41,4%), lo que es normal, ya que los contenidos de lignina y minerales difieren entre los distintos tejidos del árbol (Gayoso y Guerra 2005). Según esto, es esperable que los diversos componentes del árbol presenten distintas concentraciones (Giffor 2000).

Si bien es cierto que los estudios al respecto para esta especie son muy escasos, Márquez-Montesino *et al.* (2002) obtuvieron como valor medio un 43,4% de materia volátil, lo que corrobora los resultados obtenidos para esta especie.

#### 4.4.2 Cultivo energético leñoso

La caracterización energética se determinó en fuste y ramas sin hojas de paulonia. La paulonia es una especie de hoja caduca y su corta se plantea, en cualquier

caso, para los meses de parón de la actividad vegetativa, es decir, para los meses de invierno en los que carece de hojas.

a) *Poder calorífico*

En la siguiente tabla se recogen los valores correspondientes a los ensayos de determinación del PCS a volumen constante. Con estos valores y considerando la concentración media de H, O, y N, se calculó el PCI del material en materia seca al 0% de humedad.

**Tabla 43.** Poder calorífico en *Paulownia spp.*

Material	PCS (MJ/Kg)	PCI (MJ/Kg)
Fuste	17,41	16,06
Ramas	18,05	16,70

Los valores obtenidos en la tabla 43, corresponden al material separado en fuste y ramas presentando un PCI de 16,06 MJ/Kg para la fracción fuste y el 16,70 MJ/Kg en las ramas sin hojas.

Tras comprobar el ajuste de los resultados de las muestras a la distribución normal, se realizó el t-test para comparar las medias de las muestras entre fustes y ramas de esta especie, resultando que no existe diferencia estadísticamente significativa entre sus medias, para un nivel de confianza del 95,0 %. Por lo cual es posible establecer un valor promedio que incorpore ambos tipos de muestra, siendo éste de 16,38 MJ/Kg. Este valor es aceptable según la normativa vigente (EN 14918).

Los valores determinados son menores que los determinados por otros autores como Muñoz (2011) quién señala que el PCI de paulonia es de 18,00 MJ/kg y Lucas *et al.* (2010) de 19,50 MJ/kg. Esta diferencia, según Ince (1977), se puede deber a que la biomasa presenta un contenido de humedad más alto mientras más fresca sea ésta, ya que con el aumento del contenido de humedad se produce una rápida pérdida de poder calorífico. Sin embargo, el material usado en laboratorio fue ensayado en base totalmente seca o anhidra (al 0% de humedad), por lo que las diferencias de PCI con respecto a otros autores son atribuibles a otras causas como a las expuestas por Rodríguez-Rivas (2009), quien señala que las especies en forma individual presentan diferencias en la finalización de su actividad vegetativa, aparición de volátiles y evolución según la estación del año, es decir, variaciones fenológicas.

*b) Porcentaje de cenizas*

En la siguiente tabla se recogen los valores correspondientes a los ensayos de determinación del porcentaje de cenizas para paulonia.

**Tabla 44.** Porcentaje de cenizas en *Paulownia spp*

Material	Cenizas (%)
Fuste	1,1
Ramas s/hojas	1,3

La tabla 44 muestra valores que tienden a ser prácticamente iguales del porcentaje de cenizas con respecto a los dos tipos de materiales (fuste y ramas sin hojas), por lo que se obtuvo entre el 1,1% para la fracción fuste y el 1,3 % en las ramas sin hojas.

Según Latorre y Ruano (2009) la mayoría de los cultivos energéticos generan un porcentaje de cenizas que oscilan entre un 3% y un 5%. Sin embargo, la norma (EN 14775) señala que el contenido de cenizas no puede superar el 1,5%, dato que *Paulownia spp.*, cumple completamente como se puede apreciar en la tabla 44.

Los resultados obtenidos se sitúan entre un 1,1% para el fuste y un 1,3% para las ramas. Según Kasamaki (2007) el contenido de cenizas para esta especie oscila entre 1,1- 1,5%, para Latorre y Ruano (2009) está en torno al 2,0 %, Muñoz (2011) obtiene un 1,7 % y Yorgun *et al.* (2009) un 1,1%. Por lo que estos autores corroboran los resultados obtenidos en este estudio.

El análisis del porcentaje de cenizas (%) nos permite determinar con suficiente precisión la cantidad de residuos acumulados en las calderas tras la combustión de la biomasa (Latorre y Ruano 2009) y en vista de que la cantidad de residuos generados tras la combustión es muy baja (1,2%) el rendimiento de la caldera no se verá afectado.

#### c) *Materia volátil*

Se determinó la materia volátil que es expresado en la siguiente tabla.

**Tabla 45.** Porcentaje de materia volátil en *Paulownia spp.*

Material	Materia volátil (%)
Fuste	27,5
Ramas s/hojas	29,8

La tabla 45 muestra valores que tienden a ser prácticamente iguales del porcentaje de materia volátil con respecto a los dos tipos de materiales (fuste y

ramas sin hojas), por lo que se obtuvo el promedio de ambas situando el porcentaje de materia volátil de Paulonia entre el 27,5% para la fracción fuste y el 29,8 % en las ramas sin hojas.

Este resultado contrasta fuertemente con el obtenido por Yorgun *et al.* (2009) quien obtiene altos contenidos de volátiles a niveles del 70%. Sin embargo, la literatura encontrada al respecto es escasa, por lo que no se puede ser concluyente al momento de determinar cuál es el porcentaje aproximado que mejor caracteriza a la madera de paulonia en cuanto a volátiles.

#### **4.4.3 Especies agrícolas leñosas**

La caracterización energética se determinó en ramas con diámetro  $< 7,0$  cm y  $\geq 7,0$  cm. Éste es el material resultante de las podas obtenidas en los trabajos culturales y que podrían ser destinadas como materia prima a la industria.

##### *a) Poder calorífico*

En la siguiente tabla se recogen los valores correspondientes a los ensayos de determinación del PCS a volumen constante. Con estos valores y considerando la concentración media de H, O, y N, se calculó el PCI del material en materia seca al 0% de humedad.

**Tabla 46.** Poder calorífico en frutales

<b>Especie</b>	<b>Clasif. (cm)</b>	<b>Material</b>	<b>PCS (MJ/Kg)</b>	<b>PCI (MJ/Kg)</b>
<i>C. sinensis</i>	< 7,0	mezcla	16,02	14,69
	< 7,0	corteza	15,17	13,84
	≥ 7,0	mezcla	16,75	15,42
	≥ 7,0	corteza	14,45	13,12
<i>O. europaea</i>	< 7,0	mezcla	17,36	16,03
	< 7,0	corteza	16,54	15,21
	≥ 7,0	mezcla	17,47	16,14
	≥ 7,0	corteza	17,63	16,30
	Fuste joven	corteza	15,08	13,75
	Fuste adulto	corteza	14,00	12,67
<i>P. amygdalus</i>	< 7,0	mezcla	18,21	16,88
	< 7,0	corteza	18,87	17,54

Cabe destacar la disminución sistemática que experimentan todas las especies referidos a los valores entregados por el PCS con respecto al PCI, lo que es esperable debido a lo que representan estos dos conceptos explicados ya en la metodología (ver capítulo 3.6).

Refiriéndose al PCI de la tabla 46, se puede inferir que todas las muestras del material “mezcla” (madera y corteza) de olivos y almendros poseen un PCI aceptable (según EN 14961-2) con valores que, si bien son menores a los requeridos para la obtención de pellets de calidad (16,5 MJ/Kg) a excepción de la corteza de almendro que es mayor (17,54 MJ/Kg), se acercan mucho al exigido.

Sin embargo, las ramas de los naranjos y la corteza del fuste de los olivos claramente no cumplen la norma estando sus valores muy por debajo del mínimo aceptado, siendo el mayor valor obtenido de 15,42 MJ/Kg y 13,75 MJ/Kg respectivamente. Al momento de realizar una comparación de medias del tipo de material, mezcla y corteza, se obtuvo por resultado que no existe diferencia estadísticamente significativa entre sus medias, para un nivel de confianza del 95,0 %.

Tras comprobar el ajuste de los valores de las muestras a la distribución normal, se realizó el t-test para las ramas de naranjos y olivos, con el fin de comparar las medias de las muestras entre ramas de diámetros < 7,0 y en ramas de diámetros  $\geq$  7,0 cm para cada tipo de material. El resultado de este test paramétrico es que en la mezcla no existe diferencia estadísticamente significativa entre sus medias, para un nivel de confianza del 95,0 %.

Los valores obtenidos en este estudio están dentro del amplio rango otorgado por IDAE (2007 y 2009) que en olivo es de 12,1 hasta 19,5 MJ/kg y en almendros es de 11,6 hasta 18,9 MJ/kg. Así mismo, existen varios autores que han determinado, para estas especies, el PCS del material de mezcla. Por lo general estos valores son superiores en comparación con los obtenidos en este estudio. Así, Fernández (2009) determina para cítricos sin hojas (mandarinos y naranjos) un PCS de 17,4 MJ/Kg. En olivos, Sánchez *et al.* (2002) obtuvieron 17,94 MJ/Kg. En almendros, González (2008) obtuvo 18,20 MJ/Kg.

En las cortezas con respecto al material de mezcla sí resultaron tener diferencia estadísticamente significativa entre sus medias, para un nivel de confianza del 95,0 %. Sin embargo, el pensar realizar una separación de la madera de la corteza, sin olvidar que se tratan de ramas, principalmente menores de 7,0 cm de

diámetro en su base, resulta ser técnicamente complicado, lo que finalmente se podría traducir en un incremento en los costos que al tratarse de un material que no es considerado como el base para la elaboración de pellets, a diferencia de *Pinus spp.*, no es aconsejable dicha operación ni desde el punto de vista técnico ni del económico.

El menor PCI encontrado en general en corteza se podría deber a que está más expuesta a la humedad que el interior, por lo que Vignote y Martínez (2006) señalan que cuando la madera tiene agua su poder calorífico se reduce, primero por el propio contenido de agua y segundo porque parte de la energía calorífica de la madera se invierte en evaporar el agua libre o ligada a la pared celular de la madera. En resumen, el poder calorífico se incrementa gradualmente a medida que el contenido de humedad va disminuyendo.

Caso aparte, es el presentado por almendro en el cual el PCI tiende a ser más elevado que en los otros frutales y los valores se invierten: la corteza posee un PCI mayor que la mezcla, lo que podría deberse a que esta especie en su corteza puede estar compuesta por sustancias, principalmente aceites esenciales, que facilitan el aumento del PC, ya que este aumento no sólo depende del CH, también depende de la composición química del material (Fonseca 2006). Es por ello, por lo que se recomienda realizar futuras investigaciones con el fin de estudiar más a fondo esta especie en particular.

#### *b) Porcentaje de cenizas*

En la siguiente tabla se recogen los valores correspondientes a los ensayos de determinación del porcentaje de cenizas para frutales.

**Tabla 47.** Porcentaje de cenizas por especie frutal

Especie	Material	Cenizas (%)
<i>C. sinensis</i>	ramas	2,8
<i>O. europaea</i>	ramas	2,4
<i>P. amygdalus</i>	ramas	1,0

Los valores obtenidos en la tabla 47, corresponden al material de mezcla en ramas < 7,0 cm de diámetro e indican que, los naranjos presenta el mayor porcentaje de cenizas (2,8%), respecto a olivos y almendros (2,4% y 1,0% respectivamente), siendo éste último el que menos cenizas deja como residuo de las especies estudiadas.

Existen autores que han realizado estudios de cenizas de los residuos de podas en estas especies en cuanto al material de mezcla, pero no especifican los diámetros promedios que estas ramas de residuos pueden alcanzar, por lo que se consideraron como resultados generales. Siendo así, Fernández (2009) obtuvo en naranjos un 5,2% de cenizas y en almendros 0,8% y Sánchez *et al.* (2002) en olivos obtuvo un 1,5%.

Estas cifras, a excepción de las ramas de los almendros, varían notoriamente con respecto a las obtenidas en este estudio, debido a que el porcentaje de cenizas de la madera depende de muchos factores, variando considerablemente con el clima, época del año, tipo de suelo, tipo de madera y especie, parte del árbol, y de la presencia de otros contaminantes adicionales como tierra y arena que contribuyen a aumentar el contenido de ceniza (Bárceñas-Pazos *et al.* 2008, Knigge y Schulz 1966). Para evitar este aumento del porcentaje de cenizas, se recomienda que en la fase de la entrega de la materia prima en planta los camiones de suministro de biomasa cumplan ciertos requisitos mínimos que

aseguren una adecuada humedad a su entrega (Marutzky y Seeger 1999), así como que incluyan equipamientos que permitan el pesado del combustible suministrado (IDAE 2009)

*c) Materia volátil*

Se determinó la materia volátil que es expresado en la siguiente tabla.

**Tabla 48.** Porcentaje de materia volátil por especie frutal

Especie	Material	Materia volátil (%)
<i>C. sinensis</i>	ramas	35,0
<i>O. europaea</i>	ramas	36,8
<i>P. amygdalus</i>	ramas	34,6

La tabla 48 indica que en general los valores son muy similares, ya que las ramas de los olivos poseen un 36,8% de materia volátil, seguido de las ramas de los naranjos y olivos con un 35,0% y un 34,6 % respectivamente. Estos valores son relativamente más bajos que los obtenidos por Fernández (2009) quien obtiene 77,6% para naranjos, 53,3% para olivos y 81,4% para almendros. Estas diferencias pueden explicarse porque según Senelwaa y Sims (1999) el contenido en materias volátiles aumenta con la edad de corte pero no se ve afectada por la densidad de la plantación. Por lo que es posible que este autor basara sus muestras en material de podas de árboles de mayor edad con respecto a los de esta investigación, pero esto no es especificado en su estudio.

Estas diferencias de resultados con otros autores pueden deberse a que no siempre es posible contar con la información necesaria en cuanto a condiciones

culturales, fisiográficas, climáticas etc, de los estudios de referencia lo que puede llevar a obtener cifras muy diferentes.

Por lo anterior, se puede concluir que las especies frutales estudiadas producirían potencialmente igual cantidad de material volátil, por ende, mayor producción de gases y humos con las consecuencias que esto conllevaría principalmente al mantenimiento de las calderas. Sin embargo, un buen mantenimiento de una caldera refiriéndose exclusivamente a la materia prima se ve afectada por otras variables tan o más importante en este sentido que la materia volátil de la materia prima, como son el contenido de humedad, porcentaje de cenizas, etc. (Marutzky y Seeger 1999) que ya fueron estudiadas anteriormente.

## 4.5 CUANTIFICACIÓN VOLUMÉTRICA

### 4.5.1 Especie forestal mediterránea

#### a) Determinación clases diamétricas y altura del fuste

En el estudio del *Quercus ilex* se obtuvo en total de 90 fustes de las parcelas representativas muestreadas.

En la Tabla 49 se muestran estadísticas descriptivas en base al diámetro promedio general de todos los fustes muestreados.

**Tabla 49.** Estadística descriptiva de la distribución de las clases diamétricas de fuste (cm) y altura (m) en *Quercus ilex*

Parámetro	N	Min	- $\sigma$	Prom.	+ $\sigma$	Max	CV (%)
DAP	90	7,5 ...	8,8 ...	<b>11,9 ...</b>	15,0 ...	17,4 ...	26,1
H	90	4,5 ...	5,3 ...	<b>5,8 ...</b>	6,2 ...	7,2 ...	7,9

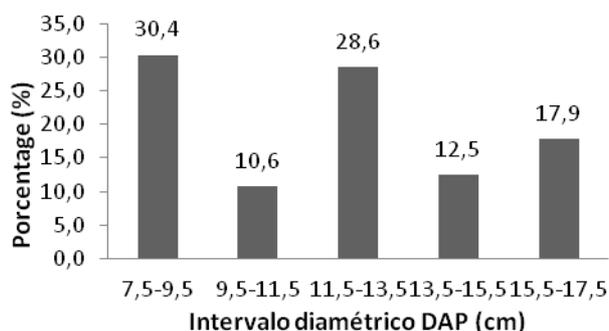
A diferencia de las otras especies, las encinas estudiadas corresponden a una masa boscosa pura, sin mayor intervención antropogénica en las últimas décadas, ubicada en un mismo sector en similares condiciones de sitio. Sin embargo, la condición del bosque puro de estos rodales con regeneración natural comparte características similares de homogeneidad con las repoblaciones forestales mono-específicas, ya que tiene una masa uniforme de una sola especie, coetánea y en las mismas condiciones de sitio que se traduce en una baja variabilidad del DAP, lo que es de esperar debido en masas boscosas regeneradas naturalmente después

de grandes incendios forestales en condiciones del sitio similares (Quintanilla 2005).

En cuanto al DAP promedio para esta especie es de 11,9 cm. Según Rodà *et al.* (2009) el 96,7% de las encinas en España están por debajo de 22,5 cm de DAP. Estos valores están en coincidencia con la amplitud diamétrica fustal encontrada en la toma de muestras de este estudio, siendo el DAP medio de 11,9 cm y el máximo encontrado de 17,4 cm, resaltando el CV de 26% (ver tabla 49).

Por consiguiente, el lento crecimiento diametral de la encina en condiciones mediterráneas con altitudes superiores a 1.000 m s.n.m. y los consiguientes diámetros pequeños pueden explicarse debido a las limitaciones de sitio en las zonas muy marginales donde esta especie ha sido desplazada o aislada por la actividad agrícola (Donoso 1993). Pero la razón más importante es la alta densidad de población, que en las parcelas muestreadas es de unos 3.200 árboles/ha. En estos bosques crecidos por regeneración natural de la masa, normalmente no manejados, éste es el resultado de una ausencia de tratamientos silviculturales (clareos o limpieza, raleos) o alteraciones mínimas, incluso desde su origen (Cruz *et al.* 2009). Además, las grandes dimensiones de fuste en el rodal se han eliminado debido a que históricamente se ha usado como leña en trabajos de huroneo (Ortego *et al.* 2010).

En relación a los valores observados para el DAP, la altura muestra un promedio de 5,8 m la cual varía muy poco con un coeficiente de variación del 7,9%. Esto último indicaría que aquellas masas boscosas están alcanzado una fase de culminación en crecimiento en altura, no así en el crecimiento diametral (DAP).



**Figura 51.** Distribución del DAP en los árboles analizados de *Quercus ilex*

Se puede señalar que el 69,6% de los árboles se encuentra entre los 7,5 y 13,5 cm de DAP, estando el porcentaje restante (30,4%) entre los 13,5 y 17,5 cm de DAP. Siendo los intervalos de mayor frecuencia los de [7,5 – 9,5] con 30,4% y de [11,5 – 13,5] con 28,6%, el intervalo diamétrico que menos se repite es el de [9,5 a 11,5] con sólo 10,6%.

En varios estudios se proponen diferentes diámetros de referencia para la utilización de la biomasa de las especies forestales mediterráneas, principalmente de coníferas. Merino *et al.* (2005) propone diámetros  $\geq 7,0$  cm y Brañas *et al.* (2000) toma como referencia los diámetros  $\geq 4,0$  cm para el mismo fin. Del mismo modo, en términos generales, Tolosana (2009) señala que la fracción que puede ser destinada a biomasa con fines energéticos son las que pueden alcanzar hasta los 14 cm de diámetro, que en árboles forestales corresponden a puntales y ramas, destinándose a la fabricación de astillas, siendo estos diámetros aproximadamente coincidentes con los máximos hallados en los arboles estudiados. En el PATFOR (2011) se señala que todos aquellos árboles de diámetro con corteza menor de 23 cm son susceptibles de ser considerados de forma íntegra un recurso bioenergético. Es decir, todo el conjunto de su biomasa aérea es considerado como biomasa residual forestal. En este estudio, un

diámetro mínimo de 7,0 cm se ha considerado para el potencial industrial o el uso de energía que coincide con Merino *et al.* (2005).

En este estudio, según las características de la encina, referidas principalmente a sus dimensiones (diámetro y longitud), se determinaron los diámetros referenciales mínimos para su uso potencialmente bioenergético y/o como material coincidiendo con Merino *et al.* (2005) al considerar que 7,0 cm es un diámetro mínimo para comenzar a trabajar en el aprovechamiento de la biomasa fustal. Así, se evita la sobreestimación del volumen obtenido y previene el forzar las dimensiones de los productos que se pudieran obtener. Además, estos intervalos diamétricos contemplan raleos, cuando corresponda.

#### *b) Determinación del factor de forma*

Los factores de forma obtenidos son determinados, a través del volumen promedio, de un número determinado de los 90 árboles muestreados.

**Tabla 50.** Estadística descriptiva del factor de forma ( $f_v$ ) en *Quercus ilex*

N	Min	- $\sigma d$	Prom.	+ $\sigma d$	Max	CV (%)
90	0,55 ...	0,59 ...	<b>0,66</b>	0,73 ...	0,80 ...	10,7

Para encina el factor de forma obtenido es de 0,66, con un coeficiente de variación bajo del orden del 10,7%. Este factor de forma es un valor normal y coincide con los obtenidos por Serrada y San Miguel (2008) con un valor promedio de 0,69 calculado para distintas edades. Sin embargo, para el IFN-3 (2010) el factor de forma en esta especie es de 0,74, que es un valor ligeramente más alto del obtenido, pero se encuentran dentro de los valores esperables por lo que la diferencia no debe considerarse como significativa ni relevante.

En general, los resultados para los factores de forma resultan muy variables, no sólo entre especies sino también entre individuos de la misma especie e, incluso, en una misma masa forestal. Esto se puede atribuir a dos causas. La primera es el hecho de que cada una posee distintas características morfológicas, siendo la forma de las ramas y fustes una de ellas, lo que es corroborado por Donoso (1995), quién señala que la variación dependerá de la especie arbórea y las condiciones medioambientales donde se encuentre. La segunda es que se debe a la variable densidad forestal (árboles por ha, área basal) es el otro factor que afecta fuertemente al factor de forma, ya que a mayores densidades mayor competencia, lo que obliga a los árboles a buscar la luz de manera natural y crecen fuertemente en altura y desarrollándose una poda natural (plantaciones y rodales naturales jóvenes). Sin embargo, cuando la densidad es reducida, no hay mucha competencia por luz, los árboles crecen con muchas ramas y bajos en altura, y no necesitan poda natural (Kramer 1988).

La divergencia en los dos tipos de crecimiento es notoria, lo que se traduce en diferencias en el crecimiento en diámetro y altura, afectando al factor de forma (Prodan *et al.* 1997).

Todos estos resultados son muy importantes al realizar una planificación de los tratamientos silvícolas (podas y/o raleos) que se realizarán en una masa forestal, ya que se puede determinar previamente, con una buena aproximación, la cantidad de biomasa extraída, para una posterior valorización económica, como materia prima para usos energéticos y/o materiales (von Wilpert 2008).

c) *Determinación volumen fustal*

Siguiendo la metodología descrita por Prodan *et al.* (1997), para la obtención del volumen total correspondiente al fuste principal del árbol, que en este caso por tratarse de una especie de fuste delicuescente (latifoliadas), esto es, un fuste definido hasta el punto de inicio de la copa y además sin deducción por defectos, se utilizó la fórmula de Huber (1828), teniendo por diámetro medio el DAP.

La tabla 51 muestra las estadísticas descriptivas calculadas para el volumen fustal de los árboles representativos muestreados.

**Tabla 51.** Volumen del fuste de *Quercus ilex* (m<sup>3</sup>/árbol)

DAP	N	Min	- $\sigma_f$	Prom.	+ $\sigma_f$	Max	CV (%)
< 10,0 cm	36	0,016 ...	0,017 ...	<b>0,021</b>	0,024 ...	0,027 ...	17,1
≥ 10,0 cm	54	0,029 ...	0,038 ...	<b>0,060</b>	0,082 ...	0,100 ...	36,4
<b>TOTAL</b>	90	0,020 ...	0,021 ...	<b>0,045</b>	0,069 ...	0,100 ...	53,0

El volumen del fuste se considera el volumen del árbol completo, siendo en promedio de 0,045 m<sup>3</sup>/árbol. Lo que coincide plenamente con los resultados conseguidos por García *et al.* (2009) quien obtuvo un promedio de 0,086 m<sup>3</sup>/árbol en rodales de encina en Castilla- La Mancha.

Teniendo en cuenta el volumen promedio del fuste y la densidad de población (3.200 árboles/ha), el volumen total promedio se puede calcular un valor de 144,8 m<sup>3</sup>/ha.

El volumen fustal total de las muestras tiene una alta variación (CV = 53,0%), en consonancia con lo descrito por Kramer (1988) para las especies frondosas

forestales. Sin embargo, si la muestra se subdivide en dos subclases diametrales (DAP <10 cm y DAP > 10 cm), esta variación se reduce considerablemente, siendo para DAP <10 cm 17,1% y DAP > 10 cm 36,4%. De acuerdo a esto, el CV es menor en los árboles de diámetros < 10,0 cm, lo que se explica según González e Ibarz (1998), ya que la rápida culminación de su crecimiento en altura en comparación con el crecimiento en DAP afecta directamente a la variabilidad resultante del volumen fustal. Así, en este caso, los árboles seleccionados con diámetros más pequeños muestran un CV inferior y los árboles con diámetros mayores muestran un CV mayor.

*d) Relación diámetro y volumen fustal*

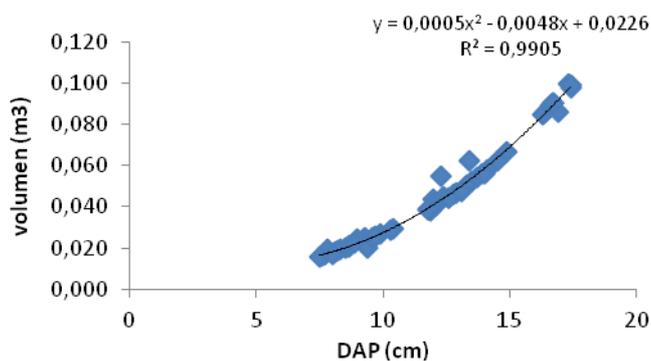
La ecuación de volumen fustal obtenidas para la encina son determinadas a través del diámetro de fuste, siendo los resultados entregados en m<sup>3</sup>.

**Tabla 52.** Ecuación de volumen fustal para *Quercus ilex*

Ecuación de volumen fustal (m <sup>3</sup> )	R <sup>2</sup>	σ V <sub>f</sub>
V <sub>f</sub> = 0,0005 DAP <sup>2</sup> - 0,0048 DAP + 0,0226	0,991 ***	0,006

Donde V<sub>f</sub> es el volumen del fuste (m<sup>3</sup>), DAP es el diámetro de fuste a 1,3 m (cm), R<sup>2</sup> es coeficiente de determinación y σV<sub>f</sub> es la desviación estándar de V<sub>f</sub>.

La Tabla 52 y la figura 52 muestran la ecuación más significativa obtenida después del análisis de regresión. Este modelo es capaz de predecir el volumen del fuste incluyendo sólo la variable DAP y un factor de forma constante de 0,66.



**Figura 52.** Relación diámetro (cm) versus volumen fustal ( $m^3$ ) para *Quercus ilex*

La ecuación obtenida es recomendable para su aplicación. Así, la ecuación de regresión es altamente significativa, con un nivel de determinación de  $R^2 = 0.991$  y una  $\sigma V_f$  mínima (0,006).

La relación obtenida del modelo de predicción entre el DAP y volumen fustal (figura 52) es muy recomendable para su aplicación práctica. Este resultado no es inesperado, debido a la homogeneidad de las parcelas muestreadas y al análisis de los anteriores árboles representativos seleccionados. En consecuencia, este modelo de predicción se puede aplicar para rodales de encinas jóvenes puros de regeneración natural coetáneos (aprox. 30 años) y no manejados.

