

**Departamento de Ingeniería Rural y  
Agroalimentaria**



**UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA**

**Planificación, logística y valorización de  
biomasa forestal residual en la provincia  
de Valencia**

**-Tesis doctoral-**

**Victoria Lerma Arce**

**Directores:**

**Prof. Dr. José Vicente Oliver Villanueva**

**Dr. Harald Fernández Puratich**

**Curso académico 2014-2015**



*A ShiSheng amb tot el meu amor*



## **-AGRAÏMENTS-**

En primer lugar, quiero agradecer a AIDIMA la posibilidad, los medios e infraestructuras para el desarrollo de esta tesis y a todos mis compañeros de trabajo que han participado de un modo u otro en ella. En especial mi agradecimiento a Miguel Ángel, Guillermo, Fran, Isa, Sales y Marisé por haber estado siempre ahí.

Gracias Oli, por haberme inculcado la idea de escribir esta tesis doctoral. Por haberme apoyado tanto en lo científico, en lo laboral como en lo personal y sobre todo por hacerme mirar siempre más allá y expandir mis horizontes, por ser siempre una fuente de inspiración.

Gracias Harald por haberme ofrecido tu ayuda y haber contribuido a mi trabajo del día a día, siempre animándome y estando disponible para poder conversar e intercambiar opiniones. Sabes muy bien el valor que eso tiene y te estoy muy agradecida.

Gràcies al meu bon amic Guillem, per tot el que has fet per mí, ajudant-me al treball de camp, amb el treball de laboratori, amb tota la teua amistat, disposició i el teu saber fer. Sense el teu suport, no podria haver dut a terme en la pràctica aquesta tesis.

Vull agrair també a Elena per tot el que desenvoluparem durant el temps que estiguérem treballant juntes i als becaris que he tingut que han col.laborat en parts d'aquest treball, en especial a Claudia, a Marta i a Héctor.

I would like to give a special thanks to COST-Action Programme and very especially to Rafaele Spinelli that has helped me a lot with his example, his comments, positivity and support. Thanks also to the organisers and participants in COST Action FP0902 for all the constructive training schools and conferences, for all the experts, students and professionals that you were able to join and connect, and for the valuable insights, great inspiration, knowledge and help that I obtained from you.

Gràcies a tota la meua família (iaies, ties, cosines...) per haver-me apoïat en tot moment. En especial a mons pares i a ma germana, que sempre ha estat ahí seguint els meus xicotets avanços de prop, preocupant-se, tendint-me la seua mà per a qualsevol cosa que poguera fer per mí, i a Ele per ajudar-me també rapidísimament amb qualsevol problema tècnic.

Gràcies papà per haver-me inculcat la confiança que tinc en mi mateixa i a tu mamà perquè per tu he arribat a ser qui soc hui. M'has ensenyat el valor de l'educació, del treball constant, la importància de tindre una estructura. Perquè per a mi sempre seràs la millor profesora que he tingut i a la que més admire.

Gràcies al meu xiquet Darah, que has resultat ser una gran bendició en la meua vida i que m'has brindat el desafiament i l'aventura d'acabar aquesta tesis en els teus primers mesets de vida. Per totes les voltes que t'he deixat en la guarderia plorant perquè tenia que escriure...tan sols la teua alegria cada matí i vore la teua sonrisa sempre en els ulls ha fet que poguera arribar fins ací.

I finalment, gràcies a tú Jordi. Aquesta tesis te un autor i en cada una de les seues pàgines i en el meu cor eres tu.



## RESUMEN

---

En el marco del desarrollo de una bioeconomía sostenible, esta tesis doctoral pretende estimular la gestión forestal sostenible orientada a la ordenación y movilización de los recursos bioenergéticos de los montes mediterráneos, proteger los ecosistemas forestales frente a los incendios forestales, optimizar los balances de carbono en la cadena de valor de la bioenergía forestal y, finalmente, contribuir al desarrollo rural mediante la generación de empleo y riqueza en el sector de las energías renovables.

Para alcanzar estos retos, el objetivo general de la investigación es el análisis y el desarrollo de un modelo integral de gestión, planificación, aprovisionamiento y valorización energética de la biomasa forestal residual de la Provincia de Valencia.

Para ello, se ha analizado el territorio de la Provincia de Valencia a partir de información forestal y agrícola recogida en distintas bases de datos mediante la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y de criterios de selección y aprovechamiento sostenible. Se ha estimado la cantidad de biomasa agroforestal residual existente y aprovechable. Se han definido e identificado distritos bioenergéticos en base a un modelo sostenible de gestión, aprovisionamiento, transformación y uso de la biomasa a escala supramunicipal. Se han seleccionado parcelas forestales representativas y en ellas se han llevado a cabo aprovechamientos experimentales de biomasa mediante el sistema de aprovechamiento integrado (aprovechamiento separado de fuste y residuos forestales) y el sistema de árbol completo. A continuación, se han comparado rendimientos, productividad, costes, rentabilidad, impacto ambiental, emisiones de carbono y balances energéticos de ambos sistemas. Posteriormente, a partir del material recogido se ha analizado la calidad de las astillas según la normativa de calidad europea. En paralelo, se ha diseñado y puesto en marcha una planta piloto a escala de laboratorio para la fabricación de pellets a partir de astillas obtenidas en campo. Por último, se ha analizado la calidad de los pellets y se ha estudiado la influencia de factores como la especie, la fracción del árbol y la presencia de corteza sobre las variables de calidad, estableciendo los límites máximos tolerables de corteza para la producción de pellets de calidad.

Como resultados, se ha estimado que en la Provincia de Valencia la cantidad de biomasa residual aprovechable es de en torno a 28t/ha, identificándose ocho distritos bioenergéticos en que se podría dar un suministro sostenido en cantidad y calidad de biomasa en base a sus propios recursos agroforestales. Las parcelas representativas de las masas dominantes pertenecen al estrato *Pinus halepensis* en estado de latizal-fustal con una fracción de cabida cubierta de entre el 40-69%, situadas a altitudes medias de 600 m sobre el nivel del mar, con orientaciones dominantes este-suroeste y pendientes medias en torno al 15%.

El sistema de aprovechamiento integrado ha resultado ser el más adecuado para el aprovechamiento de estas masas dominantes en la Provincia de Valencia debido a un mayor rendimiento en el desembosque que se traduce en menores consumos de combustible, menores costes totales, mayor rentabilidad económica y financiera por los mayores beneficios derivados de la venta de la astilla de fuste que se valora mejor en el mercado, un menor impacto ambiental causado por la necesidad de menor espacio de maniobrabilidad y de un menor número de ciclos de autocargador para el desembosque, unas emisiones ligeramente menores en el sistema integrado frente al completo por el menor consumo de combustibles y un balance energético algo superior, siendo la energía contenida en la biomasa, en ambos casos, diez veces superior respecto a la que se necesita para su movilización y aprovechamiento.

Por último, se concluye que es posible obtener astillas de calidad procedente de estos sistemas de aprovechamiento biomásico (fustes y árbol completo) siempre que se controle la humedad y el contenido en cenizas y que es posible obtener pellets de alta calidad a partir de fustes descortezados y sin descortezar, así como de su fracción de ramas, lo que implica que los abundantes recursos biomásicos en la Provincia de Valencia pueden ser transformados en biocombustibles sólidos de alto valor añadido.





## RESUM

---

En el marc del desenvolupament d'una bioeconomia sostenible, aquesta tesi doctoral pretén estimular la gestió forestal sostenible orientada a l'ordenació i movilització dels recursos bioenergètics dels forests mediterranis, protegir els ecosistemes forestals front als incendis forestals, optimitzar els balanços de carboni en la cadena de valor de la bioenergia forestal i, finalment, contribuir al desenvolupament rural mitjançant la generació de treball i riquesa en el sector de les energies renovables.

Per a assolir aquests reptes, l'objectiu general de la investigació és l'anàlisi i el desenvolupament d'un model integral de gestió, planificació, aprovisionament i valorització energètica de la biomassa forestal residual de la Província de València.

Per a fer açò possible, s'ha analitzat el territori de la Província de València a partir d'informació forestal i agrícola recollida en distintes bases de dades mitjançant l'aplicació de Sistemes d'Informació Geogràfica (SIG) i de criteris de selecció i d'aprofitament sostenible. S'ha estimat la quantitat de biomassa agroforestal residual existent i aprofitable. S'han definit e identificat districtes bioenergètics en base a un model sostenible de gestió, aprovisionament, transformació i ús de la biomassa a escala supramunicipal. S'han seleccionat parcel·les forestals representatives i en elles s'han dut a terme aprofitaments experimentals de biomassa mitjançant el sistema integrat (aprofitament per separat de canó i de residus forestals) i el sistema d'arbre complet. A continuació, s'han comparat ambdós sistemes pel que fa a rendiments, productivitat, costos, impacte ambiental, emissions de carboni i balanços energètics. Posteriorment, a partir del material recollit s'ha estudiat la qualitat de les estelles generades amb els aprofitaments segons la normativa de qualitat europea. En paralel, s'ha dissenyat i posat en marxa una planta pilot a escala de laboratori per a l'elaboració de pellets a partir de les estelles obtingudes de camp. Per últim, s'ha analitzat la qualitat dels pellets i s'ha estudiat la influència de factors com l'espècie, la fracció de l'arbre i la presència d'escorça sobre les variables de qualitat establint els límits màxims tolerables d'escorça per a la producció de pellets de qualitat.

Com resultats, s'ha estimat que en la Província de València la quantitat de biomassa residual aprofitable és d'al voltant de 28t/ha, identificant-se huit districtes bioenergètics en els que es podria donar un sumisitre sostingut en quantitat i en qualitat de biomassa en base als seus propis recursos agroforestals. Les parcel·les representatives de les mases dominants perteneixen al estrate *Pinus halepensis* en estat de perxada amb una desnitat de recobriment de entre el 40-69%, situades a altituds mitjanes de 600 m sobre el nivell del mar, amb orientacions dominants est-suroest i pendents mitjanes al voltant del 15%.

El sistema d'aprofitament integrat ha resultat ser el més adequat per a l'aprofitament d'estes mases dominants en la Província de València debut a un major rendiment en el desembosc que se tradueix en menors consums de combustible, menors costos totals, major rentabilitat econòmica i financiera pels majors beneficis derivats de la venda d'estella de canó, millor valorada al mercat, un menor impacte ambiental per la necessitat d'un menor espai de maniobrabilitat i menor nombre de cicles d'autocargador per al desembosc, unes emissions lleugerament menors del sistema integrat front al complet per menor consum de combustibles i un balanç energètic lleugerament superior, siguent l'energia continguda en la biomassa per a amdós sistemes deu voltes superior respecte a la que es necessita per a la seua mobilització i aprofitament.