#### 4.5.2 Cultivo energético leñoso

##### a) Determinación clases diamétricas

Tras el muestreo de los individuos representativos en los rodales de estudio zona costera 1 (con riego y densidad de plantación de 1196,2 arb/ha) y zona costera 2

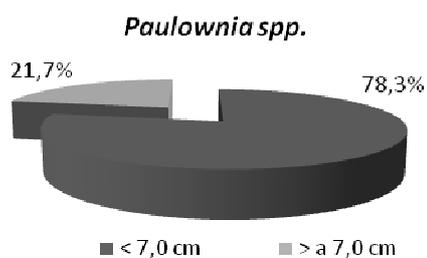
(sin riego y densidad de plantación de 784,9 arb/ha), se analizaron un total de 30 árboles.

En la Tabla 53 se muestran las estadísticas descriptivas en base al DAP de los fustes muestreados de 12 meses de edad.

**Tabla 53.** Estadística descriptiva de la distribución de las clases diamétricas fustal (cm) de *Paulownia spp.*

N	Min	- $\sigma d$	Prom.	+ $\sigma d$	Max	CV (%)
30	5,3 ...	6,4 ...	9,1	11,7 ...	15,5 ...	28,6

El DAP promedio, obtenido para ambos rodales, al primer año del establecimiento de la plantación es bastante alto y se podría comparar con los valores obtenidos por Santelices (2005) en plantaciones forestales de *Eucalyptus spp.* de 5 años en condiciones de sitio similares. Sin embargo, esta comparación sólo es utilizable para graficar el incremento en diámetro de esta especie con respecto a otras plantaciones arbóreas más conocidas. Además, según Gerding y Schlatter (1995) la productividad de una especie varía ampliamente dentro de cada zona climática y tipo de suelo. Aun así, en este caso, la variabilidad general de diámetros fustales de paulonia tanto en la zona litoral como en la zona del interior es baja a moderada.



**Figura 53.** Distribución diamétrica porcentual de fustes en *Paulownia spp.*

Finalmente, para la evaluación del estado del rodal y con el fin de tomar decisiones de manejo posibles de implementar interesaba obtener una descripción cuantitativa de éste, lo que es posible de conseguir a partir de las distribuciones y frecuencias de diámetros, debido a la gran proporcionalidad entre esta variable y a la información obtenida de un inventario forestal (Prodan *et al.* 1997). Por esto, la importancia de determinar las clases diamétricas radica en que el diámetro es una de las dimensiones arbóreas directamente mensurable y constituye un insumo básico para el cálculo del área basal, el volumen de fuste, la biomasa aérea de los árboles, cobertura, etc (Brown 1997).

*b) Determinación del factor de forma*

A cada árbol muestreado se le calculó el factor de forma. Los resultados obtenidos son determinados, a través del volumen promedio, de un número determinado de árboles (N).

**Tabla 54.** Estadística descriptiva del factor de forma ( $f_v$ ) de *Paulownia spp.*

<b>N</b>	<b>Min</b>	<b>- <i>sd</i></b>	<b>Prom.</b>	<b>+ <i>sd</i></b>	<b>Max</b>	<b>CV (%)</b>
30	0,57 ...	0,62 ...	<b>0,69</b>	0,76 ...	0,84 ...	9,6

En paulonia, el factor de forma obtenido (0,69) indica que esta especie tiende hacia una forma más bien cilíndrica, lo que se ajusta a lo observado por otros autores (Ojeda 1977, Lombardi y Huerta 2006, GEMA 2011), que señalan que un valor promedio del factor de forma utilizado en latifoliadas de origen tropical y subtropical está en torno a 0,70.

Una vez obtenido el factor de forma, éste fue incorporado a la ecuación de cálculo del volumen para un año de rotación (tabla 55). Este sólo se ha determinado para

la ecuación de plantaciones de 12 meses, ya que se considera que para estas plantaciones su ciclo de vida no debe ser inferior a la rotación anual.

*c) Análisis del volumen aparente versus volumen real*

Normalmente el volumen real se considera igual al volumen aparente del fuste. Sin embargo, lo singular de la paulonia, es el interior de su fuste. En este trabajo se ha podido constatar que su estructura es hueca en su parte medular y va en aumento hasta, aproximadamente, el DAP, para luego comenzar a disminuir nuevamente. Es por ello por lo que debemos distinguir entre dos tipos de volumen, el volumen aparente que es el obtenido en campo de manera tradicional (al medir el DAP con forcípula) y el real, que resta el volumen vacío del interior del fuste, determinado a través de un modelo matemático que permite predecir el volumen de madera contenido en el fuste. Por lo que las diferencias de volumen son de importancia para el uso de la madera y es un factor que se debe tomar en cuenta a la hora de la cuantificación de la biomasa.



**Figura 54.** Variación del tamaño de la oclusión en fuste de *Paulownia* spp. hasta los 5,5 m de altura

Los resultados obtenidos tienen alcance sólo para plantaciones de 12 meses de edad en la zona costera 1 y 2. Esta comparación de volumen aparente versus volumen real no fue determinada para la zona interior, ya que en ella las

plantaciones, al momento de la medición, tenían seis meses y no era posible establecer esta relación con el DAP por la escasa altura de los árboles en ese momento. Se desconoce qué pasa con la oclusión de la madera (% de volumen vacío) a mayor edad.

**Tabla 55.** Ecuación de volumen real para *Paulownia spp.* de 12 meses de edad

Zona costera	Ecuación de volumen fustal real (m <sup>3</sup> )	R <sup>2</sup>	$\sigma V_{fr}$
Z. costera 1	$V_{fr} = -0,012 + 0,0020 \text{ DAP} + 0,002 \text{ H}$	0,974 <sup>***</sup>	0,001
Z.costera 2	$V_{fr} = -0,069 + 0,009 \text{ DAP} + 0,0051 \text{ H}$	0,989 <sup>***</sup>	0,001

Donde  $V_{fr}$  es Volumen real del fuste (m<sup>3</sup>); DAP es Diámetro de fuste a 1,3 m (cm); H es la altura total del árbol, R<sup>2</sup> es Coeficiente determinación (\*\*\*) P<0,001) y  $\sigma V_{fr}$  es Desviación estándar de  $V_{fr}$ .

Para efectos de obtener el volumen aparente de cada árbol, se ha estimado el volumen del fuste con la fórmula de Huber (1828). La tabla 56 muestra los resultados obtenidos para el volumen aparente y el volumen real, determinado este último con la ecuación de la tabla 55. En el cálculo ya se encuentra incorporado el factor de forma.

**Tabla 56.** Volúmenes de fuste promedio (m<sup>3</sup>/árbol) hasta los 5,5 m de altura en plantación de *Paulownia spp.* de 12 meses en la zona costera

Volumen	Min	- $\sigma f$	Prom.	+ $\sigma f$	Max	CV (%)
Aparente	0,024 ...	0,028 ...	<b>0,033</b>	0,038 ...	0,042 ...	15,8
Real	0,018 ...	0,022 ...	<b>0,026</b>	0,031 ...	0,034 ...	16,6

Siendo, el volumen aparente de 0,033 m<sup>3</sup>/árbol promedio y el volumen real 0,026 m<sup>3</sup>/árbol promedio, lo que se traduce en un 81,8% de volumen de madera real

con respecto al volumen aparente, el porcentaje restante corresponde al volumen vacío (19,2%).

Los resultados obtenidos tienen alcance sólo para plantaciones de un año de edad, ya que se desconoce qué pasa con la oclusión de la madera (% de volumen vacío) a mayor edad.

*d) Relación entre diámetro y volumen fustal aparente*

Las ecuaciones de volumen fustal obtenidas son determinadas a través del diámetro de fuste, siendo los resultados entregados en m<sup>3</sup>. Se realizó una ecuación para la zona interior y otras para la zona costera 1 y otra para la zona costera 2, todas para una rotación anual.

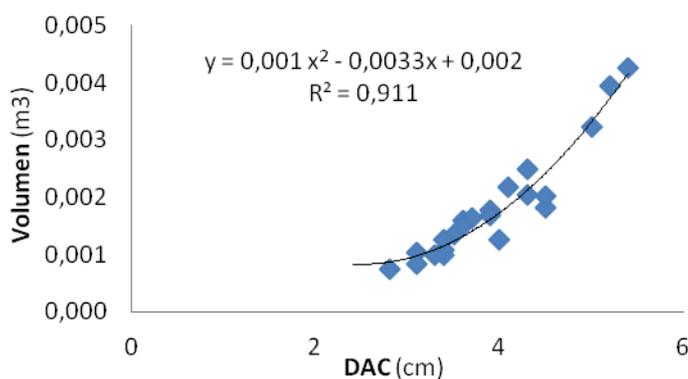
**Tabla 57.** Ecuación de volumen fustal aparente en zona interior y zona costera 1 y 2 para *Paulownia spp.*

Zona Geográfica	Ecuación de volumen fustal aparente (m <sup>3</sup> )	R <sup>2</sup>	σ V <sub>f</sub>
zona interior	$V_f = 0,001 \text{ DAC}^2 - 0,0033 \text{ DAC} + 0,002$	0,911 <sup>***</sup>	0,022
zona costera 1	$V_f = 0,0013 \text{ DAP}^2 - 0,0211 \text{ DAP} + 0,0853$	0,976 <sup>***</sup>	0,002
zona costera 2	$V_f = 0,0043 \text{ DAP}^2 - 0,0843 \text{ DAP} + 0,4463$	0,891 <sup>***</sup>	0,004

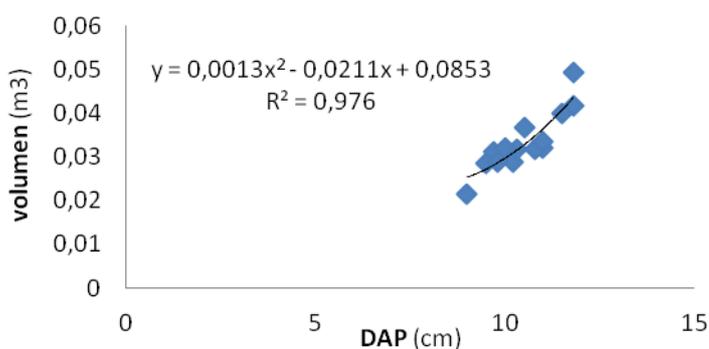
Donde V<sub>f</sub> es Volumen del fuste (m<sup>3</sup>); D<sub>fDAC</sub> es Diámetro altura del cuello (cm); D<sub>fDAP</sub> es Diámetro de fuste a 1,3 m (cm); R<sup>2</sup> es Coeficiente determinación y σV<sub>f</sub> es Desviación estándar de V<sub>f</sub>.

Las figuras 55, 56 y 57 muestran la ecuación más significativa obtenida por zona después del análisis de regresión. Este modelo es capaz de predecir el volumen

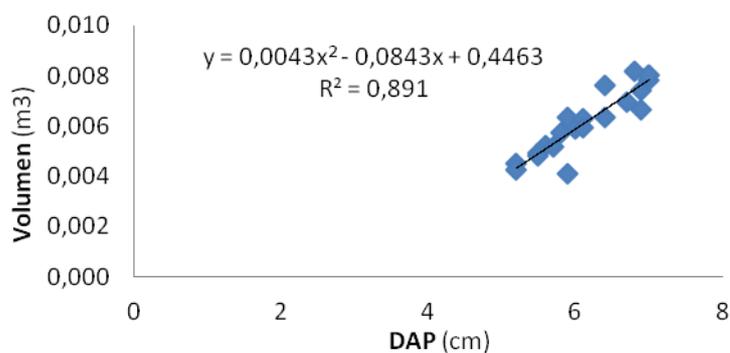
del fuste incluyendo sólo la variable DAC/DAP y un factor de forma constante de 0,69.



**Figura 55.** Relación diámetro (cm) versus volumen fustal (m<sup>3</sup>) para zona interior de *Paulownia spp.*



**Figura 56.** Relación diámetro (cm) versus volumen fustal (m<sup>3</sup>) para zona costera 1 de *Paulownia spp.*



**Figura 57.** Relación diámetro (cm) versus volumen fustal (m<sup>3</sup>) para zona costera 2 de *Paulownia spp.*

En paulonia la ecuación que relaciona el diámetro y el volumen fustal para la zona interior resulta recomendable para su aplicación, ya que muestra la fuerte relación existente entre el DAC y el volumen del fuste alcanzando un  $R^2$  de 0,911 y una  $\sigma_{V_f}$  mínima (0,007), pese a que estas plantaciones se encuentran establecidas en una zona con condiciones de sitio difíciles para el establecimiento y buen desarrollo de un cultivo de esta naturaleza. Sin embargo, para la zona costera, ha sido confeccionada con el DAP como variable independiente, estando representada por dos subzonas, la zona costera 1 (con riego y mayor densidad de plantación) y la zona costera 2 (sin riego y menor densidad de plantación), obteniéndose un  $R^2$  más alto de 0,976 en la zona costera 1 y en la zona costera 2 de 0,891, pero ambos valores resultan ser aceptables, presentando ambas ecuaciones una desviación estándar mínima (0,002 a 0,004), por lo que resultan ser ecuaciones recomendables para su aplicación con una baja variabilidad del DAP.

#### *e) Determinación del volumen en diferentes zonas geográficas de la Comunidad Valenciana*

En las diferentes zonas geográficas de la Comunidad Valenciana el volumen obtenido es muy distinto, existiendo diferencias estadísticamente significativas entre sus medias, por lo tanto, no es conveniente establecer un promedio para esta zona.

El volumen por árbol promedio de paulonia de la zona interior fue determinado a los 6 meses de edad, y únicamente con motivos de lograr realizar una comparación con las parcelas de la zona costera se ha establecido el supuesto, en este caso en específico, de que el volumen anual es el doble del obtenido a los 6 meses. En la zona interior, debido a la poca edad y altura de estos individuos (<3

m) fueron evaluadas con la variable DAC, y no fue aplicado el factor de forma (0,69), siendo en este caso la variación despreciable y sólo dificulta el cálculo. En la zona costera los volúmenes sí se encuentran ajustados al factor de forma calculado en este estudio, ya que son árboles de mayores dimensiones y este factor cobra importancia en este caso.

El volumen es muy distinto en la zona del interior con respecto a la zona costera. En la primera el volumen promedio es de  $0,006 \text{ m}^3/\text{árbol}$  (volumen equiparado a rotación anual con el fin de contrastar con la zona costera). En la segunda, la zona costera 1 y 2, siendo el volumen promedio de  $0,039 \text{ m}^3/\text{árbol}$  y  $0,066 \text{ m}^3/\text{árbol}$  respectivamente (Tabla 58). Además se realizó el t-test, para comparar las medias del volumen en la zona costera 1 y 2, resultando que existen diferencias estadísticamente significativas entre sus medias para un nivel de confianza del 95,0 %. Por lo tanto, no es conveniente establecer un promedio para esta zona.

Si bien son volúmenes bajos, a excepción de la zona costera 2, cabe tener en cuenta que se trata de plantaciones que poseen distintas densidades de plantación de casi 2.000 plantas/ha en la zona de interior a no superar las 1.000 plantas/ha en la zona costera.

Como referencia se puede citar a Zhao-Hua *et al.* (1986) quienes señalan que en condiciones normales a 10 años de edad la paulonia debería alcanzar un volumen de  $0,3$  a  $0,5 \text{ m}^3/\text{árbol}$  y que bajo condiciones óptimas este volumen lo alcanzaría en cinco o seis años. Otros autores, como Hakan-Akyildiz y Sahin-Kol (2009) señalan que cada árbol de paulonia podría llegar a producir un metro cúbico de madera cada cinco o siete años.

En la tabla 58, se realizó una estimación del rendimiento anual de estas plantaciones, con datos reales, obtenidos en campo, en el caso de la zona costera, y proyectando a 12 meses los datos obtenidos a 6 meses en la zona del interior. Sin embargo, no se puede realizar una proyección, sobre la cuantificación volumétrica para esta especie, que vaya más allá de una rotación anual, ya que se desconocen sus ritmos de crecimiento y/o el IMA (incremento medio anual) en las zonas geográficas determinadas. Tampoco se conoce el crecimiento en oclusión del hueco interior a partir del primer año.

**Tabla 58.** Proyección rendimiento anual del volumen ( $\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$ ) de *Paulownia spp.* en la Comunidad Valenciana

Zona Geográfica	Volumen ( $\text{m}^3/\text{arb}$ )	Densidad (arb/ha)	Rendimiento anual ( $\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$ )
zona interior 1	0,006	1.890	11,3
zona costera 1	0,039	1.196	51,8
zona costera 2	0,066	785	46,2

Para rotaciones de un año podemos observar que se tiende a un crecimiento en la zona costera 1 (alta densidad de plantación con riego) de  $51,8 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$  y en la zona costera 2 (baja densidad de plantación sin riego) de  $46,2 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$  y en la zona interior (700 m s.n.m.)  $11,3 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$  según densidad de plantación. Si bien es cierto que los volúmenes son dispares, el rendimiento anual viene dado por la biomasa contenida en una hectárea, por lo que resulta clave la densidad de plantación al momento de obtener un mayor o menor rendimiento, y al igual que en la determinación del volumen no resulta conveniente establecer un valor promedio para la zona costera, ya que la comparación de medias realizadas arroja una diferencia significativa entre ellas para un nivel de confianza del 95,0 %.

Para Baettig *et al.* (2010), la densidad de plantación tiene una enorme influencia en la rapidez de acumulación de biomasa por hectárea. Por lo que, una mayor densidad de plantación se traduce en una mayor cantidad de individuos formando biomasa. Por otra parte, un exceso de árboles por hectárea provocará una disminución del crecimiento, por existir demasiada competencia por luz, agua y nutrientes.

Si bien, la zona interior posee un volumen menor a la zona costera, se debe señalar que para la primera se usó como variable de estimación el DAC junto a H, ya que debido a las bajas alturas de sus árboles, en promedio 1,6 m, no fue posible obtener la medición del DAP. En cambio, para la zona costera 1 y 2 sí se uso como variable de estimación el DAP y H.

Aun así, al comparar la zona costera en general con la del interior en altura, de secano, es esperable la alta variabilidad de volumen que se presenta entre los árboles de ambas zonas, ya que son valores esperables en monocultivos con un desarrollo en condiciones medioambientales (clima, suelo, y factores fisiográficos) y culturales (riego, marco de plantación, etc.) muy diferentes.

#### **4.5.3 Especies agrícolas leñosas**

##### *a) Determinación de las clases diamétricas del fuste*

Se obtuvo, en total, al menos 60 fustes muestreados por especie.

En la Tabla 59 se muestran estadísticas descriptivas en base al diámetro promedio general de todos los fustes muestreados.

**Tabla 59.** Estadística descriptiva de la distribución de las clases diamétricas de fuste por especie (cm)

Especie	N	Min	- $\sigma$ d	Prom.	+ $\sigma$ d	Max	CV (%)
<i>C. sinensis</i>	90	6,3 ...	9,7 ...	<b>14,9</b>	20,1 ...	25,6 ...	34,9
<i>O. europaea</i>	75	11,8 ...	16,6 ...	<b>26,9</b>	37,2 ...	52,4 ...	38,3
<i>P. amygdalus</i>	60	14,7 ...	18,4 ...	<b>23,0</b>	27,5 ...	31,2 ...	19,7

La mayor amplitud de diámetros fustales corresponde a olivo (16,6 - 37,2 cm) y la menor a almendro (18,4 – 27,5 cm). En el primero es esperable una mayor amplitud, ya que al igual que en naranjos se evaluaron plantaciones de distintas edades. Sin embargo, las diferencias de edades en las plantaciones de olivo fueron mucho mayor (desde 10 a 80 años), a diferencia de almendros que las plantaciones evaluadas eran coetáneas, lo que también ha influido en que olivos sean los que exhiben, en promedio, mayores diámetros de fuste con 26,9 cm, siendo, por lo demás, propio de esta especie el tener un fuste bien desarrollado. Le sigue almendro con 23,0 cm, en que las parcelas estudiadas corresponden a plantaciones adultas (mayores a 30 años), y que a diferencia de naranjos poseen un fuste bien desarrollado característico de esta especie.

La variabilidad de diámetros fustales es mayor en olivo y naranjo con respecto a almendro, por las razones ya expuestas. Sin embargo, en general, al tratarse de monocultivos se puede considerar como una variabilidad normal. Otro factor que pudiera determinar la amplitud de esta distribución diamétrica, es la variabilidad natural entre individuos de una misma especie (Donoso 1995).



**Figura 58.** Distribución diamétrica porcentual de fustes en frutales

En general, la variabilidad del Dm es baja, lo que indica homogeneidad en los diámetros de fuste dentro de cada especie, lo que es esperable al tratarse de plantaciones coetáneas en similares condiciones de sitio dentro de cada especie.

Finalmente, para la evaluación del estado de la plantación y con el fin de tomar decisiones de manejo posibles de implementar interesaba obtener una descripción cuantitativa de ésta, lo que es posible de conseguir a partir de las distribuciones y frecuencias de diámetros, debido a la gran proporcionalidad entre

esta variable y a la información obtenida de un inventario forestal (Prodan *et al.* 1997). Por esto, la importancia de determinar las clases diamétricas radica en que el diámetro es una de las dimensiones arbóreas directamente mensurable y constituye un insumo básico para el cálculo del área basal, el volumen de fuste, la biomasa aérea de los árboles, cobertura, etc (Brown 1997).

En este estudio, según las características de cada especie, referidas principalmente a sus dimensiones (diámetro y longitud), se determinaron los diámetros referenciales mínimos para su uso potencialmente bioenergético o como material. Por esto, se considera que no es posible señalar un intervalo diámetro específico que contemple todo el abanico de especies frutales existentes, ya que entran en juego otras variables. Sin embargo, se coincide con Merino *et al.* (2005) y se considera que 7,0 cm es un diámetro mínimo para comenzar a trabajar en el aprovechamiento de la biomasa fustal. Así, se evita la sobreestimación del volumen obtenido y previene el forzar las dimensiones de los productos que se pudieran obtener. Además, estos intervalos diamétricos contemplan podas, cuando corresponda, y corta de árbol completo.

##### *b) Determinación factor de forma*

Los factores de forma obtenidos son determinados, a través del volumen promedio, de un número determinado de árboles muestreados (N) por especie.

**Tabla 60.** Estadística descriptiva del factor de forma ( $f_v$ ) en las especies estudiadas y CV (%) en frutales

Especie	N	Min	- $\sigma d$	Prom.	+ $\sigma d$	Max	CV (%)
<i>C. sinensis</i>	90	0,69 ...	0,81 ...	<b>0,88</b>	0,98 ...	0,98 ...	10,0
<i>O. europaea</i>	75	0,32 ...	0,53 ...	<b>0,71</b>	0,90 ...	0,99 ...	26,2
<i>P. amygdalus</i>	60	0,41 ...	0,44 ...	<b>0,47</b>	0,51 ...	0,55 ...	7,3

Se obtuvo un factor de forma promedio en naranjos de 0,88, siendo la especie frutal más cercana al cilindro, seguido por el olivo con 0,71, sin embargo almendro está en el extremo opuesto más cercano a la conicidad con 0,47, asemejándose esta última a los resultados obtenidos para coníferas, reconocidas por su forma cónica, y que sus valores varían entre 0,4 y 0,6 (Rebottaro y Cabrelli (2007) y Grosse y Kannegiesser (1988)). Además, la variabilidad (CV) es baja en todas las especies frutales, lo que indica una alta homogeneidad dentro de cada parcela.

En general, los resultados tan dispares de factores de forma, entre especies, se han atribuido a dos causas. La primera es al hecho de que cada una posee distintas características morfológicas, siendo la forma de las ramas y fustes una de ellas, lo que es corroborado por Donoso (1995), quién señala que la variación dependerá de la especie arbórea y las condiciones medioambientales donde se encuentre. La segunda es que se debe a la variable densidad de plantación (árboles/ha) es el otro factor que afecta fuertemente al factor de forma, ya que a medida que la densidad de plantación es menor, disminuye la competencia por luz, los árboles crecen con muchas ramas y bajos en altura, y no necesitan poda natural. Lo que se traduce en diferencias en el crecimiento en diámetro y altura, afectando al factor de forma.

Estos resultados son muy importantes al realizar una planificación de las actividades culturales (podas y/o raleos) que se realizarán a una plantación frutal, ya que se puede determinar previamente, con una buena aproximación, la cantidad de biomasa extraída, para una posterior valoración económica, como materia prima para usos energéticos y/o materiales.

*c) Determinación volumen fustal*

Para efectos de obtener la biomasa total de cada árbol, se ha estimado el volumen del fuste con la fórmula de Huber (1828).

**Tabla 61.** Volumen del fuste por especie ( $\text{m}^3/\text{árbol}$ ) en frutales

Especie	N	Min	- $\sigma_f$	Prom.	+ $\sigma_f$	Max	CV (%)
<i>C. sinensis</i>	90	0,001 ...	0,003 ...	<b>0,006</b>	0,010 ...	0,013 ...	59,3
<i>O. europaea</i>	75	0,014 ...	0,010 ...	<b>0,034</b>	0,058 ...	0,099 ...	71,0
<i>P. amygdalus</i>	60	0,011 ...	0,017 ...	<b>0,031</b>	0,048 ...	0,060 ...	42,8

El volumen fustal es muy variable en olivos y naranjos, en ese orden, lo que se aprecia en los rangos de la  $\sigma_f$  por especie, existiendo fustes de naranjo de mínimas dimensiones, por lo que es el frutal, en estudio, que presenta el menor volumen de fuste promedio. Al ser los árboles de olivo y almendro especies de fuste claramente definido y de mayores y similares dimensiones, estos poseen un volumen mayor, con valores de  $0,034 \text{ m}^3/\text{árbol}$  y  $0,031 \text{ m}^3/\text{árbol}$  respectivamente, a diferencia de naranjos que posee un escaso fuste con  $0,006 \text{ m}^3/\text{árbol}$ .

Almendro muestra el menor CV con un 42,8%, por lo presentan una variabilidad menor en volumen fustal con respecto a naranjo con 59,3% y olivo con 71,0%, tan alta variabilidad es apreciada visualmente en campo, ya que en olivos y naranjos

se midieron árboles de distintas edades, además estos valores se ven influenciados por la variabilidad natural mostrada en el fuste por estas dos últimas especies una misma plantación, lo que se es ratificado por Cubero (2003), quien señala que el 90% esto es atribuible a variaciones dentro de una misma población, tanto para caracteres cualitativos como cuantitativos, demostrándose así la variabilidad que existe en poblaciones locales leñosas.

Según estos resultados, podemos ver que la biomasa fustal de olivo y almendro, en general, no es despreciable, y debido a sus mayores dimensiones, en comparación a las obtenidas en ramas, se debe evaluar la posibilidad de obtener productos distintos a estas últimas.

*d) Relación diámetro y volumen fustal*

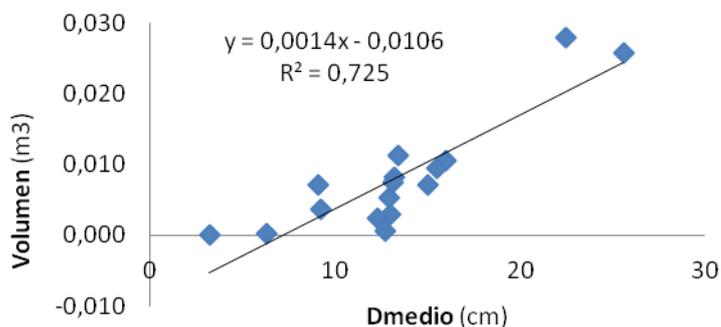
Las ecuaciones de volumen fustal obtenidas son determinadas a través del diámetro de fuste, siendo los resultados entregados en m<sup>3</sup>.