Per últim, se conclou que és possible obtindre estelles de qualitat procedent d'aquests sistemes d'aprofitament biomàsic (canó i arbre complet) sempre que se controle la humitat i el contingut de cendres i que és possible obtindre pellets d'alta qualitat a partir de canons descorçats i amb escorça, així com de la seua fracció de rames, el que implica que els abundants recursos biomàsics de la Província de València poden ser transformats en biocombustibles sòlids d'alt valor afegit.



## ABSTRACT

---

In the framework of a sustainable bio-based economy, this doctoral thesis aims to stimulate sustainable forest management by providing scientific information and guidelines tending to plan and mobilize bioenergy resources from Mediterranean forests, protect forest ecosystems from forest fires, optimize the carbon balances of the entire bioenergy value chain and finally, contribute to the rural development through employment and richness creation in the renewable energy sector.

To achieve these goals, the general objective of this research is to analyse and develop an integral management, planning, logistics and energy valuation model for the forest biomass residues available in the Valencian Province.

For that purpose, forest and agricultural crops data in the Valencian Province have been analysed by using Geographical Information Systems (GIS) and applying selection and sustainable harvesting criteria. Biomass quantity and real available biomass residues have been estimated. Based on a sustainable management, planning, logistics, transformation and biomass use model, eight bioenergy districts have been identified at a supramunicipal level. Representative forest plots have been selected and two harvesting systems, the integrated system (separated use of logs and forest residues) and the whole tree system, have been tested. Subsequently, productivity, costs, environmental impact, carbon emissions and energy balances have been compared and the quality of the obtained chips has been analysed according to European quality norms. In addition, a pilot pellet plant at a laboratory scale has been designed and started and pellets have been fabricated. Finally, pellet quality and influencing variables such as species, tree fraction of the chips and bark presence have been studied together with the maximum amount of bark that quality pellets can tolerate.

It has been estimated 28t/ha of residual biomass for the Valencian Province. A total of eight bioenergy districts have been identified, which could provide a in which a sustained supply of high quality biomass.

Representative forest plots are those with a pole stage of *Pinus halepensis* with a canopy cover estimated in between 40-69% at altitudes around 600 m above the sea level, east-southwest dominating aspects and 15% of average slope.

The integrated system has proven to be the most suitable for harvesting *Pinus halepensis* in a pole stage in the Valencian Province due to a higher harvesting productivity, which in turn means lower fuel consumption, lower total costs, higher economic and financial profitability due to the higher value of log woodchips in the market, lower environmental impact due to the need of less manoeuvrability forwarder space with the integrated systems and a lower number of cycles, slightly lower emissions thanks to a lower fuel consumption and finally, a slightly higher energy balance, with an energy contained in biomass that is around ten times the energy necessary for the biomass mobilization and use.

In conclusion, it is possible to obtain high quality woodchips from these two harvesting systems (integrated and whole tree system) when moisture and ash content are properly monitored. It is also possible to obtain high quality pellets from barked and debarked logs as well as from branches. This implies that the abundant forest biomass residues in the Valencian Province can be transformed into high added value solid biofuels.







# Índice de contenidos

---

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Biomasa forestal en la región mediterránea .....	1
1.1.1. Concepto de biomasa y biomasa residual.....	1
1.1.2. Importancia del uso de la biomasa con fines energéticos.....	5
1.1.3. Ventajas e inconvenientes en el desarrollo sostenible del uso de la biomasa.....	12
1.1.4. Marco político-estratégico .....	19
1.1.5. Marco jurídico-administrativo .....	26
1.1.6. Marco socio-económico.....	32
1.1.7. Marco científico .....	43
1.1.8. Marco forestal .....	49
1.2. Estado del arte .....	59
1.2.1. Modelos de cuantificación de biomasa forestal.....	59
1.2.2. Modelos de gestión de biomasa .....	69
1.2.3. Sistemas y tecnologías de aprovechamiento y logística de biomasa forestal.....	71
1.2.4. Desarrollo de biocombustibles sólidos de base forestal .....	91
1.3. Justificación de la investigación.....	98
CAPÍTULO 2. OBJETIVOS .....	101
2.1. Objetivo general.....	101
2.2. Objetivos específicos y operativos .....	101
CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS .....	103
3.1. Planificación .....	103
3.1.1. Materiales.....	103
3.1.2. Metodología para la cuantificación de las existencias de biomasa .....	103
3.1.2.1. Cuantificación de las existencias de biomasa forestal .....	104

3.1.2.2.	Cuantificación de existencias de biomasa residual forestal.....	111
3.1.3.	Metodología para estimación de potencial de biomasa forestal y agrícola residual.....	113
3.1.3.1.	Cuantificación de posibilidad anual de biomasa forestal residual.....	113
3.1.3.2.	Cuantificación de existencias y posibilidad de biomasa agrícola residual.....	116
3.1.4.	Metodología para identificación de las zonas de gestión.....	118
3.1.4.1.	Análisis previo de las condiciones básicas de suministro .....	118
3.1.4.2.	Análisis previo para la identificación de zonas .....	120
3.1.4.3.	Identificación de zonas de suministro y propuesta de ubicación.....	122
3.1.5.	Definición de directrices básicas de gestión de biomasa forestal .....	122
3.2.	Selección de parcelas representativas .....	125
3.3.	Análisis de sistemas optimizados de aprovechamiento y logística.....	127
3.3.1.	Diseño experimental.....	129
3.3.1.1.	Definición de variables entrada (inputs) .....	130
3.3.1.2.	Definición de variables salida (outputs) .....	131
3.3.1.3.	Definición de variables de procesado.....	131
3.3.1.4.	Definición de variables respuesta.....	132
3.3.1.5.	Control de variables ruido .....	132
3.3.2.	Identificación y replanteo de las parcelas experimentales.....	133
3.3.2.1	Situación geográfica y descripción del medio físico.....	133
3.3.2.2.	Inventario forestal previo y determinación de la intensidad de corta .....	136
3.3.2.3.	Preparación de materiales y equipos .....	148
3.3.2.4	Delimitación y replanteo de parcelas experimentales .....	151
3.3.3.	Planificación y organización para el desarrollo de los aprovechamientos .....	153
3.3.3.1.	Condiciones de trabajo .....	153
3.3.3.2.	Toma de datos.....	161
3.3.3.3.	Análisis de posibles desviaciones sobre la planificación y organización .....	163
3.3.4.	Análisis de los aprovechamientos .....	165
3.3.4.1.	Análisis de rendimientos .....	166
3.3.4.2.	Análisis de consumos .....	168
3.3.4.3.	Análisis de la calidad de la biomasa .....	168



3.3.4.4. Análisis del impacto medioambiental generado .....	168
3.3.4.5. Análisis de rentabilidad económica y financiera.....	169
3.3.4.6. Análisis de emisiones de gases de efecto invernadero .....	171
3.3.4.7. Análisis de balances energéticos.....	172
3.4. Desarrollo biocombustibles sólidos de alto valor añadido .....	174
3.4.1. Astillas .....	174
3.4.1.1. Material de partida .....	174
3.4.1.2. Equipos .....	174
3.4.1.3. Ensayos de laboratorio .....	174
3.4.2. Pellets .....	185
3.4.2.1. Proceso de fabricación de pellets .....	185
3.4.2.2. Diseño del experimento.....	196
3.4.2.3. Material de partida .....	197
3.4.2.4. Equipos.....	199
3.4.2.5. Ensayos de laboratorio .....	200
3.4.2.6. Análisis de las variables.....	211
3.4.2.7. Innovación: Posibles mezclas.....	212
 CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	 215
4.1. Planificación .....	215
4.1.1. Existencias de biomasa.....	215
4.1.1.1. Estimación de existencias totales de biomasa forestal (BF) .....	215
4.1.1.2. Estimación de biomasa residual forestal (BRF) .....	216
4.1.2. Potencial de biomasa forestal y agrícola residual .....	219
4.1.2.1. Posibilidad anual de biomasa residual forestal (BRF).....	219
4.1.2.2. Existencias y posibilidad de biomasa residual agrícola .....	222
4.1.3. Zonas de gestión: distritos bioenergéticos.....	223
4.1.4. Directrices de gestión.....	228
4.1.4.1. Planificación del suministro de BRF y BRA .....	228
4.1.4.2. Aprovechamiento de la BRF y de la BRA .....	230

4.1.4.3. Logística de aprovisionamiento de la materia prima .....	231
4.1.4.4. Transformación energética en planta .....	232
4.1.4.5. Distribución y uso de la energía a nivel local/comarcal.....	233
4.2. Parcelas representativas.....	235
4.3. Sistemas optimizados de aprovechamiento y logística.....	237
4.3.1. Registros .....	237
4.3.1.1. Tiempos de trabajo .....	237
4.3.1.2. Consumo de combustibles .....	243
4.3.1.3. Biomasa extraída .....	244
4.3.1.4. Impactos sobre el medio.....	246
4.3.2. Evaluación de la homogeneidad y selección final de las parcelas de estudio .....	253
4.3.2.1. Homogeneidad dasométrica de la masa.....	253
4.3.2.2. Homogeneidad en la intensidad de los tratamientos .....	254
4.3.3. Resultados comparativos de los sistemas de aprovechamiento.....	256
4.3.3.1. Rendimientos .....	256
4.3.3.2. Consumos de combustibles .....	259
4.3.3.3. Calidad de la biomasa.....	260
4.3.3.4. Impacto sobre el medio.....	260
4.3.3.5. Rentabilidad económico-financiera .....	263
4.3.3.6. Emisiones de gases de efecto invernadero .....	270
4.3.3.7. Análisis de balances energéticos .....	271
4.4. Desarrollo biocombustibles sólidos de alto valor añadido .....	272
4.4.1. Astillas.....	272
4.4.2. Pellets.....	278
4.4.2.1. Ensayos de laboratorio.....	278
4.4.2.2. Análisis inferencial de las variables .....	294
4.4.2.3. Análisis inferencial de las relaciones entre variables.....	304
4.4.2.4. Mezclas.....	308