**Tabla 62.** Ecuación de volumen de las distintas especies de frutales

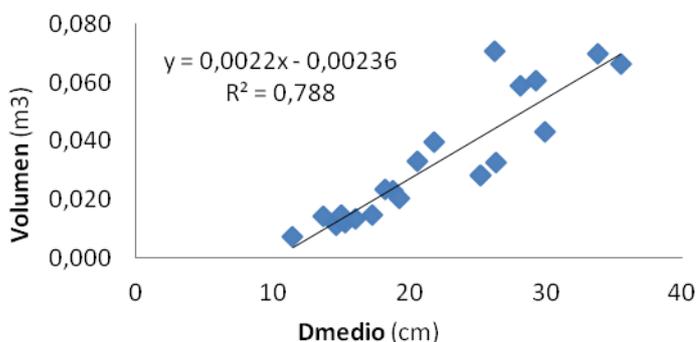
Especie	Ecuación de volumen fustal (m <sup>3</sup> )	R <sup>2</sup>	σ V <sub>f</sub>
<i>C. sinensis</i>	$V_f = -0,0106 + 0,0014 D_{fm}$	0,725 <sup>***</sup>	0,004
<i>O.europaea</i>	$V_f = - 0,00236 + 0,0022 D_{fm}$	0,788 <sup>***</sup>	0,012
<i>P. amygdalus</i>	$V_f = 0,0001 D_{fm}^2 - 0,0014 D_{fm} + 0,028$	0,816 <sup>***</sup>	0,013

Donde V<sub>f</sub> es Volumen del fuste (m<sup>3</sup>); D<sub>fm</sub> es Diámetro de fuste medio (cm); D<sub>fDAC</sub> es Diámetro altura del cuello (cm); D<sub>fDAP</sub> es Diámetro de fuste a 1,3 m (cm); R<sup>2</sup> es Coeficiente determinación y σV<sub>f</sub> es Desviación estándar de V<sub>f</sub>.

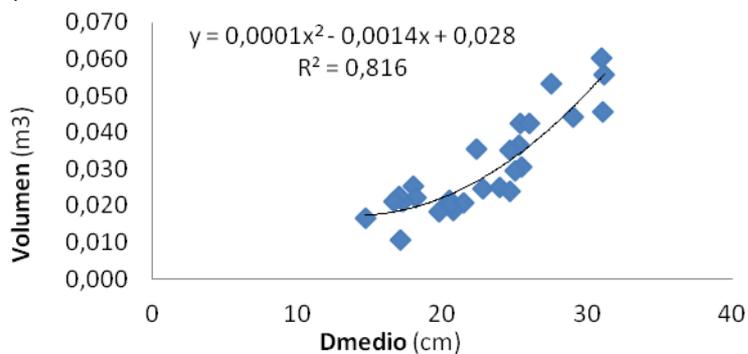
Las figuras 59, 60 y 61 muestran la ecuación más significativa obtenida por zona después del análisis de regresión. Este modelo es capaz de predecir el volumen del fuste incluyendo sólo la variable DAC/DAP y un factor de forma constante.



**Figura 59.** Relación diámetro (cm) versus volumen fustal (m<sup>3</sup>) para *Citrus sinensis*.



**Figura 60.** Relación diámetro (cm) versus volumen fustal (m<sup>3</sup>) para *Olea europaea*



**Figura 61.** Relación diámetro (cm) versus volumen fustal (m<sup>3</sup>) para *Prunus amygdalus*

En estas ecuaciones se lograron  $R^2$  aceptables ( $\alpha=0,01$ ), siendo el menor en naranjo con 0,725, seguido por olivo con 0,788, y el almendro que es el frutal que presenta un mejor ajuste con 0,816, valor que puede estar influenciado por ser una ecuación cuadrática a diferencia de naranjos y olivos que son lineales, se optó por la cuadrática en almendros, ya que mejora notablemente el  $R^2$  en almendros a diferencia de las otras dos especies en que el  $R^2$  no varía mayormente usando una ecuación lineal o cuadrática. Se puede concluir que las ecuaciones obtenidas en estas especies son recomendables para la obtención del volumen fustal. Además, esta conclusión se apoya en que los valores obtenidos de  $\sigma V_f$  resultan ser muy aceptables.

Se debe tener muy presente que son funciones locales que sólo incorporan el diámetro y son muestreos obtenidos en un área geográfica limitada, por lo que deben emplearse en la zona donde se realizó el muestreo de cada especie (Prodan *et al.* 1997). Se optó por las ecuaciones locales, ya que, a pesar de tratarse de monocultivos, las alturas fustales en árboles frutales son extremadamente variables, desde 20 cm a más de 100 cm, en una misma plantación, por lo que la altura agregaría más variabilidad descartándose como una variable a evaluar en este caso.

En el siguiente capítulo sólo considera a los árboles frutales, debido a que la poda es un tratamiento cultural habitual, ya que las ramas son mucho más abundantes, por lo que representan una fuente biomásica leñosa importante que debe ser cuantificada.

e) *Determinación clases diamétricas en ramas*

En la Tabla 63 se muestran estadísticas descriptivas en base al diámetro promedio general de todas las ramas muestreadas en frutales.

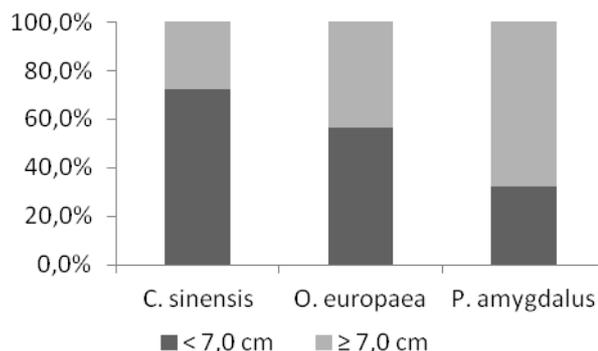
**Tabla 63.** Estadística descriptiva de distribución de las clases diamétricas de ramas (cm) de frutales

<b>Especie</b>	<b>N</b>	<b>Min</b>	<b>- <math>\sigma d</math></b>	<b>Prom.</b>	<b>+ <math>\sigma d</math></b>	<b>Max</b>	<b>CV (%)</b>
<i>C. sinensis</i>	990	2,0 ...	2,5 ...	<b>5,6</b>	8,6...	12,7 ...	54,3
<i>O. europaea</i>	450	2,8 ...	3,3 ...	<b>8,4</b>	13,6 ...	22,9 ...	61,2
<i>P. amygdalus</i>	330	2,2 ...	5,5 ...	<b>9,3</b>	13,2 ...	19,9 ...	41,5

Podemos determinar que el intervalo de distribución normal de ramas en naranjo es de [2,5 – 8,6 cm], en olivo de [1,9 – 16,4 cm], y en almendro de [5,5 – 13,8 cm]. Según estos resultados, olivos y almendros poseen, en promedio, las ramas de mayor diámetro (8,4 y 9,3 cm respectivamente), siendo naranjos el que posee los menores diámetros promedio con 5,5 cm y mayor cantidad de ramas, existiendo una relación inversamente proporcional entre diámetro promedio de las ramas v/s cantidad de ramas por árbol. Por lo que olivos y almendros poseen diámetros o grosores promedios mayores, por lo tanto, una menor cantidad de ramas en su copa.

El alto CV, en todos los frutales es esperado, ya que se han muestreado ramas de distintos grosores en árboles de distintas edades.

En la Figura 62 se muestra la distribución porcentual de diámetros de ramas según clases diamétricas.



**Figura 62.** Distribución diamétrica porcentual en ramas de frutales estudiados

La subdivisión en ramas menores y mayores a 7,0 cm se debe a la utilidad que pudiesen prestar las ramas, en la fabricación de unos productos u otros, que estará condicionada, desde el punto de vista técnico (maquinarias), principalmente por el diámetro (FAO 1998).

Podemos ver en la Figura 62 que, en frutales, naranjo y olivo poseen una mayor concentración porcentual de diámetros inferiores a 7,0 cm, 72,4% y 56,3% respectivamente, a diferencia de almendro que un 67,9% de sus ramas poseen diámetros superiores a 7,0 cm.

Estos resultados, influirán en el destino final que se le quiera dar a esta materia prima, lo que ayudará a una identificación y planificación de los distintos productos que se pueden obtener.

## f) Función de volumen en ramas

La importancia de estas estimaciones es que sirven como herramienta básica en la planificación de las actividades silvícolas (Clutter *et al.* 1983 y Méndez *et al.* 2006), desarrollándose infinidad de modelos para especies forestales, pero no así para frutales.

De cada uno de los modelos probados se han obtenido los  $R^2$  y  $\sigma_v$ .

**Tabla 64.** Modelos de volumen ajustados en frutales por especie

Especie	Autor	Modelo (cm <sup>3</sup> )	R <sup>2</sup>
<i>C. sinensis</i>	Spurr	$V_R = -23 + 0,69923 D_0^2 H$	0,910 <sup>***</sup>
<i>O. europaea</i>	Spurr	$V_R = 397,94 + 0,50193 D_0^2 H$	0,946 <sup>***</sup>
<i>P. amygdalus</i>	Spurr	$V_R = 109,164 + 1,458 D_0^2 H$	0,871 <sup>***</sup>

Donde  $V_R$  es volumen rama (cm<sup>3</sup>).  $R^2$  es coef. determinación.  $D_0$  es diámetro referencial (cm) y H es longitud (cm).

Al contrastar todos los modelos mencionados en la metodología, la función de Spurr es la que mejor se presenta, con altos  $R^2$  ( $\alpha=0,01$ ), siendo en naranjos, olivos y almendros de 0,910, 0,946 y 0,871 respectivamente.

El ajuste de estos modelos, componen una importante herramienta de mensura en estas especies, ya que entregan el volumen en forma directa, pudiendo determinar la biomasa extraída por árbol en la poda en m<sup>3</sup> y extrapolarla a la hectárea bastando con multiplicar por el número de ramas promedio podadas por árbol. Además, para obtener toneladas de residuos de poda por árbol, a las ecuaciones se les multiplicaría por la densidad básica de la especie realizándoles

las transformaciones de unidades necesarias. Además, conociendo el poder calorífico de cada especie será posible determinar los MJ/ha que son posibles de obtener en la poda.

Con estas ecuaciones podemos obtener la biomasa de podas en estos frutales, lo que según FAO (2002), permite estimar el surtido de productos posible de obtener del manejo de la biomasa residual dadas las especificaciones (diámetros y largos mín. y máx.) para productos como pulpa, astillas, chapas de varias calidades, pellets, entre otros.

#### g) Determinación del volumen de copa

Se determinó el volumen de la copa y su  $\sigma$  de un mínimo de 60 árboles por especie.

**Tabla 65.** Estadística descriptiva sobre la distribución del volumen de copa ( $m^3$ )

Especie	N	Min	- $\sigma$	Prom.	+ $\sigma$	Max	CV (%)
<i>C. sinensis</i>	90	0,010 ...	0,010 ...	<b>0,037</b>	0,064 ...	0,103 ...	71,7
<i>O. europaea</i>	75	0,012 ...	0,021 ...	<b>0,042</b>	0,062 ...	0,096 ...	49,0
<i>P. amygdalus</i>	60	0,029 ...	0,020 ...	<b>0,046</b>	0,065 ...	0,091 ...	38,6

Según la tabla 65 el mayor volumen de copa es en almendros con  $0,046 m^3/\text{árbol}$ , olivos  $0,042 m^3/\text{árbol}$ , y naranjos de  $0,037 m^3/\text{árbol}$ . El CV nos indica que la variabilidad volumétrica de copa es distinta según especie, en naranjos de 71,7%, el más alto, debido principalmente a la variabilidad propia de la especie, y a que se han mensurado individuos de distintas edades y en distintas zonas representativas del cultivo de la Comunidad Valenciana, en olivos y almendros sólo hubo variación en edades, ya que fueron muestreados todos los individuos

en la misma zona, por lo que el CV mejoró y es de 49,0%, y 38,6% respectivamente.

Además de la posible obtención de madera, otra gran importancia de estimación del volumen de copa se debe a que la copa influye sobre la producción primaria (frutos), porque sus dimensiones reflejan el vigor del árbol (Schomaker *et al.*, 1999). Varios investigadores mencionan la importancia de conocer sus características y con ellas predecir la respuesta en crecimiento, producción de fruta, residuos en la poda, entre otras variables (Doruska y Burkhart, 1994 y Brunner, 1998).

En la tabla 66 se han sumado los valores totales obtenidos de volumen de fuste y de copa, obteniendo la biomasa total contenida en estos frutales.

**Tabla 66.** Biomasa aérea total contenida en las especies frutales estudiadas ( $m^3/\text{árbol}$ )

Especie	N	Vol fuste	Vol. copa	Vol. total
<i>C. sinensis</i>	90	0,006	0,037	<b>0,043</b>
<i>O. europaea</i>	75	0,034	0,042	<b>0,076</b>
<i>P. amygdalus</i>	60	0,031	0,046	<b>0,077</b>

De la tabla 66 se desprende que olivos y almendros son los que aportan la mayor cantidad de biomasa con 0,076 y 0,077  $m^3/\text{árbol}$ , lo que es esperable, ya que se tratan de individuos de mayor envergadura, finalmente está naranjos con 0,043  $m^3/\text{árbol}$ . Por lo que, conociendo la densidad de plantación podremos estimar la biomasa en una hectárea cultivada.

h) *Relación del volumen del fuste y volumen de copa*

Para la predicción del volumen de los árboles, puede emplearse la relación entre la cantidad de tejido fotosintético y la producción de tejido no fotosintético (Waring 1983). En este sentido algunos modelos estiman el volumen del fuste de un árbol, a través de la cuantificación de su copa (Vanclay 1994). Sin embargo, a continuación se ha realizado el proceso inverso, obteniéndose el volumen real de la copa a partir del volumen ya cuantificado del fuste.

**Tabla 67.** Análisis de regresión para un modelo de volumen de copa con respecto al volumen del fuste

Especie	Ecuación ( $m^3$ )	$R^2$
<i>C. sinensis</i>	$V_c = 0,0047 - (13,298 V_f^2) + (5,1103 V_f)$	0,759***
<i>O. europaea</i>	$\ln(V_c) = (0,59865 \ln(V_f))$	0,731***
<i>P. amygdalus</i>	$V_c = 0,0017 - (1,0785 V_f^2) + (0,0681 V_f)$	0,733***

Donde,  $V_c$  es volumen real ( $m^3$ ) y  $V_f$  es volumen del fuste ( $m^3$ ).

Estas funciones, en que el menor  $R^2$  ( $\alpha=0,01$ ) es en olivos de 0,731 (naranjos 0,759 y almendros 0,733), son aceptables para su aplicación, por lo que la utilización de estos dependerá de la escala o nivel de certeza que desee trabajar. Sin embargo, que los  $R^2$  no sean más altos se le puede atribuir a que el volumen fustal de una misma especie frutal, en una misma plantación, es muy oscilante. Por esto, cuando la variable independiente a la que se encuentran sujetas estas funciones de ajustes es tan inconstante, no es posible garantizar una buena estimación, ya que se pueden encontrar individuos que no posean fuste o tengan uno muy

pequeño. Por esto, se pueden obtener buenos resultados, pero su uso tiene limitaciones.

#### 4.6 CUANTIFICACIÓN BIOMÁSICA Y ENERGÉTICA

Para determinar las ecuaciones se determinó previamente la densidad básica de la madera obteniéndose posteriormente la biomasa promedio por fuste, ramas podadas y copa, y biomasa aérea total para cada especie. Además, el contenido de biomasa (en kg/arb y t/ha) se determinó en materia seca con 0% de humedad.

Las ecuaciones ajustadas a continuación son derivadas de las obtenidas anteriormente en el cálculo del volumen tanto para fuste como para ramas, por lo tanto, poseen el mismo  $R^2$ .

Todos los cálculos de este capítulo se basan en el DAP, por ende no se tomó en cuenta la biomasa contenida en ramas y hojas. Las ecuaciones presentadas a continuación derivan de la obtenida en la tabla 52, por lo que presentan el mismo  $R^2$ .

##### 4.6.1 Especie forestal mediterránea

###### *a) Determinación del peso por árbol y toneladas por hectárea*

En esta especie sólo hemos ajustado ecuaciones para el potencial energético de la biomasa leñosa del fuste, sin considerar la biomasa leñosa contenida en las ramas que se dejan en el monte para evitar una exportación importante de nutrientes (Pinchot Institute 2010). El material de la copa es normalmente astillado in situ y distribuido por todo el rodal con el fin de prevenir contra los incendios forestales (PNW 2010).

Para determinar la siguiente ecuación teniendo por variable el DAP se determinó previamente la densidad básica de la madera ( $\text{g/cm}^3$ ) que fue de  $0,732 \text{ (g/cm}^3\text{)}$  obteniéndose posteriormente la biomasa por árbol.

Conociendo la densidad promedio del rodal, siendo esta de  $3.200 \text{ arb./ha}$ , se obtuvo la siguiente ecuación que determina la biomasa contenida en una hectárea .

$$t/\text{ha} = 1,1712 \text{ DAP}^2 - 11,2435 \text{ DAP} + 52,9382$$

Ambas ecuaciones resultan ser recomendable para su aplicación en bosques puros de encina en condiciones de sitio similares a las encontradas en el estudio. Hay que destacar que los valores presentados a continuación corresponden sólo al fuste del árbol. Según Gayoso *et al.* (2002) el promedio de madera y corteza en frondosas duras como la encina es de más de 82% del total de la biomasa del árbol.

A continuación, y en base a las ecuaciones anteriormente ajustadas, se dividió en árboles con DAP menores a 10 cm e iguales y mayores a 10 cm, lo que da una idea más detallada de la biomasa contenida por árbol o por hectárea en bosques puros de encina.

**Tabla 68.** Resumen de la biomasa contenida (kg y t) en bosques de *Quercus ilex*

DAP (cm)	Volumen ( $\text{m}^3/\text{árbol}$ )	Biomasa (kg/ árbol)	Densidad (árbol/ha)	Biomasa total (t/ha)
< 10,0	0,021	15,2	3.200	48,6
$\geq 10,0$	0,060	43,9	3.200	140,4
<b>Total</b>	<b>0,045</b>	<b>30,2</b>		<b>96,5</b>

Incluyendo todos los individuos muestreados, el DAP medio es de 11,9 cm y el volumen promedio es de 0,045 m<sup>3</sup>/árbol, por lo que la biomasa promedio por árbol es de 30,2 kg y por superficie es de 96,5 t/ha.

Se realizó el t-test, para comparar las medias del contenido de biomasa en kilos y en t/ha para árboles de DAP menor a 10,0 cm e iguales y mayores a 10,0 cm. En ambos casos resultó que existen diferencias estadísticamente significativas entre sus medias para un nivel de confianza del 95,0 %. Estos resultados pueden constituir la base para un plan de gestión para el aprovechamiento de la biomasa en esta especie.

Para DAP promedios de 10,0 cm en encina, Susmel *et al.* (1976) obtiene 44 kg/árbol, Ferrés *et al.* (1980) 42 kg/árbol, Canadell *et al.* (1988) 36 kg/árbol y por último, Pérez y Esteban (2004) con un DAP promedio de 11,3 cm obtuvo 31,4 kg/árbol. Estos valores, si bien tienden a ser muy variados en DAP, son bastante cercanos al promedio obtenido para este estudio (30,2 kg).

En promedio encina contiene un total de 96,5 t/ha de biomasa, teniendo los árboles menores a 10 cm 48,6 t/ha y los mayores a 10 cm 140,4 t/ha.

#### *b) Determinación del potencial energético por árbol y superficie*

Una vez determinado el contenido de biomasa es posible obtener la cantidad de MJ o GJ por árbol o por hectárea. Para ello, un valor medio de poder calorífico inferior (PCI o LHV) de 17,0 MJ/kg o 17,0 GJ/t fue utilizado para la biomasa del fuste de encina. Este valor se determinó en el laboratorio con el material obtenido

de los árboles muestreados. Este valor se ajustó a la siguiente ecuación para calcular el LHV por árbol:

$$\text{MJ/árbol} = 6,222 \text{ DAP}^2 - 59,7312 \text{ DAP} + 281,2344$$

Para determinar los GJ por hectárea y teniendo en cuenta la densidad de población media de 3.200 árboles/ha, se ha definido la ecuación siguiente:

$$\text{GJ/ha} = 19,910 \text{ DAP}^2 - 191,139 \text{ DAP} + 899,950$$

Ambas ecuaciones resultan recomendables para su aplicación en bosques puros de encina en condiciones de sitio similares a las encontradas en el estudio.

Una vez determinado el contenido de biomasa es posible obtener la cantidad de MJ o GJ por árbol o por hectárea. Para ello, las ecuaciones resultantes para la predicción del LHV por árbol y por hectárea resultan ser convenientes para su aplicación en pequeños rodales puros de encina con regeneración natural y en condiciones del sitio similares a las encontradas en este estudio.

A continuación, y en base a las ecuaciones anteriormente ajustadas, se dividió en árboles con DAP menores a 10 cm e iguales y mayores a 10 cm, lo que da una idea más detallada del potencial energético de la biomasa contenida por árbol o por hectárea en bosques puros de encina, tanto para pies menores como para pies mayores.

**Tabla 69.** Resumen del potencial energético, por árbol y por superficie, en bosques puros de *Quercus Ilex*

DAP (cm)	Biomasa (kg/árbol)	Biomasa (t/ha)	Pot. energético (MJ/árbol)	Pot. energético (GJ/ha)
< 10,0	15,2	48,6	258	825,5
≥ 10,0	43,9	140,4	746	2.387
<b>Total</b>			<b>513</b>	<b>1.801,5</b>

Incluyendo todos los individuos muestreados, el potencial energético promedio obtenido en este estudio es de 513 MJ/árbol y de 1.801,5 GJ/ha. Sin embargo, el potencial energético obtenido por hectárea no es realmente el aprovechable, ya que el sistema de extracción de biomasa, por lo general, corresponde al de entresaca y no de tala rasa, por lo que la cantidad de GJ/ha aprovechable dependerá del porcentaje de extracción de biomasa determinado en del plan de gestión forestal correspondiente. La literatura relativa a los resultados obtenidos en la tabla 69 es muy escasa o nula, por lo que no es posible contrastar los resultados obtenidos en este estudio con respecto a encina.

Se realizó el t-test, para comparar las medias del potencial energético contenido por árbol (MJ/árbol) y por superficie (GJ/ha) para árboles de DAP menor a 10 cm e iguales y mayores a 10 cm. En ambos casos resultó que existen diferencias estadísticamente significativas entre sus medias para un nivel de confianza del 95,0 %.

Como referencia general, para establecer una comparación, Torres-Álvarez y Peña Cortés (2011) encontraron 102,5 GJ/ha para el tipo de bosque de frondosas Coigüe-Raulí-Tepa (*Nothofagus dombeyi*, *Nothofagus alpina* y *Laureliopsis philippiana*) bajo condiciones de clima templado mediterráneo de Chile. Sin

embargo, este valor es menor que el obtenido en encina, ya que corresponde sólo a la biomasa forestal residual en base húmeda.

#### 4.6.2 Cultivo energético leñoso

##### a) Determinación del peso por árbol y toneladas por hectárea

Los cálculos de este capítulo se basan en el DAC para los árboles de la zona interior que poseen 6 meses de edad desde su establecimiento y en el DAP para los de la zona costera que poseen 12 meses de edad desde su establecimiento, no tomándose en cuenta la biomasa contenida en ramas y hojas. Las ecuaciones presentadas a continuación derivan de la obtenida en la determinación del volumen para esta especie (tabla 57), por lo que presentan el mismo  $R^2$ .

Para determinar la siguiente ecuación se determinó previamente la densidad básica de la madera ( $\text{g/cm}^3$ ) que fue de  $0,297 \text{ (g/cm}^3\text{)}$  obteniéndose posteriormente la biomasa por árbol.

**Tabla 70.** Ecuaciones para la determinación de biomasa por árbol en la zona interior y la costa para *Paulownia spp.*

Zona Geográfica	Ecuación de biomasa fustal (kg/árbol)
zona interior	$\text{kg/árbol} = 0,297 \text{ DAC}^2 - 0,9504 \text{ DAC} + 0,5346$
zona costera 1	$\text{kg/árbol} = 1,2771 \text{ DAP}^2 - 25,0371 \text{ DAP} + 132,5511$
zona costera 2	$\text{kg/árbol} = 0,2376 \text{ DAP}^2 - 1,5444 \text{ DAP} + 3,3561$

Para determinar las ecuaciones de la siguiente tabla se determinó previamente la densidad promedio del rodal, siendo esta en la zona interior de  $1890,4 \text{ arb./ha}$  y

en la zona costera 1 de 1196,2 arb/ha y en la zona costera 1 de 784,9 arb/ha obteniéndose posteriormente la biomasa por hectárea (t/ha).

**Tabla 71.** Ecuaciones para la determinación de biomasa por superficie en la zona interior y la costa para *Paulownia spp.*

Zona Geográfica	Ecuación de biomasa fustal (t/ha)
zona interior	$t/ha = 0,5614DAC^2 - 1,797 DAC + 1,011$
zona costera 1	$t/ha = 1,265 DAP^2 - 24,802 DAP + 131,305$
zona costera 2	$t/ha = 0,2354 DAP^2 - 1,53 DAP + 3,3248$

Por medio de estas ecuaciones, de las tablas 70 y 71, con sólo conocer el DAC y el DAP, según sea el caso, es posible conocer la biomasa contenida por árbol (kg/árbol) y por superficie (t/ha) de paulonia, resultando recomendables para su aplicación en condiciones de sitio similares a las encontradas en las zonas de estudio.

A continuación, y en base a las ecuaciones anteriormente ajustadas, divididas en zona interior y zona costera, se detallan los valores promedios obtenidos de la biomasa contenida por árbol (kg/árbol) y por hectárea (t/ha) en plantaciones de paulonia.

**Tabla 72.** Resumen de la biomasa contenida por árbol (kg/árbol) y superficie (t/ha) en *Paulownia spp.*

Zona Geográfica	Biomasa (kg/ árbol)	Densidad (árbol/ha)	Biomasa total (t/ha)
zona interior	1,8	1890,4	3,4
zona costera 1	11,7	1196,2	11,6
zona costera 2	19,5	784,9	15,0

Se realizó el t-test, para comparar las medias del contenido de biomasa en kilos y en t/ha para árboles de DAP menor a 10,0 cm e iguales y mayores a 10,0 cm, en ambos casos, resultó que existen diferencias estadísticamente significativas entre sus medias para un nivel de confianza del 95,0 %.

Según la tabla 72, en cuanto al contenido de biomasa por árbol, la zona interior presenta 1,8 kg/árbol, en tanto en la zona costera 1 y 2 tiende a variar, siendo de 11,7 kg/árbol y 19,5 kg/árbol respectivamente a 12 meses de edad. Es en estos valores donde realmente se pueden diferenciar los sitios más productivos, ya que al extrapolar a una superficie determinada, por ejemplo a la hectárea (t/ha), el contenido de biomasa queda supeditado a la densidad de plantación y no refleja las buenas o malas condiciones que presenta un sitio determinado para el cultivo de una especie. A pesar de esto no fue posible encontrar literatura con cifras al respecto en que se especifique esto según la edad de la plantación.

Con respecto a los resultados obtenidos por superficie en la zona interior el contenido de biomasa es de 3,4 t/ha, en la zona costera varía desde 11,6 t/ha a 15,0 t/ha, como se dijo anteriormente la cantidad es influida principalmente por la densidad de plantación y podría estar influida además, por la existencia o no de un sistema de riego entre otros factores que mejore la calidad de sitio. En literatura, no se han encontrado valores de contenido de biomasa para plantaciones de 6 o 12 meses. Sin embargo, en el estudio realizado por Martínez-García *et al.* (2010) el contenido de biomasa para una plantación de 17 meses, con diferentes densidades de plantación (1.111 arb/ha y 1.666 arb/ha), varió desde 2,6 t/ha a 6,1 t/ha.