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....	311
5.1. Potencial de biomasa agroforestal en Provincia de Valencia: distritos bioenergéticos.....	311
5.2. Directrices de gestión, aprovechamiento y logística de biomasa agroforestal.....	312
5.2.1. Planificación del suministro .....	312
5.2.2. Aprovechamiento .....	312
5.2.3. Logística de aprovisionamiento.....	312
5.2.4. Transformación energética en planta .....	313
5.2.5. Distribución y uso de la energía a nivel local .....	313
5.3. Masas forestales representativas y prioritarias .....	314
5.4. Sistemas optimizados de aprovechamiento y logística .....	314
5.4.1. Sistemas comparados.....	314
5.4.2. Recomendaciones prácticas en planificación, organización y operaciones .....	316
5.5. Calidad de biocombustibles sólidos.....	317
5.5.1. Calidad de astillas .....	317
5.5.2. Calidad de pellets.....	317
5.5.2.1. Planta piloto .....	317
5.5.2.2. Fabricación de pellets .....	318
5.5.2.3. Control de calidad .....	318
5.6. Limitaciones del estudio.....	320
5.7. Futuras investigaciones .....	322
6. BIBLIOGRAFÍA.....	1
6.1. Científico-técnica .....	1
6.2. Legislación.....	32
6.3. Normativa.....	35



## Anexos

---

Anexo 1. Biomasa forestal.....	1
Anexo 2. Distritos bioenergéticos .....	5
2.1. Alt Túria.....	5
2.2. La Mola de Cortes .....	6
2.3. Vall d’Ayora.....	7
2.4. Meseta Utiel-Requena.....	8
2.5. Serra d’Enguera.....	9
2.6. Serra d’Utiel.....	11
2.7. Túria Mitja .....	12
2.8. Vall d’Albaida.....	13
Anexo 3. Estado del MUP V074 –“Navalón” .....	17
3.1. Estado legal .....	17
3.1.1. Ubicación y límites .....	17
3.1.2. Derechos de propiedad. Pertenencia.....	17
3.1.3. Uso, disfrute y costumbres vecinales .....	18
3.1.4. Limitaciones y servidumbres.....	19
3.2. Estado natural.....	21
3.2.1. Geología .....	21
3.2.2. Geomorfología.....	21
3.2.3. Litología .....	22
3.2.4. Climatología .....	23
3.2.5. Edafología .....	27
3.2.6. Hidrología .....	28
3.2.7. Flora .....	28
3.3. Estado forestal.....	29

Anexo 4. Sistemas optimizados de aprovechamiento y logística .....	31
4.1. Formas de cubicación.....	31
4.2. Homogeneidad de las parcelas. Análisis estadístico. ....	31
4.2.1. Homogeneidad dasométrica de la masa .....	31
4.2.1.1. Diámetro medio de los pies por parcela .....	31
4.2.1.2. Volumen medio de los pies por parcela.....	34
4.2.1.3. Distribución del número de pies por clase diamétrica por parcela.....	36
4.2.1.4. Distribución del volumen de los pies por clase diamétrica por parcela .....	37
4.2.2. Homogeneidad en la intensidad de los tratamientos.....	39
4.2.2.1. Diámetro medio de los pies extraídos por parcela .....	39
4.2.2.2. Volumen medio de los pies extraídos por parcela .....	40
4.2.2.3. Distribución del número de pies por clase diamétrica por parcela.....	42
4.2.2.4. Distribución del volumen de los pies extraídos por clase diamétrica .....	43
4.3. Estudio de tiempos. Análisis estadístico de las variables.....	45
4.3.1. Productividad .....	45
4.3.2. Rendimiento del apeo .....	46
4.3.3. Rendimiento del desembosque.....	47
4.3.4. Rendimiento del consumo de la motosierra.....	49
4.3.5. Rendimiento del consumo del autocargador.....	50
4.4. Daños .....	51
4.5. Costes.....	52
Anexo 5. Desarrollo de biocombustibles sólidos .....	53
5.1. Astillas .....	53
5.1.1. Calidad de las astillas.....	53
5.1.2. Clasificación del material según tamaño.....	54

5.1.3. Contenido en humedad .....	54
5.1.4. Contenido en cenizas .....	55
5.1.5. Poder calorífico .....	55
5.2. Pellets .....	56
5.2.1. Calidad de los pellets.....	56
5.2.1.1. Dimensiones.....	57
5.2.1.2. Porcentaje en corteza .....	57
5.2.1.3. Contenido en humedad.....	58
5.2.1.4. Densidad a granel.....	58
5.2.1.5. Durabilidad .....	59
5.2.1.6. Cantidad de finos.....	59
5.2.1.7. Contenido en cenizas .....	60
5.2.1.8. Contenido en cloro y azufre .....	60
5.2.1.9. Poder calorífico .....	61
5.2.2. Análisis estadístico de las variables .....	62

## Índice de tablas

---

Tabla 1. Porcentaje de biomasa sobre el consumo final de energía en la EU27.....	7
Tabla 2. Balance de recursos de madera en Europa en 2005 .....	9
Tabla 3. Producción potencial de biomasa en Europa 2010 -2030.....	10
Tabla 4. Cantidad de biomasa forestal por regiones a nivel mundial.....	51
Tabla 5. Clasificación de los ecosistemas arbolados en la Comunitat y superficie ocupada.....	54
Tabla 6. Cantidad de residuos forestales potencialmente disponibles para energía renovable .....	73
Tabla 7. Clasificación de los principales sistemas de aprovechamiento energético. ....	75
Tabla 8. Resumen de costes de aprovechamiento de experiencias reales.. ..	86
Tabla 9. Estratos definidos para la Provincia de Valencia.....	106
Tabla 10. Datos dasométricos definidos para <i>Pinus halepensis</i> para todos los estratos.....	108
Tabla 11. Porcentajes obtenidos de valores modulares de biomasa seca de distintas fracciones.....	109
Tabla 12. Densidad básica de la madera para algunas de las especies de estudio.....	109
Tabla 13. Porcentajes obtenidos de los valores modulares de biomasa seca (Kg anhidros) de distintas fracciones de biomasa para pies con un diámetro medio de 5 cm.....	111
Tabla 14. Datos de existencias y ocupación de las principales especies arbóreas.....	112
Tabla 15. Factor de intensidad de aprovechamiento en función de la pendiente.....	115
Tabla 16. Ratio residuos superficie y año de los principales cultivos leñosos .....	117
Tabla 17. Criterios e indicadores de zonificación .....	118
Tabla 18. Caracterización general de la masa. ....	137
Tabla 19. Caracterización de la masa en cuanto DAP.....	137
Tabla 20. Caracterización dasométrica de la masa .....	140
Tabla 21. Valor de los parámetros de la función (a y b).....	141
Tabla 22. Cuantificación de la biomasa aérea existente en la masa de estudio.....	142
Tabla 23. Cuantificación del volumen con corteza (VCC) en la masa de estudio.....	145
Tabla 24. Cuantificación del volumen sin corteza (VSC) en la masa de estudio. ....	146
Tabla 25. Tabla de producción para <i>Pinus halepensis</i> , de calidad 17.....	148
Tabla 26. Distancia de desembosque a cargadero de cada una de las parcelas experimentales. ....	160
Tabla 27. Factores de emisión y densidad de combustibles fósiles. ....	172
Tabla 28. Normativa de aplicación.....	175
Tabla 29. Normativa de aplicación.....	200
Tabla 30. Estimación de existencias totales de biomasa forestal (BF). ....	215
Tabla 31. Estimación de existencias de biomasa residual forestal (BRF).....	217
Tabla 32. Posibilidad de aprovechamiento potencial y real de biomasa residual forestal.....	219
Tabla 33. Posibilidad de aprovechamiento potencial y real de BRA.....	222
Tabla 34. Listado de municipios con BRF> 1.000t/año. ....	224
Tabla 35. Listado de municipios con BRF comarcal > 8.000t/año.....	224
Tabla 36. Listado de municipios con BRA > 3.000t/año.....	226
Tabla 37. Potencial de biomasa disponible para cada una de las plantas.....	228
Tabla 38. Directrices básicas y recomendaciones técnicas para la planificación de BRF y BRA.....	228
Tabla 39. Directrices básicas y recomendaciones técnicas para el aprovechamiento de BRF y BRA. ....	230
Tabla 40. Directrices básicas y recomendaciones técnicas para el aprovisionamiento .....	231
Tabla 41. Directrices básicas y recomendaciones técnicas para la transformación energética.....	232
Tabla 42. Directrices básicas y recomendaciones técnicas para la distribución y uso de la energía.....	233
Tabla 43. Superficie total y existencias de biomasa arbórea (BF) por estratos.....	235
Tabla 44. Caracterización fisiográfica de los estratos de la Provincia de Valencia.....	236
Tabla 45. Medición de tiempos de apeo y procesado.....	237
Tabla 46. Medición de tiempos desembosque y saca.....	239
Tabla 47. Medición de tiempos de astillado.....	241



Tabla 48. Ficha técnica de los equipos.....	243
Tabla 49. Litros de combustible consumidos por los equipos.....	243
Tabla 50. Número de pies y peso de la biomasa extraída estimado a 45% de humedad media.....	245
Tabla 51. Daños ocasionados sobre el sotobosque y el suelo de las parcelas.....	247
Tabla 52. Porcentaje de pies dañados sobre los pies remanentes en las parcelas.....	249
Tabla 53. Árboles dañados y grado de severidad.....	251
Tabla 54. Rendimientos de los aprovechamientos.....	256
Tabla 55. Consumos en litros por toneladas verdes de la maquinaria utilizada.....	259
Tabla 56. Ponderación del grado de daño.....	261
Tabla 57. Componentes del coste.....	263
Tabla 58. Análisis de los costes de las operaciones por sistema de aprovechamiento.....	263
Tabla 59. Costes de las operaciones según unidades.....	264
Tabla 60. Comparación de costes de aprovechamiento de árbol completo y emisiones generadas.....	266
Tabla 61. Precios de venta estimados.....	267
Tabla 62. Datos de base para la estimación de ingresos.....	268
Tabla 63. Rentabilidad económica de los aprovechamientos.....	268
Tabla 64. Rentabilidad financiera de los aprovechamientos.....	269
Tabla 65. Emisiones de Kg de CO2 equivalentes emitidas por tonelada de biomasa producida.....	270
Tabla 66. Unidades de biocombustible sólido producidas por unidad de energía introducida.....	271
Tabla 67. Clasificación de las astillas según su origen.....	272
Tabla 68. Clasificación de las astillas según su tamaño.....	273
Tabla 69. Humedad de las astillas.....	273
Tabla 70. Contenido en cenizas.....	274
Tabla 71. Poder calorífico bruto (PCB) en base húmeda y seca y poder calorífico neto (PCN).....	275
Tabla 72. Resumen de los resultados de los ensayos de calidad.....	277
Tabla 73. Origen de los pellets analizados (EN 14961-1).....	279
Tabla 74. Dimensiones (diámetro y longitud) de los pellets analizados (EN 16127).....	279
Tabla 75. Porcentaje de corteza de los pellets analizados.....	281
Tabla 77. Contenido en humedad de los pellets analizados (EN 14774).....	283
Tabla 78. Densidad a granel de los pellets analizados (EN 15103).....	284
Tabla 79. Durabilidad mecánica de los pellets analizados (EN 15210-1).....	285
Tabla 80. Cantidad de finos de los pellets analizados (EN 15149-2).....	287
Tabla 81. Contenido en cenizas de los pellets analizados (EN 14775).....	289
Tabla 82. Contenido en cloro y azufre de los pellets analizados (EN 15289).....	290
Tabla 83. Poder calorífico de los pellets analizados (EN 14918).....	291
Tabla 84. Resumen de los resultados de los ensayos de calidad.....	293
Tabla 85. Calidad de los pellets elaborados.....	293
Tabla 86. Comparativa del porcentaje de corteza y ceniza de los pellets analizados.....	304
Tabla 87. Porcentajes calculados para la elaboración de pellets a partir de mezclas del material.....	308
Tabla 88. Resultados de cenizas y humedad de los pellets a partir de mezclas del material.....	309

## Índice de figuras

---

Figura 1. Consumo de energía primaria a nivel mundial en el año 2011.....	5
Figura 2. Consumo de bioenergía por destino final a nivel mundial en el año 2011. ....	6
Figura 3. Consumo de energía primaria en España .....	11
Figura 4. Proyección del consumo final bruto de energías renovables para el 2020 en España. ....	12
Figura 5. Esquema de la cadena de valor de la energía térmica .....	33
Figura 6. Esquema de la cadena de valor de la energía eléctrica. ....	33
Figura 7. Esquema de la cadena de valor de biocombustibles sólidos.....	34
Figura 8. Estimación de la producción mundial de pellets entre 200-2010 en kilotoneladas.....	38
Figura 9. Disponibilidad de material y producción de pellets a nivel mundial entre 2008-2015.....	38
Figura 10. Cambio anual en superficie forestal por regiones desde 1999 al 2010.....	49
Figura 11. Tendencias del aprovechamiento forestal.....	50
Figura 12. Fuentes de bioenergía (wood energy) en Europa.....	52
Figura 13. Clasificación de las opciones que conforman cada sistema logístico.....	76
Figura 14. Ejemplo de cadena de suministro y maquinaria para la producción de astilla en los sistemas de aprovechamiento biomásico integrado con el aprovechamiento maderero.....	78
Figura 15. Ejemplo de cadena de suministro y maquinaria para la producción de astilla en los sistemas de aprovechamiento de árbol completo.....	80
Figura 16. Astilladora Erjo 765 acoplada a autocargador Timberjack 1210.....	83
Figura 17. Empacadora de residuos forestales ENFO 2000 sobre autocargador PONSEE.....	83
Figura 18. Empacadora de residuos forestales Timberjack. ....	87
Figura 19. Astilladora Forus .....	88
Figura 20. Trituradora Meri Crushers. ....	88
Figura 21. Influencia del contenido en humedad en el poder calorífico de la biomasa.....	92
Figura 22. Esquema de la metodología a seguir para la estimación de la biomasa potencial .....	105
Figura 23. Metodología para la selección de parcelas representativas.. ....	126
Figura 24. Secuencia de aprovechamiento mediante el sistema A.....	128
Figura 25. Secuencia de aprovechamiento mediante el sistema B .....	129
Figura 26. Ubicación del MUP V 074. ....	134
Figura 27. Ubicación del MUP V 074.. ....	134
Figura 28. Ubicación del MUP V 074. ....	135
Figura 29. Ubicación de la parcela sobre la que se realizarán los trabajos de campo.....	135
Figura 30. Materiales utilizados durante el inventario forestal, hipsómetro Vertex y forcípula.....	136
Figura 31. Distribución de número de pies por clase diamétrica (CD).....	138
Figura 32. Distribución de alturas por clase diamétrica (CD). ....	138
Figura 33. Definición de las forma de cubicación. ....	143
Figura 34. Curva de calidad de la masa de estudio.....	147
Figura 35. Motosierra STIHL MS-261. ....	149
Figura 36. Autocargador VALTRA-HITRAF A83.....	150
Figura 37. Astilladora STARK SH4585. ....	150
Figura 38. Detalle de perímetro de una parcela en uno de sus ángulos.....	152
Figura 39. Delimitación y asignación de tratamientos por parcela.....	152
Figura 40. Selección y marcado de árboles a apear.. ....	153
Figura 41. Apeo manual con motosierra. ....	154
Figura 42. Sistema de integrado (sistema A).....	154
Figura 43. Sistema de árbol completo (sistema B).....	154
Figura 44. Carga del autocargador a la entrada de una parcela apeada.....	155
Figura 45. Cargadero junto a pista forestal. ....	155
Figura 46. Acopio de ramas y fuste por separado del aprovechamiento mediante el sistema A.....	156

Figura 47. Acopio de árbol completo en cargadero procedente del sistema B.....	156
Figura 48. Transporte vacío del autocargador tras desembosque.....	157
Figura 49. Astillado en cargadero.....	157
Figura 50. Pilas de astillas según procedencia.....	158
Figura 51. Señalización de los trabajos en las pistas circundantes a la zona de aprovechamiento.....	158
Figura 52. Distancia natural media de desembosque hasta cargadero.....	160
Figura 53. Árbol de decisión de análisis estadístico de la homogeneidad de las parcelas.....	165
Figura 54. Árbol de decisión de análisis estadístico para la comparación de sistemas.....	167
Figura 55. Equipo de vibración mecánico para tamices CISA.....	176
Figura 56. Estufa de secado MEMMERT y Figura 57. Balanza SARTORIUS.....	178
Figura 58. Mufla CARBOLITE.....	179
Figura 59. Molino de partículas IKA-WERKE.....	180
Figura 60. Bomba calorimétrica PARR.....	182
Figura 61. Fases de producción de los pellets.....	186
Figura 62. Contenedores con de astillas en planta piloto de AIDIMA.....	188
Figura 63. Dinámica de secado en las pilas de astilla.....	189
Figura 64. Cámara de climatización ACS50.....	190
Figura 65. Trituradora de martillos OLIGOTECHNOLOGY.....	191
Figura 66. Molino refinador MECAFA.....	192
Figura 67. Esquemas de los diferentes sistemas de matriz en pelletizadoras.....	193
Figura 68. Pelletizadora KAHL.....	194
Figura 69. Esquema enfriador vertical.....	195
Figura 70. Tamiz de 3mm de malla.....	196
Figura 71. Enfriador MECAFA.....	196
Figura 72. Diseño de las muestras de astillas y su etiquetaje.....	199
Figura 73. Muestra de los pellets elaborados para la investigación.....	202
Figura 74. Durabilímetro Figura 75. Balanza PCE.....	205
Figura 76. Muestra y molienda de la muestra sobre crisol de ensayo.....	208
Figura 77. Tipo de análisis estadístico para estudiar la variabilidad de los resultados.....	211
Figura 78. Mezclas de astillas para elaboración de pellets. Fuente: elaboración propia.....	213
Figura 79. Existencias de biomasa forestal (BF) en la Provincia de Valencia (t/ha).....	216
Figura 80. Existencias de biomasa forestal residual (BRF) en la Provincia de Valencia (t/ha).....	218
Figura 81. Posibilidad potencial de biomasa forestal residual (BRF).....	220
Figura 82. Posibilidad real de aprovechamiento de biomasa forestal residual (BRF).....	221
Figura 83. Mapa de potencialidad de BRF municipal en la Provincia de Valencia.....	223
Figura 84. Posibilidad de aprovechamiento de biomasa agrícola residual a nivel municipal.....	225
Figura 85. Mapa de municipios de interés para el aprovechamiento biomásico.....	226
Figura 86. Zonificación para el aprovechamiento biomásico en la Provincia de Valencia.....	227
Figura 87. Tiempo medio (h) invertido por parcela para el apeo y procesado según sistema.....	238
Figura 88. Porcentaje de tiempo invertido para el apeo, entre apeo efectivo y tiempo total.....	239
Figura 89. Porcentaje de tiempo invertido en las distintas fases del desembosque.....	240
Figura 90. Tiempo medio invertido (h) por parcela en el desembosque según sistema.....	241
Figura 91. Tiempo medio invertido (h) por parcela en el astillado sistema de aprovechamiento.....	242
Figura 92. Porcentaje de consumo de los equipos en cada uno de los sistemas.....	244
Figura 93. Peso medio de biomasa extraída por parcela (t) en cada uno de los sistemas.....	245
Figura 94. Daños remanentes de rodadura tras los aprovechamientos sobre el suelo.....	247
Figura 95. Superficie de sotobosque dañada sobre el total de la parcela.....	248
Figura 96. Superficie dañada por rodadura sobre el total de la parcela.....	248
Figura 97. Daños tras los aprovechamientos sobre la masa remanente.....	249
Figura 98. Porcentaje de pies remanentes dañados por parcela.....	250
Figura 99. Porcentaje del número total de pies dañados sobre cada sistema.....	250
Figura 100. Cuantificación de pies y cualificación del daño sufrido por el fuste.....	252

Figura 101. Cuantificación de pies y cualificación del daño sufrido sobre la corteza.....	252
Figura 102. Cuantificación de pies y cualificación del daño sufrido por las ramas. ....	252
Figura 103. Gráficos de variables representativas de la homogeneidad dasométrica de la masa. ....	254
Figura 104. Gráficos de las variables representativas de la homogeneidad de la intensidad de aprovechamiento.....	255
Figura 105. Pilas de biomasa.....	258
Figura 106. Comparativa de la superficie de sotobosque dañada según sistema. ....	261
Figura 107. Comparativa de la superficie de rodadura según el sistema de aprovechamiento.....	262
Figura 108. Comparativa del grado de daño sobre pies remanentes según sistema.....	262
Figura 109. Poder calorífico neto (PCN) a presión constante según contenido en humedad.....	276
Figura 110. Gráfica de diámetros medios de los pellets analizados.....	280
Figura 111. Gráfica de longitudes medias de los pellets analizados.....	280
Figura 112. Gráfica comparativa del porcentaje medio de corteza.....	282
Figura 113. Gráfica comparativa del contenido medio en humedad.....	283
Figura 114. Gráfica comparativa de la densidad a granel media.....	285
Figura 115. Gráfica comparativa de la durabilidad mecánica media de los pellets.....	286
Figura 116. Gráfica comparativa del contenido medio de finos. ....	288
Figura 117. Gráfica comparativa del contenido medio en cenizas. ....	289
Figura 118. Gráfica comparativa del contenido medio en cloro y azufre. ....	291
Figura 119. Media del poder calorífico neto a presión constante en base seca (0%H) .....	292
Figura 120. Análisis del porcentaje de corteza por especie. ....	295
Figura 121. Análisis del porcentaje de corteza según especies y fracción de origen.....	295
Figura 122. Análisis humedad según especies y presencia de corteza. ....	296
Figura 123. Análisis humedad según especies y fracción de origen. ....	296
Figura 124. Análisis densidad según especies y presencia de corteza.....	297
Figura 125. Análisis densidad según especies y fracción de origen.....	297
Figura 126. Análisis durabilidad según especies y presencia de corteza .....	298
Figura 127. Análisis durabilidad según especies y fracción de origen.....	298
Figura 128. Análisis finos según especies y presencia de corteza. ....	299
Figura 129. Análisis finos según especies y fracción de origen. ....	300
Figura 130. Análisis cenizas según especies y presencia de corteza .....	300
Figura 131. Análisis cenizas según especies y fracción de origen. ....	301
Figura 132. Análisis cloro según especies y presencia de corteza.....	301
Figura 133. Análisis cloro según especies y fracción de origen.....	302
Figura 134. Análisis azufre según especies y presencia de corteza. ....	302
Figura 135. Análisis azufre según especies y fracción de origen.....	303
Figura 136. Análisis poder calorífico neto según especies y presencia de corteza.....	303
Figura 137. Análisis poder calorífico neto según especies y fracción de origen.....	304
Figura 138. Gráfica comparativa del porcentaje de corteza vs el contenido en cenizas.....	305
Figura 139. Regresión de la durabilidad mecánica vs el contenido en cenizas.....	305
Figura 140. Regresión de finos vs durabilidad por especie.....	306
Figura 141. Regresión de finos vs porcentaje de corteza. ....	307