*b) Determinación del potencial energético por árbol y superficie*

Una vez determinado el contenido de biomasa (en kg/arb y t/ha) es posible obtener la cantidad de MJ por árbol o por hectárea, para esto se determinó un PCI de 17,0 MJ/kg o 17,0 GJ/t en materia seca con 0% de humedad. Con este valor se ajustaron las ecuaciones de la siguiente tabla.

**Tabla 73.** Ecuaciones para la determinación de potencial energético fustal por árbol en la zona interior y la costa para *Paulownia spp.*

Zona Geográfica	Ecuación (MJ/árbol)
zona interior	$\text{MJ/árbol} = 4,8648 \text{ DAC}^2 - 15,5676 \text{ DAC} + 8,7568$
zona costera 1	$\text{MJ/árbol} = 20,919 \text{ DAP}^2 - 410,11 \text{ DAP} + 2.171,2$
zona costera 2	$\text{MJ/árbol} = 3,8919 \text{ DAP}^2 - 25,2973 \text{ DAP} + 54,9729$

Para determinar los GJ por hectárea basta multiplicar la ecuación anterior por la densidad promedio del rodal, siendo esta de 3.200 arb/ha.

**Tabla 74.** Ecuaciones para la determinación de potencial energético fustal por superficie en la zona interior y la costa para *Paulownia spp.*

Zona Geográfica	Ecuación de potencial energético fustal (GJ/ha)
zona interior	$\text{GJ/ha} = 9,1966 \text{ DAC}^2 - 29,429 \text{ DAC} + 16,5538$
zona costera 1	$\text{GJ/ha} = 20,722 \text{ DAP}^2 - 406,253 \text{ DAP} + 2.150,8$
zona costera 2	$\text{GJ/ha} = 3,8553 \text{ DAP}^2 - 25,0595 \text{ DAP} + 54,4562$

Estas ecuaciones resultan recomendables para su aplicación en este cultivo energético en condiciones de sitio similares a las encontradas en las zonas de estudio.

A continuación, y en base a las ecuaciones anteriormente ajustadas, se detallada el potencial energético de la biomasa contenida por árbol o por hectárea en paulonia para cada zona estudiada.

**Tabla 75.** Resumen del potencial energético, por árbol y por superficie, en bosques de *Paulownia spp.*

Zona Geográfica	Pot. energético (MJ/árbol)	Pot. energético (GJ/ha)
zona interior	39,4	55,6
zona costera 1	191,2	189,4
zona costera 2	247,6	245,3

Los valores obtenidos en la tabla 75, corresponden al promedio del material separado en fuste y ramas presentando un PCI de 16,06 MJ/Kg para el fuste y 16,70 MJ/Kg para ramas sin hojas, siendo el promedio de 16,38 MJ/Kg.

Como referencia general, incluyendo todos los individuos muestreados, el potencial energético promedio obtenido por árbol, en la zona interior es de 39,4 MJ/árbol y en la zona costera 1 es de 191,2 MJ/árbol y en la zona costera 2 es de 247,6 MJ/árbol.

Se realizó el t-test, para comparar las medias del potencial energético contenido entre zonas costeras 1 y 2 y zona interior con respecto a zona costera 1, en ambos casos, resultó que existen diferencias estadísticamente significativas entre sus medias para un nivel de confianza del 95,0 % este resultado también es válido para los valores obtenidos por zona para el potencial energético por superficie.

La información en literatura sobre el potencial energético de la biomasa de paulonia por árboles y/o por hectáreas es escasa o nula.

#### 4.6.3 Especies agrícolas leñosas

##### a) Determinación del peso por árbol y toneladas por hectárea

###### 1. Fuste:

En la siguiente tabla se muestran las ecuaciones ajustadas para cada especie frutal en lo que respecta al fuste.

**Tabla 76.** Ecuaciones para la determinación de biomasa por árbol en frutales

Espece	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Ecuación de biomasa fustal (kg/árbol)
<i>C. sinensis</i>	0,616	kg/árbol = -6,5296 + 0,8624 D <sub>fm</sub>
<i>O. europaea</i>	0,654	kg/árbol = - 15,9147 + 1,4623 D <sub>fm</sub>
<i>P. amygdalus</i>	0,668	kg/árbol = 0,0448 D <sub>fm</sub> <sup>2</sup> - 0,9399 D <sub>fm</sub> + 18,708

Para determinar la biomasa por hectárea se determinó previamente la densidad de plantación que corresponde a un valor promedio obtenido de los diferentes marcos de plantación tradicionales, siendo en naranjos los más habituales de 6x4m, 7x3m y 7x4m, en olivos fueron de 7x8m y 8x9m, y en almendros de 7,5x6m

**Tabla 77.** Ecuaciones para la determinación de biomasa por hectárea en frutales

Especie	Densidad	Ecuación de biomasa fustal
	plantación (arb/ha)	(t/ha)
<i>C. sinensis</i>	417	$t_i/\text{ha} = -2,7228 + 0,3596 D_{fm}$
<i>O. europaea</i>	159	$t_i/\text{ha} = -2,5304 + 0,2325 D_{fm}$
<i>P. amygdalus</i>	222	$t_i/\text{ha} = 0,0099 D_{fm}^2 - 0,2087 D_{fm} + 4,15$

Por medio de estas ecuaciones (tablas 76 y 77), con sólo determinar el  $D_{fm}$  es posible conocer la biomasa contenida en el fuste (en kg/fuste y t/ha) de cada especie frutal, resultando recomendables para su aplicación en condiciones de sitio similares a las encontradas en las zonas de estudio.

A continuación, y en base a las ecuaciones anteriormente ajustadas se detallan los valores promedios obtenidos por especie frutal de la biomasa contenida en su fuste en peso (kg/fuste) y por hectárea (t/ha).

**Tabla 78.** Resumen de la biomasa contenida en el fuste (kg/árbol y t/ha) en frutales

Especies	Volumen real	Biomasa del fuste	Biomasa del fuste
	( $\text{m}^3/\text{fuste}$ )	(kg/árbol)	(t/ha)
<i>C. sinensis</i>	0,006	6,3	2,6
<i>O. europaea</i>	0,034	22,2	3,5
<i>P. amygdalus</i>	0,031	20,7	4,6

Según la tabla 78, claramente naranjos es la especie que menos biomasa fustal aporta con 6,3 kg/fuste y 2,6 t/ha, olivos y almendros, poseen una biomasa fustal similar con 22,2 kg/fuste y 20,7 kg/fuste respectivamente. Sin embargo, la diferencia radica en el aporte de biomasa fustal a nivel de hectárea, siendo de 3,5

t/ha para el primero y 4,6 t/ha para el segundo, esta diferencia se debe a la mayor densidad de plantación de almendros (tabla 77), por lo tanto, posee un mayor contenido de biomasa fustal por hectárea.

No se ha encontrado literatura específica en biomasa de fustes para frutales, por lo que los valores obtenidos en este estudio no han podido ser contrastados.

## 2. Ramas podadas y copa

Se ajustó una ecuación que determina el peso en kg y en t/ha para una rama en cada especie. Por esto, es necesario conocer el número promedio de ramas podadas por árbol y el número total de ramas contenida en la copa, para así tener una estimación final de la biomasa extraída en la poda y la biomasa total contenida en la copa respectivamente, tanto en kg/árbol como en t/ha.

**Tabla 79.** Ecuaciones para la determinación de biomasa de podas y total en copa por árbol en frutales

Especie	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Ecuación de biomasa por rama (kg)
<i>C. sinensis</i>	0,616	Kg/árbol= (-0,014 + 0,004 D <sub>0</sub> <sup>2</sup> L) N
<i>O. europaea</i>	0,654	Kg/árbol= (0,4777 + 0,00012 D <sub>0</sub> <sup>2</sup> L) N
<i>P. amygdalus</i>	0,668	Kg/árbol= (0,0737 + 0,00046 D <sub>0</sub> <sup>2</sup> L) N

Donde D<sub>0</sub> corresponde al diámetro referencial obtenido de la base de la rama (cm); L es la longitud total de la rama (cm) y N es el número promedio de ramas, ya sea de ramas podadas por árbol o ramas contenidas en la copa del árbol, según sea el requerimiento.

**Tabla 80.** Ecuaciones para la determinación de biomasa de podas y total en copa por hectárea en frutales

Especie	Densidad (arb/ha)	Ecuación de biomasa por rama (t/ha)
<i>C.sinensis</i>	417	$t/ha = (-0,059 + 0,00017 D_0^2 L) N$
<i>O. europaea</i>	159	$t/ha = (0,07596 + 0,00002 D_0^2 L) N$
<i>P. amygdalus</i>	222	$t/ha = (0,01635 + 0,0001 D_0^2 L) N$

Donde  $D_0$  corresponde al diámetro referencial obtenido de la base de la rama (cm); L es la longitud total de la rama (cm) y N es el número promedio de ramas, permitiendo determinar la biomasa extraída de la poda o la biomasa total contenida en la copa por hectárea.

Por medio de las ecuaciones de las tablas 79 y 80, con sólo determinar el  $D_0$  y L es posible conocer la biomasa contenida en una rama promedio de cada especie frutal, resultando recomendables para su aplicación en condiciones de sitio similares a las encontradas en las zonas de estudio.

A continuación, en base a las ecuaciones anteriores y realizando una propuesta del número promedio de ramas podadas por árbol y el número promedio real de ramas contabilizadas de la copa en campo (ramas  $\geq 1,0$  cm de  $D_0$ ) se obtienen los valores promedios de la biomasa contenida en peso (kg/árbol) y por hectárea (t/ha) tanto la biomasa extraída en la poda como la existente en toda la copa.

**Tabla 81.** Resumen de la biomasa extraída en la poda (kg/árbol y t/ha) en frutales

<b>Especies</b>	<b>Ramas podadas por árbol</b>	<b>Biomasa podada (kg/árbol)</b>	<b>Biomasa podada (t/ha)</b>
<i>C. sinensis</i>	15	2,6	1,1
<i>O. europaea</i>	10	7,0	1,1
<i>P. amygdalus</i>	10	6,2	1,4

Si bien en este estudio para naranjos se obtienen 2,6 kg/árbol de la biomasa extraída en la poda, Fernández (2009) obtiene un promedio 5,3 kg/árbol. En olivos se obtienen 7,0 kg/árbol mientras que el COI (2007) obtiene entre 10 a 13 kg/árbol, eso sí, al 50% de humedad. En almendros se obtienen 6,2 kg/árbol y según Fernández (2009b) la biomasa extraída en promedio se sitúa en 8,2 kg/árbol.

Con respecto a t/ha, en naranjos se obtuvo 1,1 t/ha muy similar a lo obtenido por Di Blasi *et al.* (1997) con 1,8 t/ha, a diferencia de Voivontas *et al.* (2001) quien obtuvo 7,4 t/ha, Fontanet (2009) obtuvo valores de 3,5 a 4,0 t/ha, Ferrer *et al.* (2004) 3,5 t/ha y Fernández (2009b) un promedio de 3,1 t/ha. Al igual que en naranjos para olivos se obtuvo 1,1 t/ha cifra afín con la señalada por Di Blasi *et al.* (1997) y Jiménez *et al.* (1990) quienes obtienen 1,7 t/ha, sin embargo, Sánchez *et al.* (2002), obtiene 3,0 t/ha y Voivontas *et al.* (2001) 2,8 t/ha. En almendros se obtuvo 1,4 t/ha, nuevamente Di Blasi *et al.* (1997) obtiene un valor muy similar con 1,7 t/ha al igual que Fernández (2009b) quién obtiene 1,3 t/ha, aunque Voivontas *et al.* (2001) obtiene un valor muy superior con 6,2 t/ha.

Las cifras de t/ha obtenidas de la biomasa extraída de la poda de naranjos con respecto a olivos y almendros son muy similares, a pesar de que naranjos obtiene

menos de la mitad del peso de olivos y almendros, lo que se debe principalmente a la mayor densidad de plantación por hectárea que en las otras dos especies.

Si bien, las cifras entregadas varía entre los estudios de referencia, existen algunos autores que obtienen valores similares y otros que distan mucho con respecto al contenido de biomasa extraída de la poda que se ha calculado en este estudio, por lo que se debe tener en cuenta que, antes de comparar resultados, que en general estos autores no especifican, entre otras cosas, si el follaje está incluido en el peso, a diferencia de este estudio que no lo incluye y que sólo toma ramas lignificadas mayores a 1 cm de  $D_0$ .

De todas maneras, la diferencia obtenida en los resultados entre estudios puede estar justificada, lo que obedecerá a las características de cada cultivo frutal.

**Tabla 82.** Resumen de la biomasa de la copa (kg/árbol y t/ha) en frutales

<b>Especie</b>	<b>Promedio ramas en copa</b>	<b>Biomasa de copa (kg/árbol)</b>	<b>Biomasa de copa (t/ha)</b>
<i>C. sinensis</i>	93	22,6	9,4
<i>O. europaea</i>	60	27,2	4,3
<i>P. amygdalus</i>	49	30,6	6,8

A pesar de que los almendros poseen la menor cantidad de ramas promedio (49) es el que contiene la mayor cantidad de biomasa en su copa con 30,6 kg/árbol, esto se debe a que en promedio las parcelas muestreadas contienen árboles de mayores dimensiones de ramas que las parcelas muestreadas de olivos y naranjos (en ese orden), ya que los naranjos con el mayor promedio de ramas por árbol (93) sólo contienen 22,6 kg/árbol y olivos con un promedio de 60 ramas por árbol contiene 27,2 kg/árbol.

Sin embargo, no ocurre lo mismo al hablar en toneladas por hectárea, ya que aquí los naranjos son los que poseen la mayor cantidad de biomasa con 9,4 t/ha, seguida por almendros con 6,8 t/ha y finalmente olivos con 4,3 t/ha. Esto se debe principalmente a la mayor densidad de plantación de naranjos, le sigue almendros y por último olivos.

Estos valores no han podido ser corroborados con otros autores, ya que no se logrado encontrar literatura que estudie la biomasa completa de la copa de estas especies frutales.

### 3. Árbol completo

A continuación se obtiene la biomasa total contenida tanto en un árbol (fuste y copa) como por hectárea para cada especie.

**Tabla 83.** Resumen de la biomasa total en frutales (kg/árbol y t/ha)

<b>Especie</b>	<b>Biomasa total (kg/árbol)</b>	<b>Biomasa total (t/ha)</b>
<i>C. sinensis</i>	28,9	12,0
<i>O. europaea</i>	49,4	7,8
<i>P. amygdalus</i>	51,3	11,4

Según la tabla 83, la mayor cantidad de biomasa total contenida corresponde a almendro con 51,3 kg/árbol, le sigue olivos con 49,4 kg/árbol y finalmente naranjos con 28,9 kg/árbol, lo que es reflejo directo de las dimensiones de los árboles que contenían las parcelas muestreadas en cada especie.

Si bien varios autores, como Perpiña *et al.* (2009) y Fernández (2009) han desarrollado ecuaciones que estiman la biomasa en frutales, estas se limitan sólo a la biomasa extraída en actividades de poda, por lo que las ecuaciones desarrolladas en este estudio que contemplan la biomasa del fuste, de ramas podadas, y de la copa resultan ser inéditas y tienen por fin, además de estimar la biomasa de las actividades de poda, cuantificar la biomasa total del árbol de arranque, ya sea por individuo y/o por hectárea. Asimismo, las variables utilizadas en la estimación de las ecuaciones de este estudio son sólo dos, el diámetro y la longitud, que son de fácil y rápida recopilación en campo.

##### *b) Determinación del potencial energético por árbol y superficie*

Una vez determinado el contenido de biomasa (en kg/arb y t/ha) es posible obtener la cantidad de MJ por árbol o por hectárea, para esto se determinó el PCI en materia seca con 0% de humedad para el material denominado anteriormente mezcla (madera y corteza).

Las ecuaciones ajustadas a continuación son derivadas de las obtenidas anteriormente en el cálculo del volumen tanto para fuste como para ramas, por lo tanto, poseen el mismo  $R^2$ .

##### 1. Fuste

En la siguiente tabla se muestran, en lo que respecta al fuste, las ecuaciones ajustadas del potencial energético fustal para cada especie frutal:

**Tabla 84.** Ecuaciones del potencial energético por fuste en cada especie frutal

<b>Especies</b>	<b>PCI (MJ/kg)</b>	<b>Ecuación de potencial energético fustal (MJ/fuste)</b>
<i>C. sinensis</i>	15,06	$\text{MJ/fuste} = -93,1774 + 12,3064 D_f$
<i>O. europaea</i>	16,09	$\text{MJ/fuste} = -210,2332 + 19,3176 D_f$
<i>P. amygdalus</i>	17,21	$\text{MJ/fuste} = 0,7479 D_f^2 - 15,7053 D_f + 312,6$

Para determinar los MJ por hectárea basta multiplicar la ecuación anterior por la densidad promedio de árboles por hectárea.

**Tabla 85.** Ecuaciones del potencial energético por hectárea en cada especie frutal

<b>Especies</b>	<b>PCI (MJ/kg)</b>	<b>Ecuación de potencial energético fustal (GJ/ha)</b>
<i>C. sinensis</i>	15,06	$\text{GJ/ha} = -38,855 + 5,131 D_f$
<i>O. europaea</i>	16,09	$\text{GJ/ha} = -33,427 + 3,071 D_f$
<i>P. amygdalus</i>	17,21	$\text{GJ/ha} = 0,166 D_f^2 - 3,487 D_f + 69,4$

Todas las ecuaciones resultan recomendables para su aplicación en estas plantaciones frutales en condiciones de sitio similares a las encontradas en las zonas de estudio.

A continuación, y en base a las ecuaciones anteriormente ajustadas, se detallada el potencial energético de la biomasa contenida por árbol o por hectárea para cada especie frutal.

**Tabla 86.** Resumen del potencial energético del fuste, por árbol y por superficie, en frutales

<b>Especies</b>	<b>PCI<sup>1</sup> (MJ/kg)</b>	<b>Pot. energético (MJ/fuste/árbol)</b>	<b>Pot. energético (GJ/fuste/ha)</b>
<i>C. sinensis</i>	15,06	90,2	37,608
<i>O. europaea</i>	16,09	293,7	46,704
<i>P. amygdalus</i>	17,21	346,0	76,818

Si bien el potencial energético del fuste es muy distinto entre las especies, especialmente en naranjos (90,2 MJ/fuste) con respecto a olivos (293,7 MJ/fuste) y almendros (346,0 MJ/fuste), esta variación se debe a dos factores determinantes como un menor PCI de naranjos y a las menores dimensiones o cantidad de biomasa contenida en los fustes de naranjos con respecto a olivos y almendros. Sin embargo, esta diferencia se ve bruscamente acortada cuando hablamos del potencial energético por hectárea, ya que la mayor densidad de plantación de naranjos compensa sus menores dimensiones fustales en comparación a las otras dos especies, obteniendo naranjos 37.608,7 MJ/fuste/ha, olivos 46.704,3 MJ/fuste/ha y almendros 76.818,8 MJ/fuste/ha.

Estos resultados no han logrado ser comparados, ya que la información al respecto en literatura es escasa o nula.

## 2. Ramas de poda y copa

En la siguiente tabla se muestran las ecuaciones ajustadas del potencial energético por rama para cada especie frutal con el fin de así determinar el

potencial energético de la biomasa extraída en la poda (MJ/poda) y cuantificar el potencial energético por hectárea en cada especie frutal (GJ/poda/ha).

**Tabla 87.** Ecuaciones para la determinación del potencial energético en ramas podadas y total de copa por árbol

Especie	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Ecuación por rama (MJ/árbol)
<i>C. sinensis</i>	0,616	MJ/árbol= (-0,211 + 0,006 D <sup>3</sup> L) N
<i>O. europaea</i>	0,654	MJ/árbol= (7,684 + 0,0019 D <sup>3</sup> L) N
<i>P. amygdalus</i>	0,668	MJ/árbol= (1,26775 + 0,008 D <sup>3</sup> L) N

Para determinar los MJ por hectárea basta multiplicar la ecuación anterior por la densidad promedio de árboles por hectárea.

**Tabla 88.** Ecuaciones para la determinación el potencial energético en ramas podadas y total de copa por hectárea

Especie	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Ecuación de pot. energético en podas (MJ/ha)
<i>C. sinensis</i>	0,616	MJ/ha= (-88,1 + 2,5146 D <sup>3</sup> L) N
<i>O. europaea</i>	0,654	MJ/ha= (1.222+ 0,3068 D <sup>3</sup> L) N
<i>P. amygdalus</i>	0,668	MJ/ha= (281,44+ 1,1755 D <sup>3</sup> L) N

Todas las ecuaciones resultan recomendables para su aplicación en estas plantaciones frutales en condiciones de sitio similares a las encontradas en las zonas de estudio.

A continuación, y en base a las ecuaciones anteriormente ajustadas, se detallada el potencial energético de la biomasa contenida por árbol o por hectárea para cada especie frutal estudiada según la propuesta de ramas podadas especificada anteriormente y el promedio de ramas total contenido en la copa por especie respectivamente.

**Tabla 89.** Resumen del potencial energético de la poda, por árbol y por superficie

<b>Especies</b>	<b>Biomasa (kg/árbol)</b>	<b>Biomasa (t/ha)</b>	<b>Pot. energético (MJ/poda/árbol)</b>	<b>Pot. energético (GJ/poda/ha)</b>
<i>C. sinensis</i>	2,6	1,1	39,2	16,359
<i>O. europaea</i>	7,0	1,1	112,0	17,808
<i>P. amygdalus</i>	6,2	1,4	107,5	23,870

Si bien el potencial energético obtenido de la poda por árbol es muy distinto entre las especies, especialmente en naranjos (39,2 MJ/ poda) con respecto a almendros (107,5 MJ/ poda) y olivos (112,0 MJ/ poda), teniendo estos últimos valores similares. Esta variación en naranjos se debe a dos factores determinantes como un menor PCI de éste y menores dimensiones en ramas con respecto a olivos y almendros. Sin embargo, esta diferencia prácticamente desaparece entre naranjos y olivos cuando hablamos del potencial energético por hectárea, ya que la mayor densidad de plantación de naranjos compensa las menores dimensiones de ramas podadas en comparación a olivos que además posee la más baja de las densidades de plantación de las tres especies. Si bien almendros y olivos poseen similares dimensiones de ramas, el mayor potencial energético por superficie de almendros, se debe, en primer lugar, a que este último posee un PCI superior y, en segundo lugar, a que su densidad de plantación es ligeramente mayor con respecto a olivos. Obteniendo naranjos 16,359 GJ/poda/ha, olivos 17,808 GJ/poda/ha y almendros 23,870 GJ/poda/ha.

Estos resultados no han logrado ser comparados con otros estudios sobre potencial energéticos en frutales, ya que la información al respecto en literatura es escasa o nula, por esto, al tratarse de biomasa total, tanto por árbol como por hectárea, se revisó literatura al respecto en especies forestales para establecer en qué situación se encuentra el potencial energético de estas especies frutales frente a ese escenario.

Por ejemplo, Pérez-Cruzado *et al.* (2009) señala que en biomasa residual forestal en España *Eucalyptus spp.* posee 64,979 GJ/ha/año, *Fagus sylvatica* 27,355 GJ/ha/año, *Quercus robur* 27,791 GJ/ha/año y *Pinus radiata* 47,353 GJ/ha/año que comparada con la biomasa residual agrícola (poda) obtenida anualmente en los frutales estudiados se obtienen para naranjos 8,180 GJ/ha/año, olivos 8,904 GJ/ha/año y almendros 11,935 GJ/ha/año.

Si bien los frutales poseen un menor potencial energético total por hectárea con respecto a las especies forestales antes mencionadas, no se puede olvidar que las densidades de arb/ha de los primeros son menores que las que se pueden encontrar en plantaciones forestales o en bosques naturales.

Una vez conocida el número promedio de ramas podadas por árbol y el número total de ramas contenida en la copa, para así tener una estimación final de la biomasa extraída en la poda y la biomasa total contenida en la copa respectivamente, tanto en kg/árbol como en t/ha.

**Tabla 90.** Resumen del potencial energético de la copa, por árbol y por superficie

<b>Especies</b>	<b>Biomasa (kg/árbol)</b>	<b>Biomasa (t/ha)</b>	<b>Pot. energético (MJ/copa/árbol)</b>	<b>Pot.energético (GJ/copa/ha)</b>
<i>C. sinensis</i>	22,6	9,4	340,4	141,928
<i>O. europaea</i>	27,2	4,3	437,6	69,586
<i>P. amygdalus</i>	30,6	6,8	526,6	116,911

Si bien el potencial energético contenido en toda la copa por árbol es moderadamente similar entre las especies, siendo en naranjos (340,4 MJ/fuste), olivos (437,6 MJ/fuste) y almendros (526,6 MJ/fuste), esta mediana equiparación de valores se debe a que las especies que poseen un menor PCI, principalmente naranjos, suplen esta falencia con un mayor número de ramas por árbol, lo que sólo es una coincidencia y lógicamente no se puede atribuir a ninguna variable. Sin embargo, esta diferencia se acrecienta cuando hablamos del potencial energético por hectárea, ya que la mayor densidad de plantación de cada especie juega un rol muy importante en la estimación final del potencial energético por hectárea en cada especie, obteniendo naranjos 141,928 GJ/copa/ha, olivos 69,586 GJ/copa/ha y almendros 116,911 GJ/copa/ha.

### 3. Árbol completo

A continuación se obtiene el potencial energético total contenido tanto en un árbol (fuste y copa) como por hectárea para cada especie. La siguiente tabla entrega los valores potenciales finales que se pueden obtener energéticamente de la biomasa en estos frutales con 0% de humedad.

**Tabla 91.** Resumen de la biomasa total en frutales (kg/árbol y t/ha)

Especie	Pot. energético	Pot. energético
	Total (MJ/árbol)	Total (GJ/ha)
<i>C. sinensis</i>	430,6	179,537
<i>O. europaea</i>	731,3	116,290
<i>P. amygdalus</i>	872,6	193,729

La tabla 91 muestra que naranjos (430,6 MJ/árbol) ronda la mitad del potencial energético de olivos (731,3 MJ/árbol) y almendros (872,6 MJ/árbol) teniendo estos dos últimos valores muy similares. Sin embargo, cuando se trata de superficie los valores cambian y olivos es el que menor potencial energético posee (116,290 GJ/ha), con respecto a naranjos (179,537 GJ/ha) y almendros (193,729 GJ/ha), esto se debe únicamente a la densidad de plantación de las parcelas muestreadas, ahora almendros pese a tener una densidad de plantación menor que naranjos, las dimensiones de los árboles muestreados y su elevado PCI hacen que sea la especie frutal estudiada con mayor potencial energético por hectárea.

Estos resultados no han logrado ser comparados, ya que la información al respecto en literatura es escasa o nula.

#### 4.7 ANÁLISIS CUALITATIVO DEL MATERIAL

A continuación se confeccionaron dos tablas resúmenes para determinar el cumplimiento de los requisitos cualitativos en la producción de tableros de partículas y en pellets, en base a los resultados obtenidos previamente de los distintos análisis realizados durante el desarrollo de esta investigación.

##### 4.7.1 Cumplimiento de requisitos cualitativos para tableros de partículas

**Tabla 92.** Resumen de cumplimiento de requerimientos para la producción de tableros de partículas según normas.

Propiedades del análisis	Unid.	Parámetros Técnicos	Cumplimiento normas				
			<i>C.s.</i>	<i>O.e.</i>	<i>P.a.</i>	<i>P. spp.</i>	<i>Q.i.</i>
<b>Características morfológicas</b>							
Madera	(%)	$\geq 60^1$	✓	✓	✓	✓	✓
Corteza	(%)	$\leq 40^1$	✓	✓	✓	✓	✓
<b>Propiedades físicas</b>							
Humedad	(%)	$\leq 10$	-	-	-	-	-
Densidad	Kg/m <sup>3</sup>	$600 \leq Q \leq 800^{2,3,4}$	✓	✓	✓	✗	✓
<b>Elementos químicos</b>							
Arsénico (As)	mg/Kg	$\leq 1,0^5$	✓	✓	✓	✓	✓
Cromo (Cr)	mg/Kg	$\leq 10,0^5$	✓	✓	✓	✓	✓
Plomo (Pb)	mg/Kg	$\leq 10,0^5$	✓	✓	✓	✓	✓
Mercurio (Hg)	mg/Kg	$\leq 0,1^5$	✓	✓	✓	✓	✓

<sup>1</sup> DIN 68763, <sup>2</sup> Suchsland y Woodson (1987), <sup>3</sup> Deppe y Ernst (2000), <sup>4</sup> Roffael (1993), <sup>5</sup> Norma EPF (2002)

Una vez obtenidos los resultados se concluye para la madera de todas las especies estudiadas cumplen con la normativa, por lo que son especies aptas como materia prima alternativa o complemento a las ya existentes para la producción de tableros de partículas.

#### 4.7.2 Cumplimiento de requisitos cualitativos para biocombustible sólidos

**Tabla 93.** Resumen de cumplimiento de requerimientos para la producción de pellets según normas.

Propiedades del análisis	Unid.	Parámetros Técnicos	Cumplimiento de normas				
			C.s.	O.e.	P.a.	P. spp.	Q.i.
<b>Propiedades físicas</b>							
Humedad	(%)	≤10	-	-	-	-	-
Densidad	Kg/m <sup>3</sup>	≥600 <sup>1</sup>	✓	✓	✓	✓	✓
<b>Propiedades energéticas</b>							
Cenizas	(%)	≤1,5 <sup>1</sup>	x	x	✓	✓	x
PC	MJ/kg	16,3≤Q≤19 <sup>51</sup>	x	✓	✓	✓	✓
<b>Elementos químicos</b>							
Nitrógeno (N)	%	≤0,5 <sup>1</sup>	x	✓	✓	✓	✓
Azufre (S)	%	<0,03 <sup>1</sup>	x	✓	✓	✓	✓
Arsénico (As)	mg/Kg	≤1,0 <sup>1</sup>	✓	✓	✓	✓	✓
Cromo (Cr)	mg/Kg	≤10,0 <sup>1</sup>	✓	✓	✓	✓	✓
Plomo (Pb)	mg/Kg	≤10,0 <sup>1</sup>	✓	✓	✓	✓	✓
Mercurio (Hg)	mg/Kg	≤0,1 <sup>1</sup>	✓	✓	✓	✓	✓
Níquel (Ni)	mg/Kg	≤10,0 <sup>1</sup>	✓	✓	✓	✓	✓
Zinc (Zn)	mg/Kg	≤10,0 <sup>1</sup>	✓	✓	✓	✓	✓

<sup>1</sup>EN 14961-2

Según los resultados obtenidos por la tabla 92 podemos concluir que, a excepción de naranjos, las demás especies cumplen con la normativa para ser usadas como materia prima alternativa o complemento a las ya existentes en la fabricación de pellets.

Si bien olivos y encinas no cumplen la norma de  $< 1,5$  % de cenizas, en olivos el porcentaje es de 2,4 y en encina es de 1,8, por lo que la diferencia con la limitante establecida es mínima. Además, al tratarse de material complementario a las materias primas destinadas a estos usos, el porcentaje final de cenizas del pellets será mucho menor que los obtenidos en estas dos especies.

## **CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES**



## 5. CONCLUSIONES

Siguiendo la estructura general de la tesis y de los objetivos planteados así como de los resultados obtenidos y su discusión en el proceso de la investigación, se pueden extraer las siguientes conclusiones.

### 5.1 Selección de especies y muestreo realizado

La selección de especies se puede considerar acertada, ya que la frondosa forestal *Quercus ilex* L. es la principal especie de frondosa presente en la zona mediterránea española. Obviamente, un análisis integral del potencial energético forestal debería incluir las principales coníferas (pinos) como especies más importantes en el medio natural mediterráneo. Como demuestra la bibliografía, se ha concluido en este trabajo que estas especies están suficientemente estudiadas, por lo que es suficiente añadir e integrar los resultados de este tipo de experiencias al presente trabajo.

En cuanto a la selección de *Paulownia spp.* como ejemplo de cultivo energético se concluye como muy acertada, ya que durante los últimos años en España se ha incrementado de forma muy considerable la producción de esta planta en viveros e invernaderos. Además de la implementación de numerosos ensayos silviculturales en diferentes regiones con diferentes condiciones ambientales. Concretamente, en la Comunidad Valenciana han proliferado las plantaciones de diferentes especies de este género (*Paulownia elongata*, *Paulownia fortunei*, *Paulownia tomentosa* e incluso híbridos seleccionados inter-específicos), tanto en tierras de regadío como en secano. Esto se debe a que la paulonia tolera tras el establecimiento condiciones moderadas de aridez y sequía, rebrota por la base, lo

cual permite cosecharlos hasta 5 ó 6 veces y es muy poco sensible a plagas. Tras los resultados obtenidos sobre sus características y propiedades se puede concluir que su plantación en condiciones mediterráneas es viable en regímenes de rápido crecimiento, tanto en cultivos puros como en mixtos, con muy buenas posibilidades de utilización de su biomasa con fines energéticos e, incluso, como madera para tableros.

Por último, en cuanto a las especies leñosas agrícolas, las tres especies seleccionadas (*Olea europea*, *Prunus amygdalus*, *Citrus sinensis*) hacen un total de más del 70% de la superficie de cultivos leñosos en la Comunidad Valenciana, siendo este porcentaje similar en otras regiones del arco Mediterráneo. Es por ello que podemos concluir que se han estudiado las tres especies más representativas. Aunque se observa que el naranjo está en lento retroceso en cuanto a superficie cultivada en la Comunidad Valencia durante los últimos años, son estas tres especies leñosas la que sustentarán de forma generalizada en el futuro los cultivos leñosos en el arco mediterráneo español, constituyendo así una fuente de materia prima estable y sostenible. En algunas zonas concretas de producción vitivinícola, podría ser incluida como cuarta especie la vid.

Mientras que la variabilidad genética o de estación es considerada mínima en el estudio de la encina, sin embargo, no se ha tenido en cuenta la variable de variedad de los frutales y de subespecie de paulonias, lo que puede influir en la variabilidad de los resultados que se han obtenido. Debido a la gran variabilidad que se ha observado principalmente en el parámetro fuste del árbol de naranjos, para investigaciones futuras se aconseja analizar más en detalle los posibles efectos de influencia que pueda tener la variabilidad de material genético sobre estos parámetros.

La metodología para la selección de parcelas representativas podemos considerarla como contrastada y adecuada, ya que se ha procedido a la adaptación de la metodología forestal a los cultivos agrícolas y energéticos. También la selección de individuos representativos se ha basado en metodología contrastada por numerosas fuentes. Sin embargo, los altos niveles de variabilidad en los parámetros morfológicos en las especies de frutales, sobre todo en naranjo, nos indican que un muestreo mayor de individuos por parcela (o de muestras por individuo) en esta especie nos podría haber llevado a un mayor nivel de representatividad y confianza estadística.

### **5.2 Características morfológicas de la biomasa**

Las formas irregulares representan un límite para el uso de la madera sobre todo en las especies frutales (olivo, naranjo y almendro), ya que su manejo va orientado al desarrollo de la copa para la óptima producción de sus frutos. También la encina tiene formas de fuste muy irregulares, a pesar de intervenciones esporádicas de mejora forestal de las masas (raleos y claras). Por el contrario, la paulonia presenta las mejores formas de fuste, tanto en rectitud del tronco como en menor porcentaje de corteza. Sin embargo, estos fustes rectos son huecos en su interior, desconociéndose la edad de oclusión, y el bajo volumen no permiten utilizarlos como madera aserrada. Precisamente, la dificultad de estimar los crecimientos y rendimientos en volumen real frente al aparente hace necesario un estudio futuro en profundidad del régimen de oclusión del interior del fuste en paulonia, incluyendo el análisis de la influencia que sobre esto pueda causar la especie o variedad genética, la estación y régimen de crecimiento diametral como resultado de los tratamientos culturales (marco de plantación, cortas a monte bajo así como talas de formación y podas de calidad en masas llevadas a monte alto).

La imposibilidad de clasificar los surtidos de madera de estas especies a productos aserrados y la consiguiente falta de valor económico de su biomasa leñosa junto a los coyunturales problemas socioeconómicos de las zonas rurales en el arco mediterráneo (despoblamiento rural, abandono de los cultivos agrícolas y de los trabajos forestales, etc.) han dado lugar a una importante presencia de rodales totalmente sin manejo o abandonados. Sin embargo, el uso histórico como leña doméstica de varias de estas especies abre una posibilidad de usarlo como fuente de energía a escala industrial, de forma planificada y sostenida. Por otro lado, los rodales jóvenes de regeneración natural, los cultivos energéticos y los cultivos agrícolas leñosos necesitan tratamientos culturales intensivos, incluyendo aprovechamiento de la poda, para prevenir frente al riesgo de los incendios forestales. El desarrollo de cultivos energéticos y el mayor aprovechamiento de los cultivos agrícolas de secano son imprescindibles para establecer áreas poco inflamables en los cinturones perimetrales de las zonas netamente forestales, potenciando la discontinuidad de la carga de combustible en el medio natural y favoreciendo así la prevención activa frente a la propagación de grandes incendios.

### **5.3 Propiedades físicas de la biomasa**

A excepción de la paulonia, las especies frutales y la encina pueden ser consideradas como maderas densas, claramente por encima de  $0,650 \text{ g/cm}^3$ . También se ha observado que sobre todo la encina, pero también las tres especies frutales, son maderas con altos porcentajes de contenido en humedad en verde, por lo que la extracción del agua ligada a la pared celular del material leñoso es un proceso más intensivo en tiempo y energía que para especies menos densas como es el caso de las coníferas (*Pinus spp.*).

También hay que tener en cuenta que la paulonia, a pesar de tener una densidad significativamente más baja, en entorno a ( $0,300 \text{ g/cm}^3$ ), presenta también un contenido de humedad muy alto (de más del 60%), lo que implica procesos de secado intensivos.

### **5.4 Características químicas**

Dentro del análisis químico, en general, la encina presenta las menores concentraciones de los diferentes elementos químicos analizados lo que puede deberse a que, a diferencia de los sitios donde han sido cultivados la paulonia y los cultivos frutales analizados en este estudio, los terrenos forestales donde crece la encina están libres del laboreo intensivo de la tierra, esto es, libres en gran medida de la aplicación de fertilizantes y de otros tipos de contaminantes (fungicidas, insecticidas, etc.).

Así, la encina posee una concentración de N muy baja, al igual que sucede con la concentración en metales pesados. Sin embargo, todas las especies estudiadas en esta tesis, incluyendo encina, presentan concentraciones de estos elementos más altos que los encontrados habitualmente en coníferas forestales (pinos). A pesar de esto, a excepción de los naranjos, las concentraciones están dentro de lo requerido por las diferentes normas europeas tanto para biocombustibles sólidos como para materia prima destinada a la fabricación de tablero de partículas.

### **5.5 Propiedades energéticas de la biomasa**

Si bien, en términos generales y según las normas europeas, todas las especies estudiadas, a excepción de naranjos, poseen un poder calorífico apto para la

producción de biocombustibles sólidos, los valores obtenidos son inferiores a los que se pueden obtener de especies forestales de coníferas, que son la materia prima de uso tradicional en fabricación de pellets actualmente en Europa.

Por lo que la utilización de la biomasa leñosa de las especies estudiadas quedaría supeditada a ser un complemento que contemple la fabricación de pellets de alta calidad a partir de una mezcla de diversas especies teniendo siempre como base las especies forestales tradicionales, sobre todo *Pinus spp.*

### **5.6 Cuantificación volumétrica de la biomasa para modelos de estimación del potencial biomásico y energético**

Tanto para encinas como paulonia, basándose en el homogéneo factor de forma fustal observado y debido a la buena correlación entre el diámetro y el volumen del fuste obtenido, la predicción de la producción de biomasa es posible. Teniendo en cuenta la densidad básica, el poder calorífico y la densidad de carga de cada rodal, se puede concluir que los resultados de los modelos de predicción ajustados son adecuados y pueden ser utilizados como base para una orientación energética del plan de manejo de estas especies.

Los resultados en los cultivos agrícolas leñosos muestran una alta variación de los principales parámetros dendrométricos (forma del fuste y volumen, ramas y copas), debido a la fuerte influencia antropogénica en estos cultivos manifestados en los tratamientos culturales de los cultivos agrícolas. Los altos niveles de significancias estadísticas obtenidas en los modelos matemáticos representan una herramienta útil para la predicción de la cantidad y la calidad de la biomasa producida, que se puede utilizar tanto para el material de las ramas, así como para el material del fuste. Sin embargo, la variación observada de los parámetros

dendrométricos en dependencia de tratamientos culturales en las especies agrícolas y la zona geográfica (incluye los parámetros de influencia de la estación) implica un límite en la aplicabilidad de los modelos de predicción presentados. Por lo tanto, se puede concluir que la metodología desarrollada en esta investigación es adecuada para la estimación de la biomasa, pero en otras áreas geográficas se debe utilizar con los datos específicos de las variables de influencia de cada una de estas especies frutales.

### **5.7 Adecuación de la biomasa a la producción de biocombustibles sólidos**

Las especies estudiadas presentan diferentes aptitudes, ya sea como biocombustible sólido y/o como material para la industria del tablero, pero con diferentes calidades en estos productos.

Si bien, a excepción de los naranjos, todas las especies presentan buenas características como biocombustibles sólidos, son los rodales de paulonia y encina los que presentan una ventaja con respecto a los cultivos agrícolas leñosos, ya que éstos presentan buenos resultados en las variables energéticas evaluadas. Debido a su condición de aprovechamiento como árboles enteros se obtienen mayor cantidad de biomasa por hectárea anual, a diferencia de los cultivos agrícolas leñosos, de los cuales sólo se puede aprovechar su poda anual y eventualmente el arranque de alguno de estos cultivos. Esto hace que para éstos últimos la biomasa potencial obtenible por hectárea al año sea menor.

### **5.8 Adecuación de la biomasa a la fabricación de tableros de partículas**

Todas las especies estudiadas, según la normativa europea vigente, son aptas como material para la producción de tableros de partículas. Sin embargo, la alta

densidad de la madera obtenida en encina y en los cultivos agrícolas leñosos (olivo, almendro y naranjo) no es adecuada como único material triturado para la obtención de este producto. Por ello resulta conveniente utilizarlas como material de complemento a otras especies de menor densidad, como lo es paulonia u otras especies de base forestal (*Pinus spp.*, *Populus spp.*, etc.), obteniendo un tablero de mayor calidad en el proceso industrial de fabricación del tablero aglomerado de partículas.

### **5.9 Conclusiones generales para la gestión y el aprovechamiento integral de la biomasa leñosa en condiciones mediterráneas**

La biomasa no utilizada producida en los cultivos de árboles frutales en la región del Mediterráneo tiene un importante uso potencial, hasta la fecha prácticamente desaprovechado. En un modelo de gestión integral, obviamente los frutos tienen que ser considerados como el producto principal, mientras que la biomasa debe ser gestionada como un subproducto, pero nunca como un residuo. Sin embargo, los tratamientos agrícolas de poda o raleo ofrecen una buena fuente de materia prima sustituta, especialmente para su valorización bioenergética. Operaciones de poda anual o bianual permitirían una posibilidad de suministro sostenido de las plantas de energía a nivel local o regional. Este material agrícola, con menores costes de aprovechamiento y logísticos, puede ser un complemento muy interesante a la biomasa forestal producida a mayor escala.

En el área mediterránea, los proyectos integrales de gestión y aprovechamiento sólo pueden ser viables y sostenibles a escala local. A pesar del potencial en existencias, posibilidades anuales y alto poder calorífico de las especies leñosas presentes en nuestros montes y campos, los altos costes logísticos (costos de aprovechamiento en campo/monte y costo de transporte a planta industrial o

energética) y tampoco los balances de carbono (costes energéticos con fuentes de energías no renovables para cosechar y, sobre todo, transportar biomasa) no justifican aprovechamientos en grandes radios de abastecimiento a un punto de reunión y valorización industrial y/o energética. La biomasa de diferentes especies leñosas puede ser conjugada en procesos de valorización, bien en sistemas de clasificación de astilla y destino de usos (tablero y bioenergía) o bien por procesos de generación de energía en concepto de árbol, completo con astilladoras in situ.

En general, y tras los principales resultados obtenidos tras la realización de esta tesis, se puede concluir que para alcanzar el reto de poder llegar al desarrollo de un modelo de gestión y valorización de biomasa agroforestal a nivel local en condiciones mediterráneas se deberían investigar principalmente los siguientes retos en trabajos futuros:

- 1- Planes de gestión integral y aprovisionamiento de biomasa forestal y agrícola basados en la sostenibilidad y la subsidiaridad (escala local).
- 2- Desarrollo de sistemas avanzados de aprovechamientos agroforestales según tipo de monte o cultivo.
- 3- Desarrollo de sistemas avanzados de logística monte-industria, adaptados a cada tipo de cultivo y especie.
- 4- Valorización integral de la energía eléctrica y térmica producida, preferiblemente a escala local.
- 5- Desarrollo de biocombustibles sólidos de alto valor añadido, adaptados específicamente a las especies leñosas mediterráneas.



## **CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFÍA**



---

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Adler E. 1977. Lignin chemistry - past, present and future. *Wood Science and Technology*, 11:169-218.
- Agudo R. 2010. Empacado discontinuo a pie de Tocón de residuos selvícolas: Gestión integral de biomasa Forestal. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba. 168 p.
- Alaejos J, MR León. 2008. Boletín Informativo CIDEU Nº 5: 67-83. ISSN 1885-5237.
- Albin, R, R Jaramillo. 1980. Observaciones sobre la variación del contenido de humedad en madera industrial astillable de *Pinus radiata* (D. Don). *Bosque* 3(2): 101-114.
- Allué E, J Nadal, A Estrada, P García-Arguelles. 2007. Los datos antropológicos de la Balma del Gai: Una aportación al conocimiento de la vegetación y la explotación de los recursos forestales durante el tardiglaciario en el NE peninsular. *Trabajos de Prehistoria* 64 (1): 87-89.
- Alves C, C Gonçalves, AP Fernandes, L Tarelho, C Pio. 2011. Fireplace and woodstove fine particle emissions from combustion of western Mediterranean wood types. *Atmospheric Research* 101: 692–700.
- Argibay, J., 2009. Muestra en investigación cuantitativa. *Subjetividad y Procesos Cognitivos* 13: 13-29.
- Baettig R, M Yañez, M Albornoz. 2010. Cultivos dendroenergéticos de híbridos de álamo para la obtención de biocombustibles en Chile: estado del arte. *Bosque* 31(2): 89-99.
- Bamber, R. K., K. Fukazawa. 1985. "Sapwood and Heartwood: A Review", *Forest Products Abstracts* 8 (9):265-278.
- Bárceñas-Pazos GM, R Ríos-Villa, JR Aguirre-Rivera, BI Juárez-Flores y JA Honorato-Salazar. 2008. Composición química y densidad básica relativa de la madera de dos especies arbustivas de encino blanco de la Sierra de Álvarez, SLP, México. *Madera y Bosques* 14(3):81-94.
- Barboutis JA, JL Philippou. 2007. Evergreen Mediterranean hardwoods as particleboard raw material. *Building and Environmental* 42: 1183-1187.
- Barradas A. 2009. Gestión integral de residuos municipales. Instituto Tecnológico de Minatitlán. Veracruz, México. 167 p.

- Barregard L, G Sällsten, P Gustafson, L Andersson, L Johansson. 2006. Experimental exposure to wood-smoke particles in healthy humans: effects on markers of inflammation, coagulation, and lipid peroxidation. *Inhal Toxicol* 18(11):845–853.
- Barrio Anta M, H Sixto Blanco, I Cañellas Rey de Viñas, F González Antoñanzas. 2007. Sistema de cubicación con clasificación de productos para plantaciones de *Populus x euramericana* (Dode) Guinier cv. en la meseta norte y centro de España. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 16(1), 65-75.
- Barton F. 1988. Chemistry of Lignocellulose: Methods of Analysis and Consequences of Structure. *Animal Feed Science and Technology* 21: 279-286.
- Barzel B, Biham O. 2012. Stochastic analysis of complex reaction networks using binomial moment equations. *American Physical Society* 86, 031126: 1-13.
- Beltran-Heredia J, J Torregrosa, JR Domínguez, JA Peres. 2001. Kinetics of the reaction between ozone and phenolic acids present in agro-industrial wastewaters. *Water Research* Vol. 35 (4): 1077-1085.
- Bodirlau, R, I Spiridion y CA Teaca. 2007. Chemical investigation of wood tree species in temperate forest in East Northern Romania. *BioResources* (2):41-57.
- Brañas J, F González-Río, R Rodríguez Soalleiro, A Merino. 2000. Biomasa maderable y no maderable en plantaciones de eucalipto. Cuantificación y estimación. *CIS-Madera* 4: 72-75.
- Bridgwater AV. 1995. The technical and economic-feasibility of biomass gasification for power generation. *Fuel* 74: 631-653.
- Brown S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. A primer. Roma, Italia. FAO. 55 p. (Informe Montes N°134).
- Browning BL. 1967. *Methods of Wood Chemistry*. New York, USA. Interscience Publishers. 882 p.
- Brunner A. 1998. A light model for spatially explicit forest stands models. *Forest Ecology Management*. 147: 19-46.
- Burkhart H. 1977. Cubic-foot volume of loblolly pine to any merchantable top limit. *Southern Journal of Applied Forestry* 1: 7-9.
- Burschel P, A Hernández, M Lobos. 2003. Leña, una Fuente de Energía Renovable para Chile. Santiago, Chile. Ed. Universitaria 171 p.
- Cabrera M. 2012. El sector de la biomasa en España y el Per 2011-2020. Situación, perspectivas, retos. *Montes* 110: 5-8.

- Calve, L., Shiels, J., Gravel, M. 1986. Maximizing aspen poplar residues utilization for waferboard production. *Forest Products Journal* 36(5): 39-45.
- Canadell J, M Riba, P Andres. 1988. Biomass Equations for *Quercus ilex L.* in the Montseny Massif, Northeastern Spain. *Forestry* 61 (2) : 137 – 147
- Cao Q, H Burkhart, T Max. 1980. Evaluation of two methods for cubic-foot volume prediction of loblolly pine to any merchantable limit. *Forest Science* 26: 71-80.
- Caparros S, MJ Diaz, J Ariza, F Lopez, L Jimenez. 2008. New perspectives for *Paulownia fortunei L.* valorisation of the autohydrolysis and pulping processes. *Bioresource Technol* 99: 741-749.
- Caritat A, M Oliva, M Molinas. 1992. Distribución de la biomasa en dos parcelas de alcornocal, *Scientia gerundensis* 18: 131-142
- Cassens, D. 1974. Bark properties of eight western softwoods. *Forest Products Journal* 24 (4): 40-45.
- Carrasco J, H Sixto. 2007. Some elements regarding the status of Short Rotation Crops in Spain. In Joint Research Centre (JRC). Short Rotation Forestry, Short Rotation Coppice and perennial grasses in the European Union: Agro-environmental aspects, present use and perspectives. Harpenden, United Kingdom. European Communities. 166 p.
- CEPAL (Comisión Económica Para América Latina y el Caribe). 2012. Capítulo III: Los desafíos de América Latina y el Caribe para mejorar su inserción en la economía mundial. En CEPAL. Panorama de la inserción internacional de América Latina y el Caribe 2010-2011. 111 p.
- Cerdá E. 2012. La biomasa en España: una fuente de energía renovable con gran futuro. *Fundacion ideas*. 72 p. (Documento de trabajo 01/2012).
- Ceulemans R, McDonald A, Pereira JS. 1996. Modelling Short Rotation Forestry Growth. *Biomass and Bioenergy* 11(2-3): 215-231.
- Chauchard L, R Sbrancia. 2005. Funciones de razón para la estimación de los volúmenes maderables de Pino radiata en el País Vasco. *Invest. Agrar.: Sist. Recur. For.* 14 (2): 185-194
- CIRCE (Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos). 2006. Evaluación del potencial de biomasa residual en los ecosistemas forestales y los medios agrícolas En la provincia de Huesca. Huesca, España. CIRCE. 37 p.
- Ciria M. 2011 Desarrollo de los cultivos energéticos leñosos en España. *Vida Rural* Vol 329:10-15

- Clutter J. 1983. Timber management, a quantitative approach. New York, USA. Wiley & Sons. 333 p.
- Conrad EC, J Palmer. 1976. Rapid analysis of carbohydrates by high-pressure liquid chromatography. Food Technology 30: 84-93.
- COI (Consejo Oleícola Internacional). 2007. Técnicas de producción en olivicultura. Madrid, España. Artegraf. 346 p.
- Costas R, P Mac Donagh, E Weber, S Figueredo, C Gómez. 2006. Modelos predictivos de la producción de *Pinus taeda* empleando variables vinculadas con las podas. Bosque 27(2): 98-107.
- CPF (Centre de la Propietat Forestal). 2004. L'inventari Forestal: Anexe Indicadors dendromètrics. En Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient i Habitatge. Manual de redacció de plans tècnics de gestió i millora forestal (PTGMF) i plans simples de gestió forestal (PSGF). Instruccions de redacció i l'inventari forestal. Torrefurusa, España. Abast. 216 p.
- Cruz P, A Fernández, Reque J. 2009. Propuesta tipológica forestal para los bosques de *Quercus pyrenaica* de la comarca del Bierzo del noroeste de España, empleando análisis multivariante. Bosque 30 (3), p. 180-191
- CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas). 2010. Investigación sobre la absorción de co2 por los cultivos más Representativos. Murcia, España. CSIC. 43 p.
- Cullen D, PJ Kersten. 1996. Enzymology and molecular biology of lignin degradation. In: Bramble, R., Marzluf, G. (Eds.), The Mycota III. Springer-Verlag, Berlin, pp. 297-314.
- Cubero, J. 2003. Introducción a la Genética Forestal. 2º Edición. Madrid, España. Mundi-Prensa. 571 p.
- Darvill, A., Mcneil, M., Albersheim, P. and Delmer, D.D., 1980. The primary cell walls of flowering plants. In: P.K. Stumpf and E.E. Conn (Editors), The Biochemistry of Plants. Vol 1. New York, USA. Academic Press. 92 p.
- Davel M, Jovanovski A, Mohr Bell D. 2005. Densidad básica de la madera de pino oregón y su relación con las condiciones de crecimiento en la Patagonia Andina Argentina. Bosque 26 (3): 55-62
- Delmastro R, J Díaz-vaz, J Schlatter. 1980. Variabilidad de las características hereditarias del *Pinus radiata* (D. Don). Revisión bibliográfica. Investigación y desarrollo forestal. Santiago, Chile. Corporación Nacional Forestal. 157 p.
- Demirbas Ayhan. 2005. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion

- related environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Science* (31): 171–192.
- Deppe HJ, Ernst K. 2000. *Taschenbuch der Spanplattentechnik*. DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co. Leinfelden-Echterdingen. 4 p.
- Di Blasi C., Tanzi V. and Lanzetta M. 1997. A study on the production of agricultural residues in Italy. *Biomass and Bioenergy* 12 (5) 321-331
- Díaz BJ, L Luna, GD Keil, ME Otaño, PL Peri. 2002. Tratamiento de la madera de *Populus nigra* CV. Itálica ante la preservación con creosota y CCA. *Investigaciones Agrarias y Sistemas Forestales* 11 (2): 325-338.
- Díaz-Vaz JE. 2003. *Anatomía de Maderas*. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. 150 p.
- Dielen L, Guegan S, Lacour PA, Mäki P, Stolp J, Rytönen A. 2000. EU Energy Policy Impacts on the Forest-Based Industry. Part 1, Modelling Analysis of the Influence of the EC White Paper on Renewable Energy Sources on the Wood Supply to the European Forest-Based Industries. Stichting Probos, Wageningen, The Netherlands.
- Dix B, E Roffael. 1995. "Zum Verhalten des Splint- und Kernholzes der Lärche (*Larix decidua*) bei der Herstellung von feuchtebeständigen Spanplatten unter Einsatz verschiedener Bindemittel", *Holz als Roh- und Werkstoff* 53: 357-367.
- Dix B, E Roffael, G Becker, K Groß. 1992. Properties of pulps prepared from poplar wood of different clones, sites and ages. *WKI-Mitteilung* 565/1992. *Papier* 46 10: 583-592. ISSN: 0031-1340
- Dornburg V, A Faaij, H Langeveld, G van de Ven, F Wester. 2008. *Biomass assessment: Assessment of global biomass potentials and their links to food, water, biodiversity, energy demand and economy*. Utrecht, Netherlands. MNP, Bilthoven. 108 p.
- Donoso C. 1995. *Ecología forestal: el bosque y su medio ambiente*. Santiago, Chile. Editorial Universitaria. 369 p.
- Donoso C. 1993. *Bosques templados de Chile y Argentina*. Santiago, Chile. Editorial Universitaria. 483 p.
- Donoso J, R Rosende, I Ulloa, E Cuevas. 1989. *Estudio de mortalidad de árboles en la pampa del tamarugal*. Santiago de Chile. 74 p. (Documento de trabajo N° 26).
- Dopazo R, DJ Vega, R Ortiz, E Martínez. 2008. *El aprovechamiento de biomasa residual y de cultivos energéticos*. 5° Congreso Forestal Español. Avila, septiembre 2009.