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1. Biomasa forestal en la región mediterránea

### 1.1.1. Concepto de biomasa y biomasa residual

#### a) Biomasa

La Directiva Europea de Energías Renovables (Directiva 2009/28/CE) define la biomasa como: “la fracción biodegradable de los productos, restos y residuos de origen vegetal de la agricultura (incluyendo sustancias vegetales y animales), de la actividad forestal y de las industrias relacionadas incluyendo la pesca, y la acuicultura, así como la parte biodegradable de los residuos urbanos e industriales.”

Según la Comisión Europea, **la biomasa** es el conjunto de productos orgánicos vegetales y animales que se utilizan para fines energéticos (o agronómicos), representando alrededor de la mitad (del 44 al 65%) de la energía renovable que se consume en la Unión Europea (CE 2005).

Para Jiménez (1991), el término biomasa comprende a las materias hidrocarbурadas, no fósiles, en las que mediante el proceso básico de la fotosíntesis, se ha producido la reducción y fijación de CO<sub>2</sub>. En cambio, según Hernández et al. (1990) la biomasa se puede definir como el conjunto de materia orgánica renovable existente de procedencia vegetal, animal o resultante de la transformación natural o artificial de la misma. Desde el punto de vista del sector de las energías renovables, se ha aceptado el término biomasa para denominar al grupo de productos energéticos y materias primas de tipo renovable que se originan a partir de la materia orgánica formada por vía biológica (Fernández 1996). Para Bracmort y Gorte (2012) la biomasa es toda materia orgánica que puede ser convertida en energía.

Como se puede observar, el término biomasa, dependiendo del contexto en el que se ubica, se define de una forma o de otra. A modo de síntesis, se puede aceptar la definición general de biomasa como la materia orgánica producida por las plantas a través de la fotosíntesis.

#### b) Biomasa residual

En cuanto al concepto de **biomasa residual**, según Fernández (1996) es aquella que se genera en cualquier tipo de actividad humana, principalmente en los procesos productivos de los sectores agrícola, forestal o ganadero, así como la producida en los núcleos urbanos. Partiendo

de la definición adoptada para la biomasa se entiende como biomasa residual a aquella biomasa generada como consecuencia de diversas actividades o actuaciones realizadas sobre las plantas directamente o sobre los productos elaborados o semielaborados derivados de éstas.

La presente tesis doctoral se centra en la biomasa de procedencia vegetal y carácter lignocelulósico, es decir, de materiales constituidos por celulosa, lignina y hemicelulosa en relación aproximada de 4:3:3 (variando sensiblemente según las diferentes especies) (Sjöström 1981, Misra et al. 1993, Fengel y Wegener 1984). Se trata pues de especies leñosas, principalmente forestales, pero también agrícolas.

### **b.1.) Clasificación según el origen de la biomasa residual**

Según Castro et al. (1997) la biomasa residual queda clasificada según su origen de procedencia en:

1. Residuos forestales: son aquellos residuos que se obtienen en el proceso de mantenimiento y limpieza del monte, junto con aquéllos que se producen en la explotación de los propios bosques para el uso industrial de la madera.
2. Residuos agrícolas: se obtienen de la planta cultivada al separar la parte que se va a utilizar como alimento o como materia prima en la industria, por ejemplo, las podas de frutales o la paja de los cereales.
3. Residuos ganaderos: residuos generados por los propios animales al utilizar la biomasa vegetal como alimento. Puede ser originada por un animal vivo (estiércoles, purines, etc.) o por un animal muerto (residuos de matadero).
4. Residuos industriales de base forestal: originados principalmente en las industrias forestales, es decir, en las industrias madereras y papeleras. Estos quedan diferenciados según su industria de origen en:
  - 4.a. Industrias de primera transformación o fabricación de semielaborados de madera: costeros y núcleos de aserrío, madera aserrada de la peor calidad con defectos antes o tras el proceso de secado, curros de desenrollo de chapa, recortes de chapas y tableros, serrines y virutas, que se utilizan preferiblemente como materia prima en otras industrias. Sólo si no se pueden valorizar como material (polvo de lijado, cortezas) se utilizan como combustible, preferiblemente en sistemas de cogeneración de las propias empresas del sector.
  - 4.b. Fabricación de productos de madera: serrines, recortes de tableros y chapas obtenidos en los procesos de transformación de las industrias de muebles, elementos de carpintería y construcción, envases y embalajes. Sólo si no se pueden valorizar como material (polvo de lijado) se utilizan como combustible, preferiblemente en sistemas de cogeneración de las propias empresas del sector.

4.c. Fabricación de productos de corcho: los recortes y corchos de mala calidad pasan a trituración para la fabricación de aglomerado de corcho o corcho expandido. Sólo el polvo de corcho se suele utilizar como combustible para los procesos que requieren de energía térmica (cocido de las panas de corcho natural y prensado en caliente de los paneles aglomerados de corcho), en la propia industria corchera.

4.d. Fabricación de pastas celulósicas y derivados de papel y cartón: cortezas, serrines y lejías negras que se utilizan normalmente como combustible y como materia prima de sustancias minerales. Los restos y recortes obtenidos en los procesos de fabricación de papel y cartón suelen ser recuperados e introducidos en la misma fabricación.

5. Residuos de la industria agrícola y agroalimentaria: prácticamente todas las industrias que transforman productos agrícolas producen residuos biomásicos. Es por ello que en este sector es necesario destacar aquellas industrias que generan residuos que sí son susceptibles de ser utilizados con fines energéticos. En el ámbito mediterráneo destacan:

5.a. Extracción de aceite de orujo de la aceituna: se emplea normalmente como combustible en la propia industria o en industrias de cerámica.

5.b. Elaboración de frutos secos: cáscaras de almendras, piñones, etc.

5.c. Residuos y cáscaras de cítricos, vid y otros frutales en la fabricación de zumos, vinos, extractos o productos derivados.

6. Residuos urbanos: son aquellos que se generan en los núcleos de población como consecuencia de la actividad habitual y diaria del ser humano. Se clasifican en:

6.a. Residuos sólidos urbanos (RSU) y

6.b. Aguas residuales urbanas (ARU).

El presente trabajo de investigación se centra principalmente en el aprovechamiento de la biomasa residual de origen forestal y también de manera complementaria en la biomasa residual agrícola.

## **b.2.) Biomasa residual forestal (BRF)**

Se puede definir la biomasa residual forestal (BRF) como la biomasa procedente del conjunto de residuos vegetales generados a partir de operaciones silvícolas como podas, selección de brotes, clareos, cortas fitosanitarias y desbroces, además de los residuos de aprovechamientos madereros, ya sean procedentes de cortas finales o de cortas intermedias, incluso leñas procedentes de trasmochos (Euskadi Forestal 2006). Se toma por biomasa

forestal residual: copas, ramas, pequeños árboles no comerciales y pies defectuosos (Kuiper y Oldenburger 2006).

Según PATFOR (2011) es necesario adaptar la definición de BRF a la realidad de los montes de la Comunitat Valenciana, caracterizados en líneas generales por una falta de gestión en la que predominan las masas en estado de latizal con una gran cantidad de biomasa. A nivel de la Comunitat Valenciana el concepto de BRF, a parte del definido con anterioridad, depende también del estado natural de la masa:

a) BRF en estado de fustal:

Se entiende como BRF todas aquellas fracciones del árbol obtenidas de las actuaciones definidas anteriormente, que no pueden ser incluidas en el aprovechamiento maderero. Es decir, por las ramas de diámetro menor de 7 cm:

- Ramas de diámetro comprendido entre 2 y 7 cm
- Ramillas de diámetro menor de 2 cm
- Hojas o acículas

b) BRF en estado de latizal:

Se considera BRF todos aquellos pies de diámetro con corteza menor de 23 centímetros de forma íntegra, es decir, todo el conjunto de la biomasa aérea de estos pies es considerado como BRF.

### **b.3.) Biomasa residual agrícola (BRA)**

Se entiende por biomasa residual agrícola (BRA) aquellos residuos generados a partir del aprovechamiento de los cultivos agrícolas. En función del tipo de cultivo, estos residuos pueden ser bien herbáceos o bien lignocelulósicos, y pueden generarse de forma anual o cada cierto período de tiempo en función de las necesidades y características de cada uno de los cultivos (Camps y Marcos 2002).

En la Comunitat Valenciana este tipo de residuos, generalmente queda abandonado en el campo en el momento de las cosechas o la realización de podas, para ser quemado posteriormente *in situ* o bien triturado en campo (LIFE +07 Best4VarioUse 2012).

Al igual que en el caso de la BRF, PATFOR (2011) define de forma más concreta la BRA teniendo en cuenta la superficie ocupada por cada uno de los cultivos lignocelulósicos. De esta forma la BRA de la Comunitat Valenciana considerada en este trabajo de investigación está formada fundamentalmente por los residuos generados de los cultivos de almendro, cítricos, olivo y viña que ocupan más del 85% del total de la superficie cultivada.