- Doruska D, H Burkhart. 1994. Modeling the diameter and locational distribution of branches within the crowns of loblolly pine trees in unthinned plantations. *Canadian Journal of Forest Research*. 24: 2362-2376.
- Downes GM, IL Hudson, CA Raymond, GH Dean, AJ Michell. 1997. Sampling plantation eucalypts for wood and fibre properties. Melbourne, Australia. CSIRO Publishing. 132 p.
- Eamus D, K McGuinness, W Burrows. 2000. Review of allometric relationships for estimating woody biomass for Queensland, the northern territory and western Australia. National Carbon accounting system. 56 p. (Technical report N° 5).
- EEA (European Environmental Agency). 2005. How much biomass can Europe use without harming the environment. Copenhagen, Denmark. 4 p. ISSN 1830-2246.
- EPI. 2010. La Estrategia de la Comunitat Valenciana para la Innovación, la Internacionalización y la Competitividad Empresarial 2010-2015. Valencia, España. Generalitat Valenciana. 76 p
- Eppler U, JE Petersen, C Couturier. 2007. JRC Scientific Report: Short Rotation Forestry, Short Rotation Coppice in the European Union: Agro-environmental aspects, present use and perspectives. Harpenden, United Kingdom. European Communities. 166 p.
- Esau K. 1959. Anatomía Vegetal. Ediciones Omega. Barcelona. 729 p.
- Esteban LS, P Pérez, P Ciria, J Carrasco. 2004. Evaluación de los recursos de biomasa forestal en la provincia de Soria. Análisis de alternativas para su aprovechamiento energético. Colección Documentos CIEMAT. 109 p. ISBN 84-7834-465-9.
- Esteban Pascual LS, R García Arambilet, R Cabezón González, JE Carrasco García. 2007. Plan de aprovechamiento energético de la biomasa en las comarcas de El Bierzo y Laciana (León). CEDER - CIEMAT. 125 p.
- Faccioto G. 2008. Cultivos leñosos de corta rotación. Congreso Internacional de Biocarburantes de segunda generación. Pamplona, Navarra, España
- Falasca S, M Bernabe. 2010. Aptitud agroclimática argentina para la implantación de bosques energéticos de *Paulownia* spp. *Revista Geográfica* (148): 151-164
- FAO (Food and Agriculture Organization) 1968. Tableros contrachapados y otros paneles a base de madera, Informe de una consulta internacional sobre tableros contrachapados y otros paneles a base de madera. Roma, Italia. 8 p.

- FAO 1998. Evaluación de los recursos forestales (FRA 2000): Términos y definiciones. Estudio FAO Departamento de Montes. Roma, Italia, 17 p.
- FAO 2010. Criteria and indicators for sustainable woodfuels. Roma, Italia. 103 p. (FAO Forestry Paper Nº 160)
- FAO 2012. Comité forestal, 21º período de sesiones. Resultado de Río+20 en medidas prácticas dendroenergía para un futuro sostenible. Roma, Italia. 24-28.
- Fengel D, G Wegener. 1984. Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reaction. Berlín, Alemania. Walter de Gruyter & Co. 163 p. ISBN 3935638-39-6.
- Fernández J. 2009a. Biocombustibles sólidos modernos: producción y aplicaciones. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. Madrid. 30 p. ISBN 978-84-491-0883-9. (Hoja Divulgativa 2128HD).
- Fernández E. 2009b. Análisis de los procesos de producción de biomasa residual procedente del cultivo de frutales mediterráneos. Cuantificación, cosecha y caracterización para su uso energético o industrial. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València. España.
- Ferrer E, F Pomares, R Canet, M Albiach, F Tarazona. 2006. Estudio sobre la incorporación de los restos de poda de cítricos en diferentes municipios de la Provincia de Valencia. Departamento de Rec. Nat. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA). Levante Agrícola 1º trimestre: 24-28.
- Ferres LL, F Roda, A Verdu, J Terradas. 1980. Estructura y funcionalismo de un encinar montano en el Montseny. Mediterránea 7 :139-166.
- Filbakk T, R Jirjis, J Nurmi, O Høibø. 2011. The effect of bark content on quality parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) pellets. Biomass and Bioenergy 5 (8): 3342–3349.
- Finguer G. 1992. Fundamentos de biometría forestal. Santa María: UFSM CEPEF/FATEC, 269 p.
- Fisher J, S Jackson, B Biewald. 2012. The Carbon Footprint of Electricity from Biomass A Review of the Current State of Science and Policy. Synapse Energy Economics. Massachusetts, USA. 65 p.
- Flores F, H Lee Allen. 2004 Efectos del clima y capacidad de almacenamiento de agua del suelo en la productividad de rodales de pino radiata en Chile: un análisis utilizando el modelo 3-PG. Bosque 25 (3): 11-24
- Fonseca M. 2006. Determinación de la composición química de la madera de pino candelillo (*Pinus maximinoi* h. E. Moore) procedente de la finca río frío, tatic,

- alta verapaz. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. 154 p.
- Fontanet X. 2009. La citricultura ecológica. Ficha 7: Servicio de Producción Agrícola. Generalitat de Catalunya. Departament d'Agricultura, Alimentació i Acció Rural (DAR). 12 p.
- Frías J. 1985. Posibilidades de aprovechamiento económico de la biomasa residual. *Agricultura y Sociedad* 34: 219-236.
- Friberg L, CG Elinder. 1985. Cadmium and compounds. In *Encyclopedia of Occupational Health*, third ed. International Labor Organization Publications, 356-357 p
- Fuwape JA, Akindede SO. 1989. Biomass yield and energy value of some fast-growing multipurpose trees in Nigeria. *Biomass and Bioenergy*. Volume 12(2): 101-106
- Garg UK, MP Kaur, VK Garg, Sud D. 2007. Removal of hexavalent Cr from aqueous solutions by agricultural waste biomass. *Journal of Hazardous Materials* 140: 60-68.
- García J, F Rojo, G Sánchez,. 2009. Serie Forestal nº 7: Los Palancares y Agregados: 111 años de gestión forestal sostenible. Editado por Junta de Comunidades de Catilla - La Mancha. 56 p. ISBN: 978-84-7788-570-2
- García Codron JC. 2011. Biogeografía: Tema 4. Los biomas de las latitudes medias. Departamento de Geografía, Urbanismo y Ordenación del Territorio, Universidad de Cantabria. 51 p. ISBN: 978-84-695-1781-9
- García Colin S, E Bauer. 1996. Energía, ambiente y desarrollo sustentable. Programa universitario de energía. UNAM. México. 291 p.
- Gayoso J, J Guerra. 2005. Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *Bosque* 26 (2): 33-38.
- Gayoso J, J Guerra, D Alarcón. 2002. Contenido de carbono y funciones de biomasa en especies nativas y exóticas. Valdivia (Chile): Proyecto medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Universidad Austral de Chile. 53 p. (Documento Nº 1).
- Geimer R, J Crist. 1980. Structural flakeboard from short-rotation intensively cultivated hybrid *Populus* clones. *Forest Products Journal* 30 (6): 42-48.
- Geldres E, V Gerding, JE Schlatter . 2006. Biomasa de *Eucalyptus nitens* de 4-7 años de edad en un rodal de la X Región, Chile. *Bosque* 27(3): 223-230.

- Generalitat Valenciana. 1999. Los montes valencianos en cifras. Extracto del segundo inventario forestal de la Comunidad Valenciana. Conselleria de Agricultura y Medio Ambiente. 51 p.
- Gerding V, Schlatter J. 1995. Variables y factores del sitio de importancia para la productividad de *Pinus radiata* D. Don en Chile. *Bosque* 16 (2): 39-56.
- Gifford R M. 2000. Carbon content of aboveground tissues of forest and woodland trees. NCAS Technical Report Australian Greenhouse Office (22): 17.
- Giorgi F, P Lionello. 2008. Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change* 63(2-3): 90-104
- Gobierno de Cantabria. 2005. Plan estratégico regional sobre el medio natural. Documento divulgativo. Gobierno de Cantabria. 214 p.
- Gómez M. 2008. Sistema de generación eléctrica con pila de combustible de óxido sólido alimentado con residuos forestales y su optimización. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior Industrial, UNED. 336 pp.
- González J, P Ibarz. 1998. Monte bajo irregular de encina: Caracterización silvícola. Centre Tecnologic Forestal Catalunya (CTFC). 14 p.
- Grosse H, U Kannegieser. 1988. Investigación para el Manejo de las Plantaciones de Pino oregón y *Sequoia sempervirens*. Proyecto INFOR – CORFO. 176 p.
- Gutiérrez Vázquez B, M Gómez-Cárdenas, S Valencia Manzo, E Cornejo Oviedo, J Prieto Ruiz. 2010. Wood Density Variation In Natural populations Of *Pinus Ocarpa* Schiede Exschltdl. From The State Of Chiapas, México. *Fitotécnia Mexicana*. Vol. 33 (4): 75-78
- GTZ/FAO/INFOR. 2007. Disponibilidad de Residuos Madereros: Residuos de la industria primaria de la madera. Disponibilidad para uso energético. 122 p. ISBN: 978-956-7700-09-7.
- Hakan Akyildiz M, H Sahin Kol. 2009. Some technological properties and uses of paulownia (*Paulownia tomentosa* Steud.) wood *Journal of Environmental Biology* 31: 351-355
- Hapla F, J Saborowski. 1984. Überlegungen zur Wahl des Stichprobenumfangs bei Untersuchungen der physikalischen und technologischen Holzeigenschaften. *Forstarchiv* 55 (4): 135-138
- Hapla F, J Saborowski. 1987. Stichprobenplanung für holzanatomische Untersuchungen. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 45(1987):141-144
- Hapla F, JV Oliver-Villanueva, JM Gonzalez-Molina. 2000. Effect of silvicultural management on wood quality and timber utilisation of *Cedrus atlantica* in

- the European mediterranean area. Holz als Roh- und Werkstoff - European Journal of Wood and Wood Products 58: 1-8
- Haslett A. 1989. Drying properties of New Zealand grown *Acacia melanoxylon*. New Zealand Journal of forestry Science 13 (2):130-138.
- Heinrich I, H Gärtner, M Monbaron. 2007. Tension wood formed in *fagus sylvatica* and *alnus glutinosa* after simulated mass movement events IAWA Journal, Vol. 28 (1): 39–48
- Hellwig M. 1986. Basic Research in Combustion of Biomass. FAO-CNRE. 22-23 p. (Bulletin Nº 10b).
- Hermoso, E. 2001. Caracterización mecánica de la Madera estructural de *Pinus sylvestris*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. España.
- Higuera C. 1994. Funciones de volumen y ahusamiento para roble (*Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst) y hualo (*Nothofagus glauca* (Phil.) Kraser). Tesis de grado. Facultad de Ingeniería Forestal. Universidad Austral de Chile, Valdivia. 70 p.
- Hohenadl W. 1936. Die Bestandesmessung. Forstwiss. Centraldl. 58, 51-61.
- Huber F. 1828. Hilfstabellen für bedienstete des forst und baufachs und auch für ökonomen zur leichten und schnellen bestimmung des massengehaltes roher holzstäme Verlag Fleischmann, München. En Kramer H, Alparslan. Leitfaden für dendrometric und bestandesinventur. Göttingen, Alemania. 251 p.
- Husch B, C Miller, T Beers. 1972. Forest mensuration. 2 ed. New York, US, The Ronald. 402 p.
- IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía). 2007. Manuales de energías renovables: Energía de la biomasa. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España. 140 p.
- IDAE. 2009. Guía técnica de instalaciones de biomasa térmica en edificios. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España. 140 p.
- IDAE. 2011. Análisis del consumo energético del sector residencial en España. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España. 76 p.
- IEA. 2011. Clean energy progress report. Paris, Francia. OECD/IEA. 72 p.
- Ince PJ. 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. 9 p.

- INFOR (Instituto Forestal de Chile) - CONAF (Corporación Nacional Forestal de Chile). 1997. Monografía *Eucalyptus regnans*. Neuenschwander & Cruz. Santiago. Chile. 102 p.
- Jamil JM. 2012. Análisis de gestión, aprovechamiento y valorización integral de biomasa residual generada en las zonas verdes de la ciudad de Valencia. Trabajo Final de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. 82 p.
- Jayawickrama KJS. 2001. Potential genetic gains for carbon sequestration: A preliminary study on radiata pine plantations in New Zealand. *Forest Ecology and Management* 152 (1-3): 313-322.
- Jensen A, K Dam-Johansen. 1998. TG-FTIR study of the influence of potassium chloride on wheat Straw pyrolysis. *Energy Fuels* 12: 929-938.
- Jiménez L, L Sánchez. 2007. Consideraciones sobre el aprovechamiento de La biomasa forestal con fines energéticos, según el nuevo decreto 661/2007 por el que se regula la actividad de producción de energía Eléctrica en régimen general. *Revista Técnica del Medioambiente*. Nº 120. 6p. ISSN: 1130-9881.
- Jiménez AL, BF López, PI Sánchez. 1990. Caracterización de residuos de la tala del olivo para la obtención de pastas celulósicas. *El Papel*, julio-agosto, 57 p.
- Jiménez L, A Rodríguez, JL Ferrer, A Pérez, V Angulo. 2005. Paulownia, a fast-growing plant, as a raw material for paper manufacturing. *62(516):100-105*.
- Johnson DM, TL Jenkins, Z Fengli. 2012. Methods for optimally locating a forest biomass-to-biofuel facility. *Biofuels* 3(4): 489-503
- Jovanovski A, G Robles, M Davel. 2011. Propiedades físicas de la madera de *Populus spp.* proveniente de cortinas forestales plantadas en Esquel, Chubut, Argentina. *Jornadas de Salicáceas*. Neuquén, Argentina. 6p.
- Knigge W., Schulz H. (1966) *Grundriss der Forstbenutzung*. Pual Parey Vwerlag. Hamburgo y Berlin. 583 pp.
- Kocbach A, Y Li, KE Yttri. FR Cassee, PE Schwarze, E Namork. 2006. Physicochemical characterisation of combustion particles from Vehicle exhaust and residential wood smoke. *Particle and Fibre Toxicology*. 3(1). 13 p. DOI: 10.1186/1743-8977-3-1.
- Kollmann F. 1959. *Tecnología de la madera y sus aplicaciones*. Tomo I. Ministerio de Agricultura. Instituto Forestal de Investigaciones, Experiencias y Servicios de la Madera. Madrid, España. 676 p.
- Kollmann F. 1966. *Holzspanwerkstoffe*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

- Kramer H. 1988. *Waldwachstumslehre*. Verlag Paul Parey. Hamburgo y Berlin. 374 pp.
- Kraxner F, S Nilsson, M Obersteiner. 2003. Negative emissions from BioEnergy use, carbon capture and sequestration (BECS)—the case of biomass production by sustainable forest management from semi-natural temperate forests. *Biomass and Bioenergy* 24 (4–5): 285–296.
- Krook J, A Mårtensson, M Eklund. 2004. Metal contamination in recovered waste wood used as energy source in Sweden. *Resources, Conservation and Recycling* 41(1):1-14.
- Langmann B, B Duncan, C Textor, J Trentmann, GR van der Werfe. 2009. Vegetation fire emissions and their impact on air pollution and climate. *Atmospheric Environment* 43: 107–116.
- Latorre B, JR Ruano. 2009. Caracterización energética de la biomasa de *Paulownia spp.* procedente de plántulas cultivadas de una savia. *Montes* 3:77-82.
- Lehmann M, R Geimer. 1974. Properties of structural particleboard from Douglas-fir residues, *Forest Products Journal*. 24 (10): 17-25.
- Lehtikangas P. 2001. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass and Bioenergy* 20 (5): 351–360
- Lehtikangas P. 2011. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass and Bioenergy* 20 (5): 351–360.
- Lehis R, E Roffael, G Becker. 1993. "Zum Verhalten von Splint- und Kernholz der Kiefer bei Verleimung mit Diisocyanat-Klebstoffen (PMDI) und Harnstoffformaldehydharzen (UF-Harzen). Teil 2: Die Verleimung mit Harstoffformaldehydharzen (UF-Harzen)", *Holz-Zentralblatt*. 7: 120-121.
- Lencinas M, G Martinez Patur, J Cellini, R Vukasovic, P Peri. 2002. Incorporación de la altura dominante y la clase de sitio a ecuaciones estándar de volumen para *Nothofagus antarctica* (Forster f.) Oersted. *Bosque*. 2002, vol. 23(2): 5-17.
- Libby, C. 1969. *Ciencia y Tecnología sobre Pulpa y Papel*. México. Ed Futura. 514p.
- Liodakis S, IP Agiovlasitis, T Kakardakis, N Tzamtzis, D Vorisis. 2011. Determining hazard risk indices for Mediterranean forest species based on particle flammability properties. *Fire Safety Journal* 46 (3): 116–124
- Liodakis S, D Vorisis, IP Agiovlasitis. 2005. A method for measuring the relative particle fire hazard properties of forest species. *Thermochimica Acta*. 437 (1–2): 150–157.
- Loetsch F, F Zöhrer, E Haller. 1973. *Forest inventory*. 2a ed. Munich: BLV Vellagsgesellschaft, 469 p.

- Lombardi I, P Huerta. 2006. Controlando la Caoba. *Actualidad Forestal Tropical* 14 (3): 5-9.
- López de Heredia U. 2006. Filogeografía de los *Quercus* esclerófilos (*Q. suber* L., *Q. ilex* L. y *Q. coccifera* L.) en el mediterráneo occidental. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. España.
- Lucas M, E Martínez, F García Morote, F López Serrano, M Andrés Abellán. 2010. El cultivo de Paulonia (*Paulonia elongata x fortunei*) para la obtención de madera y biomasa en Castilla-La Mancha: Primeros resultados. *Foresta*: 47/48: 106-110
- Madrigal J, C Hernando, M Guijarro. 2012. El aprovechamiento energético de la biomasa forestal y la prevención de incendios. SELVIRED-FIRESMART. 23 noviembre 2011. INIA-CIFOR. 14 p.
- MAPA (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación). 1994. Métodos oficiales de análisis Tomo III.. Madrid, España. 532 p.
- Marcos, F. 1989. El carbón vegetal. Propiedades y obtención. *Agroguías mundi-* prensa. 117 p.
- Márquez-Montesino F, T Cordera-Alcántara, J Rodríguez-Mirasol, J Rodríguez-Jiménez. 2001. Estudio del potencial energético de biomasa *Pinus caribaea* Morelet var. *Caribaea* (PC) y *Pinus tropicalis* Morelet (PT); *Eucalyptus saligna* Smith (ES), *Eucalyptus citriodora* Hook (EC). *Revista Chapingo*. Vol 7 (1): 83-89.
- Martí E. 2011. Estudio sobre el Aprovechamiento Integral de Biomasa Residual en Enguera. Trabajo Final de Carrera. Gandía. Escuela Politécnica Superior de Gandía. Universidad Politécnica de Valencia. Gandía. 84 p.
- Martin R. 1969. Characterization of southern pine barks. *Forest Products Journal* 19 (8): 23-30.
- Martin R, J Crist. 1968. Selected physical-mechanical properties of eastern tree barks. *Forest Products Journal* 18 (11): 54-60.
- Martín Pinto A, C Jiménez Shaw. 2011. la biomasa forestal: factores necesarios para el despegue de este sector *Revista Montes* 106: 27-31
- Martínez O. 1984. Análisis de la variación del espesor de corteza a lo largo del fuste en un rodal maduro de *Pinus radiata* D. Don. Tesis Ingeniería Forestal. Santiago. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile 80 p.
- Martínez García E, M Lucas, M Andrés, F López Serrano, F García Morote, A Del Cerro. 2010. Aprovechamiento energético de *Paulownia spp.* en el ámbito mediterráneo. *Ciencia Técnica* 102:5-11.

- Martínez Pastur G, P Peri, R Vukasovic, S Vaccaro, V Piriz Carrillo. 1997. Site index equation for *Nothofagus pumilio* Patagonian forest. *Phyton* 6(1/2):55–60.
- Marutzky R., Seeger K. (1999) *Energie aus Holz und anderer Biomasse*. DRW-Verlag. Leinfelden-Echterdingen
- Matissek, Reinhard; Schnepel, Frank M. y Steiner, Gabriele. 1998. Análisis de los alimentos: fundamentos, métodos, aplicaciones. Zaragoza, España: Editorial Acribia, S. A. pp. 297-302.
- McKenzie H. 1994. The kjeldahl determination of nitrogen: Retrospect and prospect *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 13:(4) 138-144.
- Meisen P, Krumpel S. 2009. El potencial de américa latina con referencia a la energía renovable. *Global Energy Network Institute (GENI)*. 83 p.
- Méndez J, A Santos, J Nájera, V González. 2006. Model for Estimating Volume and Biomass of Individual Trees of *Prosopis Glandulosa*, Variety Torreyana in Ejido. *Agrofaz* 6(2): 225-240.
- Merino A, MA Balboa, R Rodríguez Soalleiro, JG Álvarez González. 2005. Nutrient exports under different harvesting regimes in fast-growing forest plantations in southern Europe. *Forest Ecology and Management* 207: 325–339.
- Meya D, J González, A Aunós. 2001. Evolución del crecimiento radial en un rodal adulto de *Pinus nigra* Arn. de la provincia de Lleida. *Invest. Agr.: Sist. Recur. For.* Vol. 10 (1): 95-110.
- Moglia JG, AM Giménez, S Bravo. 2007. Tomo II *Macroscopia de Madera: Orientada a los estudiantes de Carpintería*. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero. 57p. (Serie didáctica Nº 20).
- Monllor C. 2012. Sistema de evaluación del potencial de extracción de biomasa forestal residual a partir de parámetros de estación definidos en la Provincia de Valencia. Trabajo Final de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. 75 p.
- Monteoliva S, V Ciganda, D Igartúa. 2012. Heartwood and sapwood content in *Eucalyptus globulus* and *Acacia melanoxylon* growing in Argentina. *Maderas. Ciencia y tecnología* 14 (1):53-63
- Moslemi A. 1974. Particleboard. I *Materials*. Southern Illinois University Press, 239 p.
- Moscovich A, Brena A. 2006. Comprobación de cinco métodos de muestreo forestal en un bosque nativo de *Araucaria angustifolia* Bert. O. Ktze. *Quebracho* 13: 7-16.

- Muñoz F. 2011. Experiencias en plantaciones dendroenergéticas. Seminario: la energía del futuro viene de los bosques. Colegio de Ingenieros Forestales del Maule. Talca, Chile. 40 p.
- Muszynski Z, J Mcnatt. 1984. Investigations on the use of spruce bark in the manufacture of particleboard in Poland. *Forest Products Journal*. 34 (1): 28-35.
- Näslund M. (1936/1937). "Die Durchforstungsversuche der forstlichen Versuchsanstalt Schwedens im Kiefernwald," *Meddelanden fran Statens Skogsforsknings Inst., Stockholm., Heft 29*, 121-169.
- Nicholas I, G Young, H Gifford. 1994. Wood properties of *Acacia melanoxylon*: variation within and between four seedlots. En Jones C, D Smith, H Gifford, I Nicholas. *Faces of farm forestry, proceedings of the Australian Forest Growers Conference, Launceston, Tasmania, Australia*. Australian Forest Growers, Braddon, ACT, Australia. 105–110 p.
- Obenberger I. 1997. Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschenbildender Elemente. *BBV-Verlag*. Graz. 350 p.
- Ogier J, D Ballerini, J Leygue, L Rigal, J Pourquoi. 1999. Ethanol production from lignocellulosic biomass. *De L 'Institut Français du Pétrole. Oil & Gas Science and Technology-Revue* 54 (1): 67-94.
- Oliver-Villanueva JV, G Becker. 1993. Verwendungsrelevante Holzeigenschaften der Esche (*Fraxinus excelsior* L.) und ihre Variabilität im Hinblick auf Alter und Standraum. *Forst und Holz* 48 (14): 387-391
- Oliver-Villanueva JV, M Quer, G Becker. 1996. Influence of structural parameters on the nondestructive evaluation of ash timber (*Fraxinus excelsior* L.) *Holz als Roh- und Werkstoff* 54: 109 -112.
- Oliver-Villanueva JV. 1993. Holzeigenschaften der Esche (*Fraxinus excelsior* L.) in Europa und ihre Variabilität im Hinblick auf Alter und Standraum (Características industriales de la madera de fresno y su variabilidad en dependencia de la edad y el espaciamiento). Tesis Doctoral. Universidad de Göttingen. Editorial Couvillier. Göttingen, Alemania. 198 p.
- Ojeda W. 1977. Inventario Forestal de los Bosques de la Comunidad de Irquis. Ministerio de Agricultura de Perú. 12p.
- Olesen PO. 1971. The Water Displacement Method, The Royal Veterinary and Agricultural University of Copenhagen, 18 p.

- Omote M, L Valenzuela. 2011. Variación radial y longitudinal de la densidad básica en árboles de *Eucalyptus regnans* de 16 años. Maderas, Ciencia y Tecnología 13(2): 211-224.
- ONU (Organización de Naciones Unidas). 2011b. The European Forest Sector Outlook Study II 2010-2030, Geneva Timber and Forest Special Paper - ECE/TIM/SP/28. Ginebra, Suiza. 111 p.
- Ortego J, Bonal R, Muñoz A. 2010. Genetic Consequences of Habitat Fragmentation in Long-Lived Tree Species: The Case of the Mediterranean Holm Oak (*Quercus ilex*, L.) Journal of Heredity 2010:101(6):717–726.
- Ortiz L, DJ Vega, R Dopazo. 2010. Manual de cultivos energéticos. Servicio de Publicaciones de la Univ. de Vigo. Escola de Enxeneria Forestal. 129 p.
- PANER. 2010. Plan de Acción Nacional de Energías Renovables de España. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Spain. 173 pp.
- Passialis C. 1985. Calorific value, inorganic constituents and moisture content of above ground biomass of forest plants dominating Maquis ecosystems. Scientific Annals, Department Forest Natural Environmental. Aristotelian University of Thessaloniki, KH (17): 515-531
- Passialis C, A Grigoriou. 1999. Technical properties of branch-wood of apple, peach, pear, apricot and cherry fruit trees European Journal of Wood and Wood Products. Holz als Roh- und Werkstoff 57: 41-44
- Pelen P, H Poblete, L Inzunza. 1998. Duramen y albura de Acacia melanoxylon como materia prima para tableros de partículas. Bosque 19(2): 29-36.
- Péllico Netto S, A Brena. 1997. Inventário florestal. Curitiba: UFP – UFSM, 316 p.
- Peredo M, Lizama C. 1993. Uso de Hidrófobos en la fabricación de tableros de partículas con residuos de cosecha forestal. Bosque 14 (1): 3 - 12
- Pereira H, J Pardos, AM Boudet, O Mitchell. 1996. Eucalypt plantations for production of raw-material for industry and energy in Europe. New York, USA. Ed. Pergamon. 84-89 p.
- Pérez V. 1983. Manual de propiedades físicas y mecánicas de las maderas que crecen en Chile. INFOR. 398 pp.
- Pérez P, Esteban L. 2004. Cuantificación de los recursos de biomasa forestal en la provincia de Soria y evaluación de alternativas para su aprovechamiento energético. Ciencia Técnica 75: 17-25.
- Pérez-Cruzado C, LM Rodríguez-Dacosta, E Fernández-Rivas, A Merino, R Rodríguez-Soalleiro. 2009. Diagramas de manejo de la densidad para plantaciones de *Eucalyptus nitens* Maid. en el norte de España con

- evaluación del carbono fijado en biomasa arbórea (Poster). 5º Congreso Forestal Español- Montes y sociedad: saber qué hacer. Ávila, España. 21-25 septiembre 2009. En: 2009. S.E.CF.-Junta de Castilla y León (eds.). Actas del 5º Congreso Forestal Español- Montes y Sociedad: Saber que hacer (Ref.:5CFE01-001): 1-13. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Pontevedra.
- Pérez Dueñas L. 2010 Bioenergías para la producción de electricidad: optimización económica. *Biomasa* 2 12:29. INFOPOWER. 4 p.
- Perpiña C, Alfonso D, A Pérez-Navarro. 2009. "Bioder Project: Biomass distributed energy resources assessment and logistic strategies for siting biomass plants in the Valencia Province (Spain)," Proceedings of the 17th European Biomass Conference and Exhibition on Research to Market Deployment, Hamburg, Germany.7 p.
- Peters S. 1996. Untersuchungen ueber die Holzeigenschaften der Stieleiche (*Quercus robur* L.) und ihre Beeinflussung durch die Bestandesdichte. Dissertation, Forstwissenschaftlicher Fachbereich, Universität Göttingen. ISBN3931986527. 235 pp.
- PGOF. 2003. Plan General de Ordenación Forestal de la Comunitat Valenciana Generalitat Valenciana. Conselleria de Medio Ambiente. Vol. 2003/43. Valencia. Spain.
- Pinchot Institute, 2010. A Guide to Forest Biomass Harvesting and Retention in Maryland. The Pinchot Institute. Maryland. USA. 25 p.
- Place T, T Maloney. 1975. "Thermal properties of drywood-bark multilayer boards", *Forest Products Journal* 25 (1): 33-39.
- PNW (Pacific Northwest Extension), 2010. Reducing Fire Risk on Your Forest Property. Oregon State University, University of Idaho, Washington State University. A Pacific Northwest Extension Publication. 41 p.
- Poblete H. 2001. Determinación de la estabilidad dimensional de tableros de fibras ante diferentes condiciones climáticas. Instituto de Tecnología de Productos Forestales. Universidad Austral de Chile. 1-6 p.
- Poblete H, E Roffael. 1985. Über chemische Veränderungen in Holzspänen bei der Herstellung von Harnstoff-Formaldehydharz gebundenen Spanplatten. *Holz als Roh- und Werkstoff* 43: 57-62.
- Poblete H, J Sánchez. 1991. Tableros con corteza de *Pinus radiata*. *Bosque* 12 (1): 17 – 26.

- Ponce M, R Cárdenas. 2004. Determinación de la importancia del consumo de Leña por el sector industrial de la decima región y Sus implicancias ambientales. 66 p. (Boletín Técnico Universidad de Santiago de Chile).
- Pontt C. 2008. Potencial de Biomasa en Chile. Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso, Chile. 74 p.
- Prada, A., Vázquez, M.J. y Soliño, M. (2006): Electricidad verde. La biomasa en los montes de Galicia. CIEF Centro de Investigación Económica y Financiera. Fundación Caixa Galicia.
- Prado J, S Barros. 1989. *Eucalyptus*: principios de silvicultura y manejo. INFOR/CORFO. Santiago, Chile. 199 p.
- Prodan M, Peters R, Cox F, Real P. 1997. Mensura forestal. Serie de investigación y evaluación en desarrollo sostenible. San José, Costa Rica. IICA, GTZ. 561 p.
- Puya N, D Tabara, J Bartroli Molins, J Bartroli Almera, J Rieradevall. 2008. Integrated Assessment of forest bioenergy systems in Mediterranean basin areas: The case of Catalonia and the use of participatory IA-focus groups. Renewable and Sustainable Energy Reviews 12: 1451–1464
- Quilho T, I Miranda, Pereira H. 2006. Within tree variation in wood fibre biometry and basic density of the urograndis eucalypt hybrid (*Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*). IAWA Journal 27 (3): 243-254.
- Quintanilla V. 2005. Estado de recuperación del bosque nativo en una cuenca nordpatagónica de Chile, perturbada por grandes fuegos acaecidos 50 años atrás (44º-45º S). Revista de Geografía Norte Grande, 34: 73-92.
- Ramanathan V, PJ Crutzen, J Lelieveld, AP Mitra, D Althausen. 2001. The Indian Ocean experiment: an integrated analysis of the climate forcing and effects of the Great Indo-Asian Haze. Journal Of Geophysical Research 106, 28371–28398. DOI:10.1029/2001JD900133
- Randall JM, E Hautala, Jr AC Waiss. 1974. Removal and recycling of heavy metal ions from mining and industrial waste streams with agricultutal by-products. In: Proceedings of the Fourth Mineral Waste Utilization Symposium. Chicago, USA. May 1974. pp. 329-334.
- Raveendran K, A Ganesh, KC Khilar. 1995. Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics. Fuel 74:1812-1822.
- Rebottaro S, D Cabrellia. 2007. Growth and commercial yield of *Pinus elliottii* in planting and natural regeneration managed with thinnings in Entre Ríos, Argentina. Bosque 28(2): 152-161 p.

- Reyes R, P Donoso, C Donoso, C Navarro. 2009. Crecimiento de renovales de *Drimys winteri* después de 16 años de aplicados distintos tratamientos de raleo en las cordilleras de Los Andes y de la Costa en Chile. *Bosque* 30(3): 117-126.
- Rhén C, M Öhman, R Gref, I Wästerlund. 2007. Effect of raw material composition in woody biomass pellets on combustion characteristics. *Biomass and Bioenergy* 31 (1): 66–72
- Riechmann J y J Sempere. 2003. Cuidar la Tierra: Políticas agrarias y alimentarias sostenibles para entrar en el siglo XXI. Barcelona, España. Icaria. 611 p.
- Rodà F, J Vayreda, M Ninyerola. 2009. 9340 Encinares de *Quercus ilex* y *Quercus rotundifolia*. En: VV.AA., Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España. Madrid. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. 94 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 de Compostela: Universidade. Servizo de Publicacións e Intercambio Científico. 128 p. ISBN 978-84-9887-319-1.
- Rodríguez-Soalleiro RC. 2010. Cultivos leñosos. Situación en Europa e Iberoamérica. I Congreso Ibérico de Biocombustibles. Pontevedra, España. Junio 2010.
- Rodríguez C, E Vergara. 2008. Propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Pinus canariensis* crecido en el secano de la Región del Maule, Chile. *Bosque* 29(3): 192-196.
- Roffael E, H Poblete, M Torres. 2000. Über die Acidität von Kern- und Splintholz der Kastanie (*Castanea sativa*) aus Chile. *Holz als Roh- und Werkstoff* 58 (1-2): 120-122.
- Roffael, E. 1993. The plant cell wall as a pattern for wood-based materials. Nature-oriented manufacture of particleboards and fibreboards. Schriften der Forstlichen Fakultät Nr. 113. Universität Göttingen.
- Rolle K. 2006. Thermodynamics. 6ª Ed. Pearson. México, Distrito Federal. 611 p.
- Rosillo-Calle F, P de Groot, SL Hemstock, J Woods. 2007. The biomass assessment handbook. Earthscan. London, UK. 276 p.
- Sabater S, A Elosegi, V Acuña, A Basaguren, I Muñoz, J Pozo. 2008. Effect of climate on the trophic structure of temperate forested streams. A comparison of Mediterranean and Atlantic streams. *Science of The Total Environment* 390 (2–3): 475–484.

- Sachs L. 1984. *Angewandte Statistik (practical statistics)*. Springer Verlag. SBN 3-540-12800-X. Berlin, Heidelberg, New York and Tokio.
- Sachsse H, JV Oliver-Villanueva. 1991. Physiological drying and natural conservation of blown down beech (*Fagus sylvatica* L.). *Forstarchiv* 62: 51-56.
- Salas C, M Reyes, C Bassaber. 2005. Medición de diámetros fustales con relascopio y forcípula finlandesa: efectos en la estimación de volumen. *Bosque* 26(2): 81-90.
- Sami M, K Annamalai, M Wooldridge. 2001. Co-firing of coal and biomass fuel blends *Progress. Energy and Combustion Science* 27: 171–214
- Sánchez E, W Camilo, S Ramirez. 2011. Biomass Energy and Environment. *Canadian Journal on Computing in Mathematics, Natural Sciences, Engineering and Medicine* 2 (8): 223-228.
- Sánchez S, AJ Moya, M Moya, I Romero, R Torrero. 2002. Aprovechamiento del residuo de poda del olivar. *Ingeniería Química* 34 (391): 194-202.
- Santelices R. 2005. Desarrollo de una plantación de *Eucalyptus globulus* establecida en primavera con diferentes tratamientos de riego. *Bosque* 26 (3): 105-112 p.
- Sanz F, G Piñeiro 2004. *Atlanwood: Proyecto de cooperación técnica para el desarrollo de las aplicaciones industriales de la madera de Pinus pinaster*. CIS Madera 13: 6-22
- Sauter uH. 1992. Technologische Holzeigenschaften der Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco als Ausprägung unterschiedlicher Wachstumsbedingungen. Inaugural – Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität zu Freiburg im Breisgau.
- Schlegel B, J Gayoso, J Guerra. 2000. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial: Manual de procedimientos: Muestreos. Proyecto FONDEF D98I1076. Ministerio de Educación de Chile. 26 p.
- Schomaker M, S Zanoch, K Stolte (1999) Tree crown condition indicator. USDA. Forest Service. Forest Health Monitoring Fact Sheet. 4 p.
- Schumacher FX, FS Hall, 1933. Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal Agriculture Resources* 47 (9): 719–734
- Seeling U. 1991. Abnorme Kernbildung bei Rotbuche und ihr Einfluss auf holzbiologische und holztechnologische Kenngrößen. Dissertation, Forstwissenschaftlicher Fachbereich, Universität Göttingen. 167 pp.

- Seeling, U. 1997. Die Robinie—nur ein Exot im deutschen Wald? Forst und Holz 52:81–86.
- SELA (Sistema Económico Latinoamericano y del Caribe). 2012. La visión de la economía verde en América Latina y el Caribe (SP/Di N° 01-12). SELA. Caracas, Venezuela. 55 p.
- Senelwaa K, Sims R, 1999. Fuel characteristics of short rotation forest biomass. Biomass and Bioenergy 17: 127-140
- Server R, A Mateos, N Lajara. 2009. Informe: Cuestiones referentes al sector citrícola más relevantes para la definición de la política de seguros agrarios: situación actual y tendencias a corto y medio plazo. Valencia, España. Centro de Investigación en Gestión de Empresas. Universitat Politècnica de València. 109 p.
- Serrada R, A San Miguel. 2008. Selvicultura en dehesas. Departamento de Silvopascicultura. Universidad Politécnica de Madrid. 22 p.
- Siostrzonek E. 1958. Radialzuwachs und Flächenzuwachs. Forstwissenschaftliches Centralblatt. 77:237-254 p
- Sixto H, MJ Hernández, M Barrio, J Carrasco, I Cañellas. 2007. Plantaciones del género *Populus* para la producción de biomasa con fines energéticos: revisión. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales 16(3): 277-294
- Sjöström E. 1993. Wood Chemistry: fundamentals and applications. California, USA. 2ª ed. Academic Press Inc. 292 p.
- Smeets E, A Faaij, I Lewandowski, W Turkenburg. 2007. A Bottom-up Assessment and Review of Global Bio-energy Potentials to 2050. Progress in Energy and Combustion Science 33: 56– 106.
- Sobhani M, A Khazaeian, T Tabarsa, A Shakeri. 2011. Evaluation of Physical and Mechanical Properties of Paulownia Wood Core and Fiberglass Surfaces Sandwich Panel Key Engineering Materials Vols. 471-472: 85-90
- Spinelli R, C Nati. 2007. Woody Biomass Production from agricultural land in Italy. IEA Bioenergy Task 30 Workshop. Short Rotation Crops for Bioenergy Systems 12-17 August 2007. University of Guelph. Ontario, Canadá. 22 p.
- Spinelli R, B Hartsough, N Magagnotti, M Secknus, G Nocentini. 2008 –Developing the forestwood- energy chain through the reinforcement of forest owner associations. GAL Prealpi e Dolomiti, Sedico (BL), 222 p.
- Spurr SH. 1952. Forest inventory. New York, USA. Ronald Press. 476 p.

- Suárez-García F, A Martínez-Alonso, M Fernández-Llorente, JMD Tarascon. 2002. Inorganic matter characterization in vegetable biomass feedstocks. *Fuel* 81: 1161-1169.
- Sud and Department of Health and Senior Services. 2008. Health effects of toxic heavy metals. State New Jersey, USA (2011). 25 p.
- Suchsland, O. y Woodson, GE. 1987. Fiberboard Manufacturing Practices in the United States. Agricultural handbook nº. 640 Washington, DC: US Department of Agriculture, Forest Service.
- Susmel L, F Viola, G Bassalo. 1976 Ecologie della Lecceta del Supramonte di Orgosolo. (Sardegna Centro-orientale). *Analisi de Centro di Economia Montana delle Venezie* 10: 1-216.
- Tolosana E, R Laina. 2010. Maquinaria y Equipamiento el Aprovechamiento Energético de Biomasa Forestal. I Congreso Ibérico de Biocombustibles. Pontevedra, 21-23 Junio 2010. Universidad de Vigo. Pontevedra, España.
- Tolosana E. 2009. Manual técnico para el aprovechamiento y elaboración de biomasa forestal. Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Montes, Universidad Politécnica de Madrid. 348 p.
- Tolosana E, Y Ambrosio Torrijos, R Laina Redaño, R Martínez Ferrari. 2008. Sistemas de aprovechamiento de biomasa en Castilla y León. *Boletín del CIDEU* 5: 97-106.
- Tomazello M. 1985. Variacao radial da densidade básica e da estrutura anatomica da madeira do *Eucalytus saligna* e *E. grandis*. *IPEF* 29: 37-45.
- Torres-Álvarez O, F Peña-Cortés. 2011. Zonificación del potencial energético de la biomasa residual forestal en la cuenca del lago Ranco, Chile. *Antecedentes para la planificación energética regional. Bosque* 32(1): 77-84.
- Torres Duque C. 2008. Biomass fuels and respiratory diseases. *Proceedings of The American Thoracic Society* 15: 577–590.
- Torres Rojo JM. 2004. Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina al año 2020. Roma, Italia. SEMARNAT/FAO. 104 p.
- Trincado G, K Gadow, V Sandoval. 1997. Estimación de volumen comercial en latifoliadas. *Bosque* 18(1): 39-44.
- Tsoumis G. *Science and Technology of Wood*. Edit. Van Nostrand Reinhold. New York, USA. 1982. 500 p.
- Turn SQ, CM Kinoshita, DM Ishimura, J Zhou. The fate of inorganic constituents of biomass in fluidized bed gasification. *Fuel* 1998 (77): 135-146.

- VAERSA. 2007. Guía para la planificación preventiva en la interfaz urbano-forestal. Generalitat Valenciana. Conselleria de Medi Ambient, Aigua, Urbanisme i Habitatge. 64 p
- Vamvuka D, S Sfakiotakis. Combustion behaviour of biomass fuels and their blends with lignite. *Thermochimica Acta* 526 (1–2):192–199
- Vanclay J. 1994. Modeling Forest Growth and Yield: Applications to Mixed Tropical Forest. London, England. CAB International. 312 p.
- Vannice MA. 2005. Kinetics of Catalytic Reactions. Department of Chemical Engineering. The Pennsylvania State University. Pennsylvania, USA. 256 p.
- Van Riet C, K Wijnendaele, E Varga. 2004. Utilización Sostenible de la Madera para la Fabricación de Productos y Obtención de Energía: ¿Conflicto u Oportunidad?. *CIS-Madera* 12: 53-61
- Vega D, R Dopazo, L Ortiz. 2008. Woody energy crop plantations management and breeding for increasing biomass productivity. Congreso World Bioenergy 26-30 Mayo. Jönköping, (Sweeden). 5 p.
- Verani S, Nati C., Spinelli R., Nocentini L. 2008 Meccanizzazione avanzata in bosco ceduo. Analisi tecnica di due cantieri. [Advanced Mechanization to utilize forest coppice. Technical analysis of two sites]. *Sherwood Compagnia delle Foreste, Arezzo*. 144: 41-46 In Italian
- Viejo Montesinos JL, F Molino Olmedo, J Martín Martín. 1996. Variación del contenido en carbono y nitrógeno a lo largo del proceso de putrefacción de la madera de *Quercus*, *Pinus* y *Abies* en Andalucía. Tomo Extraordinario, 125 Aniversario de la RSEHN. *Boletín de la Real Sociedad de Historia Natural*: 455–458.
- Vignote Peña S, I Martínez Rojas. 2006. Tecnología de la madera 3ª Edición. Ed. Mundi-Prensa Libros. Madrid. 200 p.
- Vilaseca i Pradós C. 2010. Aprovechamiento energético de la biomasa. En Cataluña, tocar hierro y no madera. *Apropellets* 231-24.
- Villena J. 2003. Calidad de la madera de *Eucalyptus globulus* sp. *globulus* como materia prima para la industria pastero-papelera. En I Simposio Iberoamericano *Eucalyptus globulus*. Montevideo, Uruguay, 30-31 mayo de 2003. 25-35 p.
- Vital B, W Kehmann, R Boone. 1974. How species and board densities affect properties of exotic hardwood particleboards. *Forest Products Journal* 24 (12): 33-45 p.

- Voivontas D, D Assimacopoulos, EG Koukios. 2001. Assessment of biomass potential for power production: a GIS based method. *Biomass and Bioenergy* 20 (2): 101-112.
- Von Wilpert, K. (2008) Waldbauliche Steuerungsmöglichkeiten des Stoffhaushalts von Waldökosystemen – am Beispiel von Buchen- und Fichtenvarianten der Conventwald – Fallstudie. Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung. Band 40. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. Freiburg. 238 pp.
- Voulgaridis E, C Passialis. 1993. Characteristics and technological properties of the wood of Mediterranean evergreen hardwoods. *Foret Mediterraneenne* 16(1): 3-12
- Vries BJM, DP van Vuuren, MM Hoogwijk. 2007. Renewable Energy Sources: Their Global Potential for the First-Half of the 21st Century at a Global Level: An Integrated Approach. *Energy Policy*, 35: 2590-2610.
- Wauquier JP. 2004. Le raffinage du pétrole. Paris, France. Technip. 449 p.
- Waring R. 1983. Estimating forest growth and efficiency in relation to canopy leaf area. *Advances in Ecological Research* 13: 327-354.
- Wobst J. 1995. Auswirkungen von Standortwahl und Durchforstungsstrategie auf verwertungsrelevante Holz-eigenschaften der Douglasie (*Pseudotsugamenziesii* (Mirb.) Franco. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades des Forstwissenschaftlichen Fachbereichs der Georg-August-Universität Göttingen.
- Yavuz H. 1999. Comparison of the Centroid Method and Four Standard Formulas for Estimating Log Volumes. *Tr. J. of Agriculture and Forestry* 23 (1999) 597-602.
- Yorgun S, N Vural, H Demiral. 2009. Preparation of high-surface area activated carbons from Paulownia Wood by ZnCl<sub>2</sub> activation. *Microporous and Mesoporous Materials* 122: 189–194
- Zobel BJ, JT Talbert. 1988. Técnicas de mejoramiento genético de árboles Forestales. Edit. Limusa. DF, México. 545 p.
- Zobel BJ, JB Jett. 1995. Genetics of wood production. Springer-Verlag, Berlin. Germany. 337 p.
- Zobel, BJ, Van Buijtenen JP. 1989. Wood variation: Its causes and control. Springer-Verlag. Berlín, Germany. 363 p
- Zhao-Hua Z, X Yao Guo, L Xin-Yu. 1986. Paulownia in China: cultivation and utilization. The Chinese Academy of Forestry Beijing. China. Published by

Asian network for biological sciences and International development research centre. 74 p.

INTERNET

AEBIOM (European Biomass Association). 2007. Pellets for small-scale domestic heating systems. Consultado 5 abril 2012. Disponible en <http://www.aebiom.org/wp-content/uploads/file/Publications>

AEBIOM 2009. Energy crops in arable lands. Booklet. Consultado 5 de septiembre 2012. Disponible en <http://nuke.biomassradecentres.eu/Portals/0/D2.2.1%20SRC%20Practical%20booklet%20EN%20AEBIOM.pdf>

AIDIMA. 2011. Ecoboletín nº 38. Consultado 25 de junio. 2012. Disponible en [http://www.aidima.es/aidimainforma/ecoboletines/ecoboletin\\_38.htm](http://www.aidima.es/aidimainforma/ecoboletines/ecoboletin_38.htm)

AVEBIOM (Asociación Española de Valorización de la Biomasa). 2010. Residuos de madera : materia prima industrial o biomasa energética?. Consultado 21 julio 2012. Disponible en <http://www.goforwood.info/fr/news.php?id=31956> / [www.avebiom.es](http://www.avebiom.es)

APPA (Asociación de Productores de Energías Renovables). 2009. Estudio del Impacto Macroeconómico de las Energías Renovables en España. Consultado 21 julio 2012. Disponible en [http://www.appa.es/descargas/InformeAppa\\_web.pdf](http://www.appa.es/descargas/InformeAppa_web.pdf)

APPA. 2010. Análisis Sectorial. Área de la Biomasa. Consultado 5 diciembre 2010. Disponible en <http://www.appa.es/11comunicacion/11articulos2010.php>

Baquero J, Moreno MJ. 2007. La biomasa como fuente de energía renovable. Consultado 24 enero 2011. Disponible en <http://usuarios.multimania.es/arquinstal03/publicaciones/otras/bib755labiomasa.comofuentedeenergiarenovable.pdf>.

Bracmort K, Gorte RW. 2012. Biomass: Comparison of Definitions in Legislation Through the 111th Congress Congressional Research Service, USA. Consultado 27 septiembre 2012. Disponible en: [www.crs.gov](http://www.crs.gov).

CREAF- DMAH (Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals - Direcció General del Medi Natural del Departament de Medi Ambient i Habitatge de la Generalitat de Catalunya). 2011. Sistema d'Informació dels Boscos de Catalunya (SIBosc). Consultado 5 marzo 2012. Disponible en <http://www.creaf.uab.es/sibosc/>

(CE) COMISIÓN EUROPEA. 1997. Energía para el futuro: fuentes de energía renovables  
Libro Blanco para una Estrategia y un Plan de Acción Comunitario. Consultado 18 de octubre 2012. Disponible en [http://europa.eu/documents/comm/white\\_papers/pdf/com97\\_599\\_es.pdf](http://europa.eu/documents/comm/white_papers/pdf/com97_599_es.pdf)

CONICYT (Corporación Nacional de Ciencia y Tecnología de Chile). 2012. Programas de Fomento a la Investigación y Desarrollo. Consultado 18 de septiembre 2012. Disponible en <http://www.conicyt.cl/573/channel.html>

Contreras S. 2004. Reacciones químicas. Escuela venezolana para la enseñanza de la química. Consultado 30 de febrero 2011. Disponible en <http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/16710/1/reacciones.pdf>

CDB (Convenio sobre la diversidad biológica). 2010. Guía de buenas prácticas gestión forestal sostenible, biodiversidad y medios de vida. Consultado 15 de noviembre de 2010. Disponible en <http://www.cbd.int/development/doc/cbd-guide-des-bonnes-pratiques-forests-web-es.pdf>.

COSE (Confederación de Organizaciones de Selvicultores de España). 2012. El asociacionismo forestal y la biomasa para uso energético. Jornadas de Agrupación de Propietarios Forestales. Consultado el 27 de septiembre 2012. Disponible en [www.silvicultor.net](http://www.silvicultor.net).

CONAMA 10. 2010: Situación actual de la biomasa y tendencias de futuro. Documento del Grupo de Trabajo nº 24 de CONAMA 10. Consultado 5 julio 2012. Disponible en [http://www.conama10.es/web/generico.php?idpaginas=&lang=es&menu=87&op=view&id=62&from=view\\_documentos](http://www.conama10.es/web/generico.php?idpaginas=&lang=es&menu=87&op=view&id=62&from=view_documentos)

CONFEMADERA. 2009. Madera, una apuesta por la sostenibilidad. Consultado 24 octubre 2012. Disponible en [http://www.transportarconmadera.com/resources/image/TCM\\_Hispack\\_Medioambiente09.pdf](http://www.transportarconmadera.com/resources/image/TCM_Hispack_Medioambiente09.pdf)

Diputació de Barcelona. 2009. Plan Estratégico de Biomasa Forestal de la ADF Montseny Ponent Consultado 15 junio 2012. Disponible en [http://www.ctfc.es/infobio/det\\_noticies.asp?id=ADF\\_Montseny40066&lln=esp](http://www.ctfc.es/infobio/det_noticies.asp?id=ADF_Montseny40066&lln=esp)

EPA (Environmental Protection Agency, USA). 2012. Report to Congress on Black Carbon. Department of the Interior, Environment, and Related Agencies Appropriations Act. USA. Consultado 15 Junio 2012. Disponible en <http://www.epa.gov/blackcarbon/2012report/Cover.pdf>

ENERSILVA. 2008. Promoción del uso de la biomasa forestal 2004|2007 con fines energéticos en el suroeste de Europa. Consultado 25 septiembre 2012. Disponible en [www.usse.es/fr/Telecharger-document/504-Enersilva-Espanol](http://www.usse.es/fr/Telecharger-document/504-Enersilva-Espanol)

EOI (Escuela de Organización Industrial). 2012. Perspectivas de desarrollo de las energías renovables en América, tecnología y regulación. Consultado 12 octubre 2012. Disponible en <http://www.eoi.es/blogs/alvarorodero/>

Euroserv'er. 2011. Solid Biomass Barometer. Comisión Europea. Consultado 22 mayo 2012. Disponible en <http://www.euroserv-er.org/downloads.asp>

FAO. 2002. The state of food and agriculture. Consultado 22 octubre 2012. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/MEETING/007/J0385e/J0385e00.HTM>

FAO. 2011a. Joint Wood Energy Enquiry. Consultado 3 junio 2012. Disponible en <http://www.unece.org/forests/jwee.html>

FAO. 2011b. Situación de los bosques en el mundo. Consultado 3 abril 2012. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/013/i2000s/i2000s.pdf>

FAOSTAT. 2012. Estadísticas FAO por país. Consultado 17 octubre de 2012. Disponible en <http://faostat.fao.org/>

GEMA (Servicios Geográficos y de Medio Ambiente). 2011. EIA prospección sísmica 3d y perforación de veintiún (21) pozos exploratorios – lote 39 (Capítulo 5)

320 p. Consultado 14 Noviembre de 2011. Disponible en <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGGAE/ARCHIVOS/estudios/EIAS%20hidrocarburos/EIA/EIA%20REPSOL%20LOTE%2039/CAP.%205%20PMA%20LOTE%2039.pdf>

GEODEM. 2008 manual para el Aprovechamiento energético de la biomasa forestal. Consultado 14 septiembre de 2012. Disponible en [http://www.geodem.es/PDFs/MANUALES\\_CASTELLANO/M\\_Biomasa.pdf](http://www.geodem.es/PDFs/MANUALES_CASTELLANO/M_Biomasa.pdf)

Gobierno de España. 2012. Planificación energética indicativa y plan de energías renovables a 2020. Consultado 17 octubre de 2012. Disponible en [http://www.lamoncloa.gob.es/consejodeministros/referencias/\\_2011/refc20111111.htm](http://www.lamoncloa.gob.es/consejodeministros/referencias/_2011/refc20111111.htm)

González J. 2008. Centrales de calefacción y electricidad a partir de biomasa. Consultado 7 septiembre de 2012. Disponible en [http://centrodeinvestigacionlaorden.gobex.es/archivos/Calefaccion\\_y\\_electricidad\\_a\\_partir\\_de\\_biomasa.pdf](http://centrodeinvestigacionlaorden.gobex.es/archivos/Calefaccion_y_electricidad_a_partir_de_biomasa.pdf)

GTZ. 2008. Potencial de generación de energía por residuos del manejo forestal en Chile. 56 p. Consultado 26 Noviembre de 2011. Disponible en [http://www.geodem.es/PDFs/MANUALES\\_CASTELLANO/M\\_Biomasa.pdf](http://www.geodem.es/PDFs/MANUALES_CASTELLANO/M_Biomasa.pdf).