### 1.1.2. Importancia del uso de la biomasa con fines energéticos

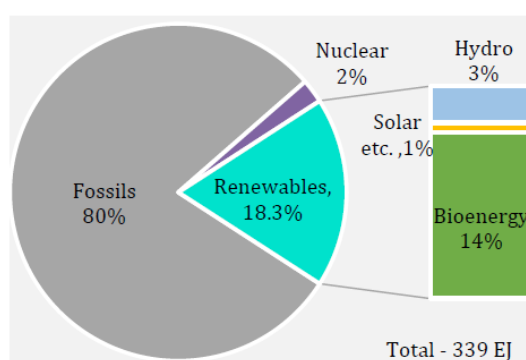
#### a) nivel mundial

El año 2011 fue declarado Año Internacional de los Bosques por la Asamblea General de la Organización de Naciones Unidas (ONU) con el objetivo de celebrar el papel de los hombres en la gestión y en la conservación de la masa forestal. Uno de los enfoques planteados en la novena sesión del Forum sobre los Bosques de la ONU pretende evaluar en clave económica los bosques, y su interés desde el punto de vista de la energía (Martin-Pinto y Jiménez-Shaw 2011).

En una economía productiva basada en el petróleo, el aumento del coste de los combustibles fósiles junto con los problemas derivados del cambio climático que ocasionan, ha llevado a las autoridades a adoptar compromisos de potenciación de las energías renovables, y en particular a fomentar el uso de la biomasa con fines energéticos (FAO 2010, Tolosana 2009, PANER 2010).

En este contexto hay que destacar el papel de la biomasa agroforestal como fuente de energía renovable. La biomasa es la única fuente de energía renovable capaz de producir electricidad, energía térmica y combustibles para el transporte, aunque a nivel mundial sólo un 20% de la biomasa se utiliza de manera industrial con estos fines (IEA 2011).

La Figura 1 muestra como las energías renovables contribuyen al 18,3% del mix global energético del planeta, siendo de un 14,1% la contribución de la biomasa (WBA 2014). De este porcentaje, la biomasa sólida supone un 89% del total de la bioenergía. De este total, más del 90% de la bioenergía se utiliza con fines térmicos siendo el resto destinado para energía eléctrica y transporte.



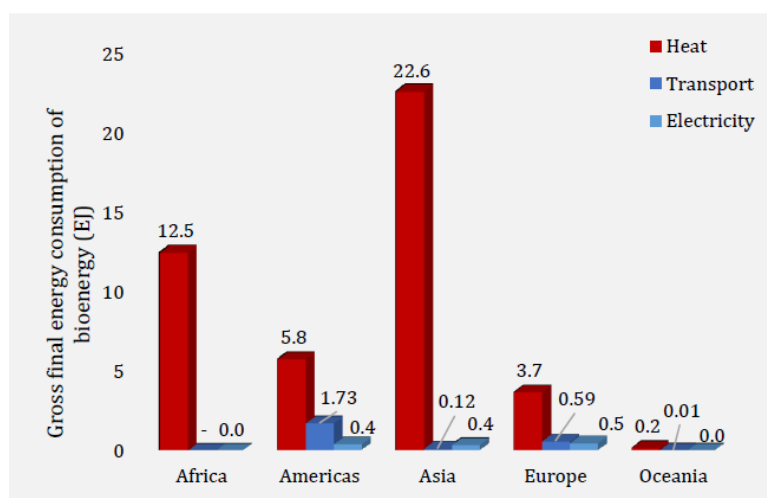
**Figura 1. Consumo de energía primaria a nivel mundial en el año 2011. Fuente: WBA (2014).**

La biomasa constituye el cuarto recurso explotado a nivel mundial, unos 50EJ, utilizados principalmente como biomasa tradicional para cocinar y calentarse con calderas, hornos o

estufas domésticas principalmente en países en vías de desarrollo (IEA 2011, IEA 2007, IPCC 2007). Durante siglos, sobre todo durante la época preindustrial y en zonas predominantemente rurales, la biomasa agroforestal ha sido el combustible más utilizado (Allué et al. 2007, PANER 2010).

Los biocombustibles leñosos son un producto forestal de suma importancia. La producción mundial de biocombustibles excede la producción mundial de madera en términos de volumen, siendo las leñas y el carbón los usos predominantes de la biomasa en países en vías de desarrollo y economías en transición (FAO 2013). La energía de la biomasa es a menudo la única fuente energética en zonas rurales de los países menos desarrollados y es especialmente importante para la gente pobre. En este sentido, hoy en día África y Latino América y el Caribe donde la biomasa representa un 27% y 13% de sus fuentes primarias de energía y un 5% en Asia y Oceanía (FAO 2014).

Así pues la Figura 2 muestra como el primer destino del consumo de la bioenergía a nivel mundial es el térmico, seguido por el uso en transportes y finalmente por el uso de la bioenergía como electricidad.



**Figura 2. Consumo de bioenergía por destino final a nivel mundial en el año 2011. Fuente: IEA (2013).**

Sin embargo, el uso de la bioenergía se está incrementando en países desarrollados con el objetivo de reducir su dependencia de los combustibles fósiles. En cuanto a uso de la biomasa térmica en plantas de conversión energética es Europa quien lidera el sector, mientras que el 70% de la producción de biocombustibles proviene de América (WBA 2014). Hoy en día, en torno a 90 millones de personas en Europa y Norte América utilizan la biomasa como principal fuente de calor térmico (FAO 2014).

**b) en Europa**

La biomasa, entendida como conjunto de productos orgánicos vegetales y animales que se utilizan para fines energéticos (o agronómicos), representa actualmente alrededor de la mitad (del 44 al 65% según el método de cálculo) de la energía renovable que se consume en la UE (EC 2005).

En 27 países de la Unión Europea (EU27, con una población aproximada de 500 millones de habitantes), la biomasa supuso un 8,2% de la energía total consumida en 2010 o aproximadamente un 64% de la energía renovable europea variando en gran manera según el estado miembro: Suecia, Latvia y Finlandia lideran en porcentaje de biomasa respecto a la energía total consumida superando todos ellos el 27%, seguidos de Estonia y Lituania con un 25,67% y 19,47% respectivamente (AEBIOM 2012) como se puede observar en la Tabla 1.

**Tabla 1. Porcentaje de biomasa sobre el consumo final de energía en la EU27 (Mtep en 2010). Fuente: AEBIOM (2012)**

	<b>Energía final consumida (Mtep)</b>	<b>Energía final consumida de biomasa</b>	<b>Porcentaje de biomasa</b>
EU27	1.153,30	94,07	8,16%
Alemania	217,36	16,49	7,59%
Austria	27,93	4,44	15,88%
Bélgica	36,43	1,65	4,52%
Bulgaria	8,84	0,9	10,12%
Dinamarca	15,54	2,82	18,13%
Estonia	2,91	0,75	25,67%
Francia	158,77	13,43	8,46%
Finlandia	26,48	7,18	27,10%
Grecia	19,03	1	5,23%
Holanda	53,98	1,46	2,70%
Hungría	16,66	1,31	7,86%
Irlanda	11,79	0,31	2,61%
Italia	124,77	5,76	4,62%
Chipre	1,92	0,04	1,93%
España	90,6	5,67	6,26%
Eslovenia	4,97	0,62	12,43%
Eslovaquia	11,59	0,75	6,49%
Malta	0,45	0	0,00%
Latvia	4,27	1,18	27,54%
Lituania	4,75	0,93	19,47%
Luxemburgo	4,3	0,1	2,26%
Polonia	66,32	5,52	8,33%
Portugal	18,16	2,69	14,83%
Rep. Checa	25,62	2,12	8,27%

	<b>Energía final consumida (Mtep)</b>	<b>Energía final consumida de biomasa</b>	<b>Porcentaje de biomasa</b>
Suecia	34,44	10,06	29,21%
Rumanía	22,48	3,94	17,51%
Reino Unido	142,95	2,97	2,08%

Sin embargo, según la Agencia Medioambiental Europea (EEA 2006), la biomasa tendrá que contribuir con el 13% de la energía primaria consumida en 2020, lo que supondrá que contribuya con 236 Mtep. Para ello, a corto-medio plazo hay que promover el uso de recursos forestales infra o parcialmente utilizados y movilizar el uso de la biomasa procedente del sector agrícola.

En este sentido, existe un claro potencial de incremento de la explotación forestal con fines energéticos, ya que tan sólo entre el 60-70% de la posibilidad anual forestal es aprovechada (CE 2013). Actualmente, sobre el 42% de los aprovechamientos forestales tienen destino energético, principalmente en forma de residuos procedentes de industrias de la transformación de la madera (Laitinen et al. 2014). Existe un potencial de expansión de uso bioenergético en el aprovechamiento de pequeños terrenos forestales privados en cuanto a aprovechamientos de residuos de cortas y de cortas complementarias como primeras claras (CE 2014).

Proyecciones recientes para 2030 cuantifican en 675 millones de metros cúbicos (146 Mtep) por año la posibilidad de aprovechamiento realista y sostenible de madera para energía procedente de los bosques de la Unión Europea (CE 2014).

Del 8,2% de biomasa consumida en 2010 según AEBIOM (2012) la biomasa de base forestal contribuye de manera mayoritaria con dos tercios del total de la biomasa para producción de energía o lo que es lo mismo, sobre el 50% del total de la energía renovable en Europa (Mantau 2010).

Pese al uso intensivo y creciente de la biomasa forestal con fines bioenergéticos, el volumen de madera en pie en los bosques europeos se incrementó en un 12% durante los diez últimos años y la posibilidad anual de aprovechamiento está aún bien por debajo del incremento anual de madera en los bosques. (Eurostat SoEF 2011).

La demanda de madera en la Unión Europea (EU27) supuso 822 millones de metros cúbicos en 2005, de los cuales, el 58% se utilizó en productos tales como madera aserrada, pasta y papel, paneles, etc., mientras que el restante 42% se consumió para la generación de energía (Scarascia-Mugnozza y Pisanelli 2008) como muestra la Tabla 2.