IDAE. 2011. Plan de Ahorro y Eficiencia Energética. Consultado 27 septiembre 2012. Disponible en [http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos\\_s\\_11905\\_PAEE\\_2011\\_2020\\_A2011\\_A\\_a1e6383b.pdf](http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_s_11905_PAEE_2011_2020_A2011_A_a1e6383b.pdf)

IDAE. 2012. Área Tecnológica: Biomasa y Residuos. Mapa Tecnológico: Calor y Frío Renovables Observatorio Tecnológico de la Energía. Consultado 27 septiembre 2012. Disponible en [http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos\\_s\\_Calor\\_y\\_Frio\\_Renovables\\_Biomasa\\_11012012\\_global\\_v2\\_09570f12.pdf](http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_s_Calor_y_Frio_Renovables_Biomasa_11012012_global_v2_09570f12.pdf).

IEA. 2004. Biofuels for Transport: An International Perspective. Consultado 11 enero de 2012. Disponible en [http://www.iea.org/press/pressdetail.asp?PRESS\\_REL\\_ID=127](http://www.iea.org/press/pressdetail.asp?PRESS_REL_ID=127)

IEA. 2007. IEA Bioenergy Task 33: Thermal Gasification of Biomass. Presentation to ExCo 59 in Golden, Colorado. April 25-27. Consultado 17 septiembre 2012. Disponible en

[http://www.ieatask33.org/app/webroot/files/file/publications/IEA\\_BRU\\_11-07.pdf](http://www.ieatask33.org/app/webroot/files/file/publications/IEA_BRU_11-07.pdf)

IEA. 2009a. Bioenergy – a Sustainable and Reliable Energy Source. Consultado 11 septiembre 2012. Disponible en <http://www.ieabioenergy.com/LibItem.aspx?id=6479>

IEA 2009b. Electricity/Heat in Chile. Consultado 11 octubre de 2011. Disponible en [http://www.iea.org/stats/countryresults.asp?COUNTRY\\_CODE=CL&Submit=Submit](http://www.iea.org/stats/countryresults.asp?COUNTRY_CODE=CL&Submit=Submit)

IFN-3 (Tercer Inventario Forestal Nacional). 1997-2007. “Tercer inventario Nacional Forestal”. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España. Consultado 10 Noviembre de 2011. Disponible en <http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza>

INE Chile (Instituto Nacional de Estadísticas) 2008. Distribución y consumo energético en Chile. Consultado 11 octubre de 2011. Disponible en [www.ine.cl](http://www.ine.cl)

INE España (Instituto Nacional de Estadísticas) 2010. Censo Agrario 2009. Consultado 01 septiembre de 2010. Disponible en [www.ine.es](http://www.ine.es)

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1996, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático: Tecnologías, políticas y medidas para mitigar el cambio climático. Consultado 25 agosto 2012. Disponible en <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/srtp-sp.pdf>

IPCC. 2005. La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Consultado 10 julio de 2010. Disponible en [http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs\\_spm\\_ts\\_sp.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_spm_ts_sp.pdf)

IPCC. 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change, Mitigation of Climate Change. Working group III, Chapter 4 of the 4th Assessment report. Consultado 14 diciembre 2011. Disponible en <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4-wg3-chapter4.pdf>

JRC (Joint Research Centre). 2006. Tree species maps - dominant species distribution. Consultado 14 diciembre 2011. Disponible en <http://forest.jrc.ec.europa.eu/distribution>

- Kasamaki P. 2007. La *Paulownia spp.* como base de los cultivos energéticos. Consultado 8 mayo 2011. Disponible en <http://www.vicedex.com/pdf/paulownia.pdf>.
- López J, L Parisi, L Harrand. 2003. Densidad de la madera de tres huertos semilleros de progenies de *Eucalyptus grandis*. Consultado 24 junio 2011. Disponible en <http://www.sagpya.mecom.gov.ar/new/Oforestacion/pdf/2003/posters03/210%20Lopez%20parisi%20poster%203%20HUERTOS%20SEMILLEROS.pdf>
- MARM (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino). 2007. “Encuesta sobre plantaciones frutales”. Consultado 2 julio 2011. Disponible en <http://www.mapa.es/estadistica/pags/encuestafrutales/resultados.htm>
- MARM (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino). 2010. Estimación del potencial de bioenergía de la agricultura compatible con el medio ambiente Consultado 2 octubre 2012. Disponible en [http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/EstimacionPotencialEnergia\\_tcm7-1882.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/EstimacionPotencialEnergia_tcm7-1882.pdf)
- Ministerio de Energía de Chile. 2011. Balances energético 2002-2010. Consultado 2 julio 2012. Disponible en <http://www.cne.cl/estadisticas/balances-energeticos>
- Noguera. 2008. Cubicaje. Consultado 19 de octubre 2012. Disponible en <http://www.nogueranaturalmente.com/2008/07/el-cubicaje-de-pinos-silvestres.html>
- OECD/IEA, 2007. Renewables for heating and cooling. Consultado 3 octubre 2012. Disponible en [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Renewable\\_Heating\\_Cooling\\_Final\\_WEB-1.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Renewable_Heating_Cooling_Final_WEB-1.pdf)
- ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias de Chile) 2012. Frutales: superficie y producción. Ministerio de Agricultura. Consultado 1 junio de 2012. Disponible en <http://www.odepa.gob.cl/articulos/MostrarDetalle.action?idn=1737&idcla=12>
- ONU. 2011a. UNFF9: Forests for people, livelihoods and poverty eradication,” held at the United Nations headquarters. New York, USA. from 24 January to 4 February 2011. Consultado 14 junio 2012. Disponible en <http://www.un.org/esa/forests/pdf/publications/CBFM.pdf>

PATFOR 2011. Plan de Acción Territorial Forestal de la Comunitat Valenciana. Generalitat Valenciana. Conselleria de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente. Vol. 2012/2902. Valencia. Spain. Consultado 15 noviembre 2010. Disponible en <http://www.cma.gva.es/web/indice.aspx?nodo=73626&idioma=C>.

PBCyL (Plan Regional de Ámbito Sectorial de la Bioenergía de Castilla y León). 2010. Consultado 24 agosto 2011 Disponible en [http://www.itacyl.es/opencms\\_wf/opencms/system/modules/es.jcyl.ita.extranet/elements/galleries/galeria\\_downloads/administracion/PBCyL\\_DocumentoPrincipa\\_l\\_12012011.pdf](http://www.itacyl.es/opencms_wf/opencms/system/modules/es.jcyl.ita.extranet/elements/galleries/galeria_downloads/administracion/PBCyL_DocumentoPrincipa_l_12012011.pdf).

PIE. 2011. Plan de Infraestructuras Estratégicas de la Comunidad Valenciana 2010-2020. Consultado 24 septiembre 2012. Disponible en <http://www.cit.gva.es/cast/iniciativas-y-proyectos/plan-infraestructura/>

PROFORBIOMED. 2012. Proyecto MED de Promoción de la Biomasa Residual Forestal en la Cuenca Mediterránea. Programa MED de la UE. Consultado 24 septiembre 2012. Disponible en [www.proforbiomed.eu/es](http://www.proforbiomed.eu/es)

PROCHILE (Promoción de Exportaciones de Chile). 2009. "Análisis de las exportaciones chilenas 2009". Consultado 24 noviembre 2010. Disponible en [www.prochile.cl/.../ analisis\\_exportaciones\\_chilenas\\_2009.pdf](http://www.prochile.cl/.../ analisis_exportaciones_chilenas_2009.pdf)

Programa Chile Sustentable. 2012. La Necesidad y Urgencia de Un Plan Nacional de Acción de Eficiencia Energética para Chile Consultado 24 noviembre 2010. Disponible en <http://www.chilesustentable.net/category/publicaciones/energia-y-proteccion-del-clima/>

REMUFOR (Red Española de Municipios Forestales). 2011. Nuevos modelos de simulación en la ordenación y gestión forestal basados en la subsidiariedad como foco de desarrollo sostenible de las sociedades rurales: aplicaciones prácticas del sistema de pagos por servicios ambientales. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 42 p. Consultado 1 marzo 2012. Disponible en <http://www.remufor.es/>

Ren21. 2011. Renewables 2011: Global Status Report. Consultado 18 julio 2012. Disponible en [http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/REN21\\_GSR2011.pdf](http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/REN21_GSR2011.pdf)

SNCL (Sistema Nacional de Certificación de Leña - Chile) 2009. Lineamientos para una política dendroenergética. In: V cumbre de la leña. Castro. Abril de 2009. Consultado 14 julio de 2012. Disponible en <http://www.lena.cl>

TFD (The Forests Dialogue) 2008. Más allá de las iniciativas de REDD La función de los bosques en el cambio climático. Consultado 14 septiembre 2012. Disponible en [www.theforestsdialogue.org](http://www.theforestsdialogue.org)

UNIDO (Observatory for Renewable Energy in Latin America and the Caribbean). 2010. LAC Energy balances. Consultado 14 julio de 2012. Disponible en <http://www.renenergyobservatory.org/statmaps/index.html>

USDE. 2012. Biomass Program. U.S. Department of Energy. Washington DC. Consultado 2 septiembre 2012. Disponible en <http://www1.eere.energy.gov/biomass/>

WRI (World Resources Institute). 2005. EarthTrends: The environmental information Portal. Consultado 2 mayo 2012. Disponible en <http://earthtrends.wri.org>

WWF. 2005. Incendios forestales: ¿Por qué se queman los montes españoles?. Madrid, España. 50 p. Consultado 1 diciembre 2010. Disponible en [http://assets.wwfspain.panda.org/downloads/incendios\\_20051\\_1.pdf](http://assets.wwfspain.panda.org/downloads/incendios_20051_1.pdf)

- AKATA Group. 2011. Comunicación oral. Copenhage, Denmark. 5 de octubre de 2011.

NORMAS TÉCNICAS

**Biocombustibles sólidos:**

1. CEN/TS 14774 Métodos para la determinación del contenido de humedad.  
Método de secado en estufa.
2. CEN/TS 14775 Método para la determinación del contenido de ceniza.
3. CEN/TS 14918 Determinación del poder calorífico.
4. CEN/TS 14961-2 Especificaciones y clases de combustibles.
5. CEN/TS 14961 Especificaciones y clases de combustibles.
6. CEN/TS 15234 Aseguramiento de la calidad del combustible.

**Tableros de partículas:**

1. EPF - industria del tablero.
2. DIN 68763

LEYES Y NORMATIVAS

**1. NORMATIVA COMUNIDAD EUROPEA**

DIRECTIVA 2009/28/UE del Parlamento Europeo y del Consejo. Fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE. Publicado en Diario Oficial de la Unión Europea, núm. L 140/16 de 5/06/2009.

**2. NORMATIVA ESPAÑOLA**

- Ley 54/1997 del Sector Eléctrico. Publicado en Boletín Oficial del Estado, núm. 285 de 28 de noviembre de 1997.

- Ley 2/2011 de Economía Sostenible. Publicado en Boletín Oficial del Estado, núm. 55 de 5/03/2011.
- Real Decreto 1274/2011 Plan estratégico del patrimonio natural y de la biodiversidad 2011-2017, en aplicación de la Ley 42/2007. Publicado en Boletín Oficial del Estado, núm. 236 de 30/09/2011.

### **3. COMUNIDAD VALENCIANA**

Orden 2008/10625 por la que se aprueban las bases reguladores de un régimen de primas para la puesta en valor de la biomasa forestal residual en terrenos forestales de la Comunidad Valenciana. Publicado en DIARI OFICIAL DE LA CUNITAT VALENCIANA, Nú 5850 de 26/09/2008.

### **4. NORMATIVA CHILENA**

Ley 20365 de Franquicia tributaria respecto de sistemas solares térmicos. Publicado en Boletín Oficial del Estado el 19/08/2009.

**ANEXOS**



## ANEXO 1.

## DATOS DE LAS PARCELAS REPRESENTATIVAS SELECCIONADAS PARA ESTE ESTUDIO.



Figura 65. Mapa de zonas seleccionadas para el muestreo para cada especie estudiada en la Comunidad Valenciana.

## 1. Especie forestal mediterránea

### **Parcela 1:**

#### Datos generales

Especie: *Quercus ilex*

Localidad: Morella

Coordenadas: 745,652 E / 4.517,893 N

Altitud: 1.038 m s.n.m

#### Datos de la plantación

Secano: X

Marco de plantación: 3.300 arb/ha

Regadío: \_\_\_\_

Año de plantación o edad del rodal: 30 a  
50 años

### **Parcela 2:**

#### Datos generales

Especie: *Quercus ilex*

Localidad: Morella

Coordenadas: 744,977 E / 4.517,116 N

Altitud: 985 m s.n.m

#### Datos de la plantación

Secano: X

Marco de plantación: 3.400 arb/ha

Regadío: \_\_\_\_

Año de plantación o edad del rodal: 30 a  
50 años

**Parcela 3:**

Datos generales

Especie: *Quercus ilex*

Localidad: Morella

Coordenadas: 745,827 E / 4.507,214 N

Altitud: 1.005 m s.n.m

Datos de la plantación

Secano: X

Marco de plantación: 3.100 arb/ha

Regadío: \_\_\_\_

Año de plantación o edad del rodal: 30 a 50 años

**Parcela 4:**

Datos generales

Especie: *Quercus ilex*

Localidad: Morella

Coordenadas: 746,179 E / 4.511,481 N

Altitud: 1.031 m s.n.m

Datos de la plantación

Secano: X

Marco de plantación: 3.000 arb/ha

Regadío: \_\_\_\_

Año de plantación o edad del rodal: 30 a 50 años

**Parcela 5:**

Datos generales

Especie: *Quercus ilex*

Localidad: Morella

Coordenadas: 747,975 E / 4.516,588 N

Altitud: 1.131 m s.n.m

Datos de la plantación

Secano: X Regadío: \_\_\_\_  
Marco de plantación: 3.200 arb/ha Año de plantación o edad del rodal: 30 a 50 años

**2. Cultivo energético leñoso**

***Parcela 1:***

Datos generales

Especie: *Paulownia spp.*  
Localidad: Requena Altitud: 689 m s.n.m  
Coordenadas: 663,057 E / 4.372,179 N

Datos de la plantación

Secano: \_\_\_\_ Regadío: X  
Marco de plantación: 1890 arb/ha Año de plantación o edad del rodal: 6 meses

***Parcela 2:***

Datos generales

Especie: *Paulownia spp.*  
Localidad: Requena Altitud: 712 m s.n.m  
Coordenadas: 658,956 E / 4.376,975 N

Datos de la plantación

Secano: \_\_\_\_ Regadío: X  
Marco de plantación: 1890 arb/ha Año de plantación o edad del rodal: 6 meses

**Parcela 3:**

Datos generales

Especie: *Paulownia spp.*  
Localidad: La Safor-Miramar Altitud: 14 m s.n.m  
Coordenadas: 747,364 E / 4.315,244 N

Datos de la plantación

Secano: \_\_\_\_ Regadío: X  
Marco de plantación: 1196 arb/ha Año de plantación o edad del rodal: 12 meses

**Parcela 4:**

Datos generales

Especie: *Paulownia spp.*  
Localidad: La Safor-Piles Altitud: 12 m s.n.m  
Coordenadas: 748,285 E / 4.314,022 N

Datos de la plantación

Secano: \_\_\_\_ Regadío: X  
Marco de plantación: 785 arb/ha Año de plantación o edad del rodal: 12 meses

### 3. Cultivos agrícolas leñosos

#### 3.1 *Citrus sinensis*

##### **Parcela 1,2,3:**

###### Datos generales

Especie: *Citrus sinensis*

Localidad: Carlet

Altitud: 63 m s.n.m

Coordenadas: 748,285 E / 4.314,022 N

###### Datos de la plantación

Secano: \_\_\_\_

Regadío: X

Marco de plantación: 594 arb/ha

Año de plantación o edad del rodal: \_\_\_\_\_

Secano: \_\_\_\_

Regadío: X

Marco de plantación: 556 arb/ha

Año de plantación o edad del rodal: \_\_\_\_\_

Secano: \_\_\_\_

Regadío: X

Marco de plantación: 578 arb/ha

Año de plantación o edad del rodal: \_\_\_\_\_

##### **Parcela 4:**

###### Datos generales

Especie: *Citrus sinensis*

Localidad: Gandía

Altitud: 110 m s.n.m

Coordenadas: 740,292 E / 4.318,363 N

###### Datos de la plantación

Secano: \_\_\_\_

Regadío: X

Marco de plantación: 568 arb/ha

Año de plantación o edad del rodal: \_\_\_\_\_

**Parcela 5:**

Datos generales

Especie: *Citrus sinensis*

Localidad: Gandía

Altitud: 138 m s.n.m

Coordenadas: 739,477 E / 4.317,952 N

Secano: \_\_\_\_

Regadío: X

Marco de plantación: 526 arb/ha

Año de plantación o edad del rodal: \_\_\_\_\_

**Parcela 6:**

Datos generales

Especie: *Citrus sinensis*

Localidad: Gandía

Altitud: 134 m s.n.m

Coordenadas: 739,666 E / 4.317,359 N

Secano: \_\_\_\_

Regadío: X

Marco de plantación: 545 arb/ha

Año de plantación o edad del rodal:  
\_\_\_\_\_

**Parcela 7:**

Datos generales

Especie: *Citrus sinensis*

Localidad: Gandía

Altitud: 121 m s.n.m

Coordenadas: 739,427 E / 4.317,162 N

Secano: \_\_\_\_ Regadío: X  
Marco de plantación: 540 arb/ha Año de plantación o edad del rodal: \_\_\_\_\_

**Parcela 8:**

Datos generales

Especie: *Citrus sinensis*  
Localidad: Gandía Altitud: 107 m s.n.m  
Coordenadas: 739,376 E / 4.316,993 N

Secano: \_\_\_\_ Regadío: X  
Marco de plantación: 516 arb/ha Año de plantación o edad del rodal: \_\_\_\_\_

**3.2 Olea europaea**

**Parcela 1:**

Datos generales

Especie: *Olea europaea*  
Localidad: Caudiel Altitud: 610 m s.n.m  
Coordenadas: 707,910 E / 4.424,085 N

Secano: \_\_\_\_ Regadío: X  
Marco de plantación: 140 arb/ha Año de plantación o edad del rodal: \_\_\_\_\_

**Parcela 2:**

Especie: *Olea europaea*  
Localidad: Caudiel Altitud: 610 m s.n.m  
Coordenadas: 707,985 E / 4.424,107 N

Secano: \_\_\_\_ Regadío: X  
Marco de plantación: 190 arb/ha Año de plantación o edad del rodal: \_\_\_\_\_

**Parcela 3:**

Especie: *Olea europaea*  
Localidad: Caudiel Altitud: 608 m s.n.m  
Coordenadas: 708,228 E / 4.423,744 N

Secano: \_\_\_\_ Regadío: X  
Marco de plantación: 200 arb/ha Año de plantación o edad del rodal: \_\_\_\_\_

**Parcela 4:**

Especie: *Olea europaea*  
Localidad: Caudiel Altitud: 620 m s.n.m  
Coordenadas: 708,039 E / 4.423,959 N

Secano: \_\_\_\_ Regadío: X  
Marco de plantación: 150 arb/ha Año de plantación o edad del rodal: \_\_\_\_\_

**Parcela 5:**

Especie: *Olea europaea*  
Localidad: Caudiel Altitud: 616 m s.n.m  
Coordenadas: 707,244 E / 4.424,764 N

Secano: \_\_\_\_ Regadío: X  
Marco de plantación: 159 arb/ha Año de plantación o edad del rodal: \_\_\_\_\_

**Parcela 6:**

Especie: *Olea europaea*

Localidad: Caudiel

Altitud: 614 m s.n.m

Coordenadas: 707,233 E / 4.424,739 N

Secano: \_\_\_\_

Regadío: X

Marco de plantación: 150 arb/ha

Año de plantación o edad del rodal: \_\_\_\_\_

**Parcela 7:**

Especie: *Olea europaea*

Localidad: Caudiel

Altitud: 706 m s.n.m

Coordenadas: 706,989 E / 4.425,744 N

Secano: \_\_\_\_

Regadío: X

Marco de plantación: 140 arb/ha

Año de plantación o edad del rodal: \_\_\_\_\_

**Parcela 8:**

Especie: *Olea europaea*

Localidad: Caudiel

Altitud: 707 m s.n.m

Coordenadas: 707,038 E / 4.425,899 N

Secano: \_\_\_\_

Regadío: X

Marco de plantación: 150 arb/ha

Año de plantación o edad del rodal: \_\_\_\_\_

### 3.3 *Prunus amygdalus*

#### **Parcela 1:**

Especie: *Prunus amygdalus*

Localidad: Caudiel

Altitud: 620 m s.n.m

Coordenadas: 708,097 E / 4.423,732 N

Secano: \_\_\_\_

Regadío: X

Marco de plantación: 210 arb/ha

Año de plantación o edad del rodal: \_\_\_\_\_

#### **Parcela 2:**

Especie: *Prunus amygdalus*

Localidad: Caudiel

Altitud: 620 m s.n.m

Coordenadas: 708,097 E / 4.423,732 N

Secano: \_\_\_\_

Regadío: X

Marco de plantación: 230 arb/ha

Año de plantación o edad del rodal: \_\_\_\_\_

#### **Parcela 3:**

Especie: *Prunus amygdalus*

Localidad: Caudiel

Altitud: 707 m s.n.m

Coordenadas: 707,058 E / 4.425,969 N

Secano: \_\_\_\_

Regadío: X

Marco de plantación: 240 arb/ha

Año de plantación o edad del rodal: \_\_\_\_\_

#### **Parcela 4:**

Especie: *Prunus amygdalus*

Localidad: Caudiel

Altitud: 707 m s.n.m

Coordenadas: 707,012 E / 4.425,986 N

Secano: \_\_\_\_

Regadío: X

Marco de plantación: 206 arb/ha

Año de plantación o edad del rodal: \_\_\_\_\_

**ANEXO 2.****GLOSARIO JOINT WOOD ENERGY ENQUIRY (FAO 2011A)**

**S1 Directo:** Any wood fibre entering energy production without any further treatment or conversion. It comprises removals from forests and outside. This comprises also any wood defined by the FAO as coming from “Other Wooded Land” (OWL) and “Trees Outside Forests”, but is wider than these two definitions. It comprises any woody biomass from any land use and covers amongst others infrastructure maintenance (roads, railway, power transmission lines, pipelines, etc.), hedgerows, agricultural residues from fruit tree orchards, wood from gardens and parks, etc. It comprises any form of woody biomass, such as green chips, roundwood or split, stacked or loose from any part of the trees such as roots, stemwood and branches, fruits and shells.

**S2 Indirecto:** Processed and unprocessed co-products (residues) from the wood processing industries are considered as indirect supply. These co-products can be solid (sawdust, chips, slabs, etc.) or liquid from the pulp industry (black liquor or tall oil). Processed wood fuels with improved energy content per bulk volume (compressed), such as wood pellets, briquettes but also wood charcoal are also included under indirect supply.

**S3 Reciclados:** The so-called post consumer recovered wood comprises any waste wood fibre after at least one life cycle. It comprises wood from construction, renovation and demolition, but also packaging as well as old furniture. Countries often apply different classifications to distinguish

between different wood waste categories (contaminated with colours, glue, etc.).

**S4 Sin especificar:** Many countries know something about the amount of wood used but not its source. These households' surveys are often conducted by the energy statistics and are hence not interested in detecting the different sources and origin of the wood fibres. This category represents a further step in making the JWEE more compatible with the energy statistics.

**U1 Electricidad y calefacción:** The definition of U1 refers to "Main Activity Plants" (IEA definition), which refers to plants which are designed to produce electricity/combined heat and power (CHP) or Heat only. If one or more units of the plant is a CHP unit (and the inputs and outputs can not be distinguished on a unit basis) then the whole plant is designated as a CHP plant. However a sawmill, for example, which produces heat for itself as well as selling it outside, would fall under the next (U2) category. Main activity supply undertakings generate electricity and/or heat for sale to third parties, as their primary activity. They may be privately or publicly owned. Note that the sale need not take place through the main activity grid.

**U2 Industrial:** This refers to "auto producer" (IEA definition) undertakings that generate electricity and/or heat, wholly or partly for their own use as an activity which supports their primary activity. They may be privately or publicly owned. It includes mainly the forest based industries, namely the (chemical) pulp producers who sell some of their energy to third parties (real or virtual sales are considered). Ideally the data should also include the process heat that is used for the production of the good at the specific plant.

**U3 Residencial:** In the first version of the JWEE this user group was referred to as “Private households”. For consistency reasons with energy statistics it was renamed to “Residential”. It is referred to by the IEA as all consumption by households, excluding fuels used for transport. It includes households with employed persons (ISIC Division 95) which is a small part of total residential consumption.

**U4 Otro:** This definition comprises any other economic sector that is not included in the above mentioned (e.g. agriculture, forestry and fishing, commercial and public services and transport).

**ANEXO 3.****EFFECTOS SOBRE LA SALUD DE LOS METALES PESADOS TÓXICOS ANALIZADOS EN ESTE ESTUDIO**

<b>Elemento químico</b>	<b>Peligro para la salud</b>
Azufre (S)	En corto plazo por contacto produce irritaciones y quemaduras en piel y ojos, por inhalación produce irritación de nariz, garganta y pulmón, por exposición produce dolor de cabeza y vómitos. A largo plazo produce bronquitis, asma, dermatitis.
Arsénico (As)	Cancerígeno, produciendo tumores en el hígado y efectos gastrointestinales.
Cromo (Cr)	Sospecha de ser carcinógeno, producen los tumores pulmonares, dermatitis alérgicaFinal del formulario.
Plomo (Pb)	Sospecha de ser carcinógeno, pérdida de apetito, anemia, dolores musculares y de articulación.
Mercurio (Hg)	Corrosivo para la piel, ojos y membrana muscular.
Níquel (Ni)	Causa bronquitis crónica, reduce las funciones pulmonares, cáncer de pulmón y sinusitis.
Zinc (Zn)	Causa en corto plazo la enfermedad denominada “la fiebre de humos metálicos” y agitación.

Fuente: Sud *et al.* (2008) and Department of Health and Senior Services, State New Jersey, USA (2011)