**Tabla 2. Balance de recursos de madera en Europa en 2005 (Países de la EU/EFTA). Fuente: Mantau et al. (2008).**

Suministro	millones		Uso como material	%	millones	
	m <sup>3</sup>	%			m <sup>3</sup>	
Madera en rollo - JFSQ*	381	46	Industria del aserrío	26	217	
Madera en rollo - no rep**	16	2	Industria del tablero	11	88	
Biocombustibles	79	10	Industria de la pasta y papel	19	155	
Biocombustibles	6	1	Otros usos como material	2	14	
Corteza	25	3	Biocombustibles	1	7	
Residuos forestales	23	3				
Biomasa leñosa fuera de los bosques	20	2	<b>Uso como energía</b>			
Astillas, partículas y residuos	117	14	Calor y electricidad	6	49	
Productos derivados de la pasta	70	9	Uso industrial interno	8	65	
Madera recuperada	29	4	Uso doméstico	11	92	
Biocombustibles procesados	7	1	Uso indiferenciado	16	135	
Ajuste de balances	47	6				
<b>Total de fuentes</b>	<b>822</b>	<b>100</b>	<b>Total de usos</b>	<b>100</b>	<b>822</b>	

\* JFSQ - Joint Forest Sector Questionnaire

\*\* diferencia máxima con JFSQ no reportada

Los resultados mostrados en la Tabla 2 indican que el 65% de las fibras de madera provienen directamente de los bosques, mientras que el 23% proviene de productos derivados de las industrias forestales (incluyendo astillas, partículas y licores negros), el 3% proviene de fuera del bosque, un 4% de madera recuperada y un último 1% de biocombustibles sólidos (briquetas, pellets, etc.). Existe un 6% del balance indefinido. Un uso de material del 58% es todavía superior al uso energético que es del 42% (Mantau et al. 2008).

La Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (ONU 2001b) 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. 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). El desafío consiste en garantizar no solo la disponibilidad de la madera, sino también su procedencia de bosques ordenados sosteniblemente (TFD 2008, FAO 2012).

La Tabla 3 muestra una prospectiva de producción y consumo potencial de biomasa según diferentes tipos elaborada por EEA (2006). Mientras que el aumento del aprovechamiento de madera procedente de bosques y de residuos de la industria de base forestal deben llegar a tocar techo en la década de 2020 a 2030, la disponibilidad de biomasa a partir de cultivos energéticos intensivos de corta rotación (sobre todo en terrenos agrícolas marginales o de baja productividad agrícola) experimentará un espectacular crecimiento hasta entonces. Sin embargo, esta tendencia global a nivel europeo, en el caso de países mediterráneos como

España, todavía tiene mucho recorrido en el aumento de producción de biomasa forestal. Esto se debe a que la intensidad de los aprovechamientos forestales sobre el crecimiento corriente es sustancialmente menor que en países centro y noreteuropeos (PROFORBIOMED 2012). A esto hay que añadir la superdensificación de las masas abandonadas o regeneradas tras los incendios forestales que necesitan de tratamientos selvícolas (aclareos sistemáticos en masas jóvenes, claras selectivas y podas de calidad en masas adultas, etc.), sobre todo para mejorar las masas y hacerlas más resistentes al riesgo de los incendios forestales (LIFE +09 Bioenergy and Fire Prevention 2011).

**Tabla 3. Producción potencial de biomasa en Europa 2010 -2030 en Mtep. Fuente: EEA (2006).**

Tipo de biomasa	Consumo de biomasa		
	2010	Potencial 2020	Potencial 2030
Madera de bosques (y residuos)	43	39-45	39-72
Residuos orgánicos y de la industria de 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>

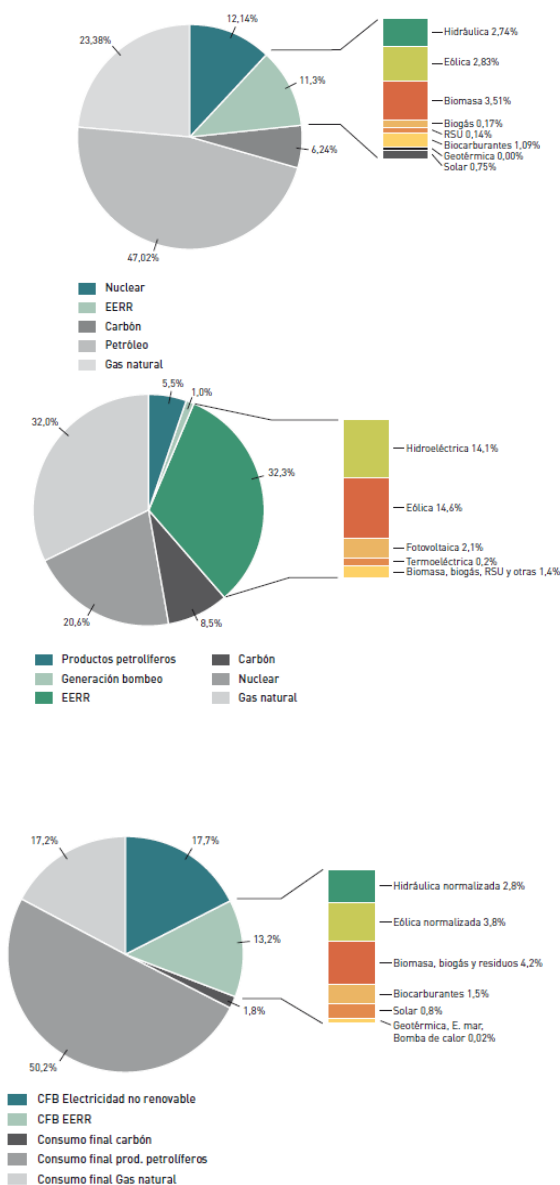
En cuanto a la demanda de bioenergía, se espera que las tendencias y perspectivas relativas a la demanda de bioenergía de base agroforestal en Europa tengan un mayor crecimiento con respecto a la producción de calor y energía (que, a su vez, incluye la combustión mixta con otros combustibles) (PBCyL 2010; FAO 2012). En este sentido, Escandinavia y Austria se sitúan a la cabeza de la producción y utilización de energía procedente de los bosques y pueden ser tomados como referentes a seguir a la hora de utilizar la biomasa como fuente de energías renovables en zonas mediterráneas (IEA 2007).

### c) en España

En España el consumo energético se basa en un 48,8% en petróleo. Este porcentaje es superior a la media europea que es del 35% (CE 2013) mientras que 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 español de los últimos años supuso que, por primera vez en el año 2009, la energía consumida procedente de fuentes renovables superara a la generada por carbón (IDAE 2011b).

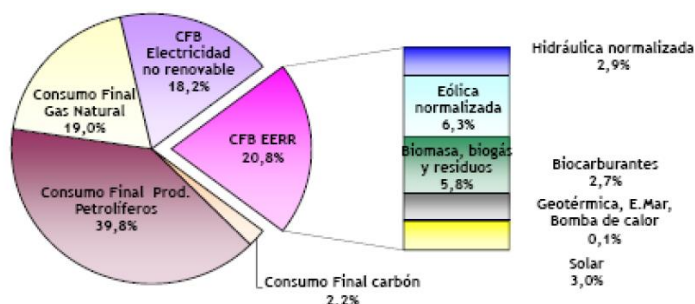
En España, en el año 2010, las tecnologías renovables supusieron alrededor del 32,3% de la generación eléctrica total y un 13,2% de la energía final bruta consumida en España, ocupando la biomasa un 4,2% del total tal y como se puede observar en la Figura 3 (IDAE 2011b).



**Figura 3. Consumo de energía primaria en España Fuente: IDAE (2011b).**

Pese a ello, 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.

Según proyecciones del Gobierno de España (2012), en el año 2011 se esperaba que en 2020 la proporción del consumo final bruto de energía sea del 5,8% tal y como muestra la Figura 4.



**Figura 4. Proyección del consumo final bruto de energías renovables para el 2020 en España. Fuente: Gobierno de España (2012).**

Sin embargo, desde el año 2012 las condiciones favorables para el incremento de las energías renovables han sufrido un importante freno. El RD Ley 1/2012, por el que se procede a la suspensión de los procedimientos de preasignación de retribución en las nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica en régimen especial, ha supuesto un cambio de rumbo y un freno al desarrollo futuro de las renovables y, entre ellas, la bioenergía, importante fuente para el desarrollo sostenible de las zonas rurales en el arco mediterráneo al ser un futuro instrumento de mercado que puede potenciar la gestión sostenible de los recursos forestales en terrenos públicos y privados, contribuyendo de forma activa a la prevención de grandes incendios forestales (Oliver-Villanueva 2013). Esta decisión de carácter retroactivo del Ministerio de Industria, Energía y Turismo está en espera de dictamen por el Tribunal de Justicia de la UE en Luxemburgo.

La supresión de las primas ha creado un sistema tan enrevesado que no ha servido para frenar el déficit tarifario en España, que ha proseguido su crecimiento desde la aplicación de la nueva política energética desde 2012 (Agencia Fitch 2014). Se han producido importantes subidas del precio de la luz, generalmente no por un aumento del coste, sino por el mercado de ajustes, produciéndose, en definitiva, elevados costes para industria y consumidores, pero también imposibilitando proyectos alternativos de bioenergía y otras energías renovables a nivel local altamente generadores de empleo de calidad, sobre todo en el medio rural (AVEBIOM 2012).

Adicionalmente, muchos expertos a nivel internacional coinciden en que aquellos países que no desarrollen cadenas de valor en la generación y distribución de energías renovables desatienden las consecuencias medioambientales que el cambio climático va a generar, debido a un desarrollo socioeconómico basado en tecnologías y energías contaminantes (OCDE 2014).

### **1.1.3. Ventajas e inconvenientes en el desarrollo sostenible del uso de la biomasa de base forestal**

Las ventajas e inconvenientes en el desarrollo sostenible del uso de la biomasa de base forestal se dividen en medioambientales y en socioeconómicas.



## a) Ventajas medioambientales

### a.1. Prevención de incendios forestales:

El aprovechamiento biomásico contribuye a la prevención de incendios forestales mediante la eliminación de material combustible de origen forestal o agrícola, que puede iniciar o propagar incendios fácilmente (FAO 2003). El aprovechamiento maderero genera unos residuos que quedan abandonados en el monte en forma de astillas pero ocasionalmente en forma de leñas (FAO 1997).

Por otra parte, en relación a la biomasa residual agrícola, los restos de podas son quemados in situ por los agricultores. Este material supone un gran riesgo especialmente en aquellas parcelas o bancales que lindan con la superficie forestal (IDAE 2007). Además, debido a una falta de gestión de los montes existe una gran cantidad de biomasa acumulada que puede derivar en un alto riesgo de propagación de incendios (UNIÓN POR LA BIOMASA 2013). Por todo ello, según EPA (2012) el aprovechamiento de la biomasa mejora las condiciones de los montes y cultivos agrícolas lignocelulósicos en cuanto a la prevención frente a incendios forestales ya que según Ambrosio (2005) disminuye el riesgo de incendios por la retirada de combustible y evita la continuidad de éste en el medio natural y rural.

### a.2. Estimulación del crecimiento de las masas forestales:

El aprovechamiento conjunto de biomasa y de la fracción maderable contribuye a fomentar el crecimiento de las masas así como aumentar la calidad de los productos obtenidos de ellas, lo que bajo una gestión forestal sostenible permite un aprovechamiento continuado de los productos del monte (PATFOR 2011). Se da también una mejora en las características tecnológicas del arbolado, al ser retirados los pies mal conformados (Ambrosio 2005)

### a.3. Mejora del estado fitosanitario y control de plagas:

La eliminación de los restos de biomasa generados a partir de las actividades silvícolas supone la prevención de la proliferación de plagas y ataques de insectos y hongos (Camps y Marcos 2002). Como ejemplo, en la actualidad *Tomicus destruens* se ha convertido en plaga en los pinares de la Comunitat Valenciana debilitados por la sequía estival y afectando hasta 89 municipios (Ortega 2014).

### a.4. Mejora de la movilidad de la fauna:

La eliminación de la acumulación de restos de biomasa en los montes, así como la realización de desbroces de matorral complementarios al aprovechamiento de la biomasa forestal, permite una mejora en la movilidad tanto de la fauna silvestre como del ganado (IDAE 2007)

### a.5. Mejora y mantenimiento de vías y caminos forestales:

La puesta en valor de un recurso no utilizado como la biomasa forestal deriva por una parte en la mejora de las pistas y por otra en el mantenimiento de las vías existentes. Además, la reducción de la densidad de arbolado junto con una mejora en de la transitabilidad de las pistas forestales ya que estas se ponen en uso permite importantes avances en la prevención de incendios forestales (Xarxaforestal 2014).

### a.6. Mejora de la accesibilidad al monte:

Al igual que en el caso de la mejora de la movilidad de la fauna silvestre y la ganadería, la eliminación de restos de la actividad forestal y el desbroce derivado del aprovechamiento biomásico mejorará la accesibilidad al interior de los espacios forestales (SILVAPLUS 2014), lo que supone un beneficio por la mayor capacidad de acogida recreativa de los mismos (IDAE 2007) y un mejor acceso en caso de emergencias, por ejemplo en la extinción de incendios mediante fuerzas terrestres.

### a.7. Reducción de emisiones y contribución a la mitigación del cambio climático:

La valorización y uso de la biomasa residual como energía térmica y/o eléctrica reduce las emisiones globales de CO<sub>2</sub> siempre que sustituya a otros combustibles fósiles (IPCC 1996) ya que las emisiones de CO<sub>2</sub> que se producen con su aprovechamiento, 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) Por otra parte, la utilización de la biomasa, favorece la capacidad de captura de carbono de los ecosistemas forestales y la conservación del carbono capturado tanto en el monte en sumideros estáticos como en los productos transformados de la madera en sumideros dinámicos (PATFOR 2011). Además, la biomasa tiene contenidos en azufre prácticamente nulo, generalmente inferior al 0,1% (Biomass Energy Center 2011). Por este motivo, las emisiones de dióxido de azufre, que junto con las de óxidos de nitrógeno son las causantes de la lluvia ácida, son mínimas en los procesos de transformación de biomasa forestal en energía (MMAMRM 2010).

## **b) Ventajas socioeconómicas**

### **b.1. Creación de empleo rural:**

Según datos de la FAO y AEBIOM (AVEBIOM 2012a), la bioenergía procura 135 nuevos empleos sostenibles por cada 10.000 habitantes, frente a los nueve empleos que genera el uso de combustibles fósiles no renovables y más contaminantes. El uso eléctrico de la biomasa genera entre 29 y 36 empleos por MW eléctrico instalado (AVEBIOM 2012b). Según Ence (2011), cumplir con el Plan de Energías Renovables en la partida de biomasa para producción de electricidad crearía 15.000 empleos y proporcionaría 750 millones de euros a las arcas del Estado, que se desglosan de la siguiente manera: una contribución fiscal de 350 millones, y ahorros de 200 millones en la importación de combustibles fósiles, de 150 millones en prestaciones de desempleo y de 25 millones en emisiones de CO<sub>2</sub>. Según AVEBIOM (2012), la consultora internacional Deloitte y la Comisión Nacional de la Energía (CNE) muestran la gran capacidad de creación de empleo que supone la valorización energética de la biomasa: entre 36 y 28,7 empleos por MW instalado. Hay que destacar, además, que la mayor parte de los empleos se dan en zonas rurales, lo que contribuye a fijar población en estas áreas y a su desarrollo industrial. También hay que tener en cuenta que la creación de mercados bioenergéticos favorece el desarrollo de empresas de trabajos forestales, operadores logísticos especializados, empresas transformadoras de energía térmico y/o eléctrica, empresas transformadoras de biocombustibles sólidos, y empresas distribuidoras de energía (eléctrica, térmica o biocombustibles) a nivel local beneficiando el desarrollo económico de zonas rurales tradicionalmente deprimidas (Martínez y Oliver Villanueva 2014).

### **b.2. Activación de la economía a nivel local:**

La utilización de biomasa como fuente de energía renovable permite el mantenimiento de poblaciones locales y la vertebración del territorio ya que se genera riqueza ligada al medio en que se encuentra la población al valorizar recursos naturales propios y crear mercados para residuos de biomasa (Hall 2003) como restos de podas, descope, desbroces para cortafuegos, tratamientos selvícolas fitosanitarios (PROFORBIOMED 2012). Estos beneficios económicos además pueden mejorar la rentabilidad de labores selvícolas de los montes (Hall, 2003; Riechmann y Sempere 2003).), contribuyendo a una mejor gestión de los ecosistemas con capacidad de activar la economía local y regional (madera, biocombustibles, etc.). Además, según Ambrosio (2005) se permite obtención de rentas antes del final del turno.

### b.3. Innovación tecnológica, formación y especialización en un sector económico de futuro:

En un momento de crisis de los tradicionales sectores económicos, el aprovechamiento de la biomasa en todas sus vertientes (selvícolas, logísticas, de transformación, distribución, instalación de equipos, etc.) abre un nicho de mercado que requiere de investigación y desarrollo, innovación tecnológica y formación especializada de técnicos y gestores del territorio para un aprovechamiento eficiente y sostenible. La formación en este campo mejorará los resultados económicos de este sector a medio y largo plazo (Oliver-Villanueva 2014).

### b.4. Reducción de la dependencia energética:

El aprovechamiento de residuos forestales a través de su transformación térmica y/o eléctrica a nivel local permite una diversificación de las fuentes de energía, contribuye a elevar la producción de energías renovables y a reducir la dependencia en el uso e importación de combustibles fósiles (APPA 2009). 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.5. Contribución a la vertebración de la cadena monte-industria:

El aprovechamiento continuado de los productos del monte proporciona rentas continuas, favoreciendo las economías de escala y la recuperación del tejido económico entorno a los productos derivados de la madera, en este caso la bioenergía de base forestal (PATFOR 2011).

### b.6. Cumplimiento con los compromisos adoptados:

Gracias a la mitigación del cambio climático que deriva del uso sostenible de los bosques, se contribuye a dar cumplimiento con los compromisos adoptados a nivel europeo y nacional con respecto al Protocolo de Kyoto (reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y reducción de la factura que España paga en la desfavorable balanza de pagos del mercado energético) y en cuanto a cumplimiento con objetivos de la Directiva relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables (Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009).

### **c) Inconvenientes medioambientales**

#### **c.1. Riesgo de extracción excesiva de nutrientes:**

La extracción de residuos supone una disminución de la materia orgánica susceptible de ser incorporada al suelo, lo que puede desembocar en una ligera desfertilización del mismo (Marcos 2001). Hay que señalar que en las ramillas finas y en las hojas se concentra alrededor del 80% de los nutrientes minerales de las plantas, por lo que si se consigue dejar en el monte la mayor cantidad posible de esta fracción fina los perjuicios se minimizan (Kuiper y Oldenburger 2006).

#### **c.2. Aumento del riesgo de erosión:**

De una manera directa, en la retirada mecanizada de los residuos forestales, sobre todo con la integración en los procesos de corta y saca con maquinaria pesada, se puede provocar rozamiento sobre el suelo, pudiendo llegar a quedar desnudo, lo que en caso de fuertes lluvias puede provocar problemas de escorrentía, pérdidas de horizonte, etc., ya que permite que las gotas de lluvia incidan con mayor potencia en el suelo forestal (Camps y Marcos 2002). El efecto de una extracción indiscriminada de biomasa sobre la erosión es especialmente importante en los suelos arcillosos, donde la baja infiltración favorece la escorrentía (Merino 2008).

#### **c.3. Riesgo de compactación del suelo:**

Este riesgo es derivado del tránsito de la maquinaria por la superficie del ecosistema forestal. Desde el punto de vista de la estructura física del suelo, los trabajos de extracción pueden formar compactaciones del terreno por el pisoteo de la maquinaria, disminuyendo la porosidad del suelo e incrementando la escorrentía del agua de lluvia (Camps y Marcos 2002). La retirada de todos los restos de corta deja el suelo expuesto directamente al peso de la maquinaria. En estas condiciones los suelos, especialmente los de textura más fina, se puede compactar más fácilmente (Merino 2008).

#### **c.4. Riesgo de eliminación del hábitat de determinadas especies:**

Este uso será incompatible en aquellas zonas especialmente protegidas por flora y fauna (existencia de especies endémicas, microreservas, etc.) Este impacto se da al retirar matorral que sirve de cobijo y alimento para la fauna silvestre. Además, hay microorganismos que viven de la descomposición de restos orgánicos y que forman parte de la cadena ecológica (Martín 2000).

#### **d) Inconvenientes socioeconómicos**

##### d.1. Impacto paisajístico y social:

La retirada de la biomasa residual puede ocasionar la transformación del paisaje natural generando un impacto paisajístico. Este impacto tiene mayor afección en montes que se encuentran en zonas con gran turismo de montaña (FAO 1997). El apeo de árboles, la realización de vías de saca, el tránsito de maquinaria, etc. pueden ocasionar un impacto social derivado de un desconocimiento de los beneficios de los aprovechamientos forestales sobre las masas boscosas (FAO 2003).

##### d.2. Rechazo social:

En ocasiones, posiblemente debido a una escasa o insuficiente comunicación entre la administración y la sociedad rural y/o urbana, se genera una oposición en mayor o menor medida al uso de la biomasa. Según Ulrik (2012), una falta de comprensión y aceptación entre los principales actores sociales implicados puede suponer una limitación al uso de la biomasa forestal.

##### d.3. Dispersión en el territorio:

La dispersión del recurso biomásico en el espacio, es decir, en el medio natural, incide de forma decisiva en los costes logísticos y en la planificación del aprovisionamiento de los recursos forestales biomásicos (Johnson et al. 2012).

### **1.1.4. Marco político-estratégico**

#### **a) a nivel mundial**

La evolución de los precios del petróleo y la distribución geográfica de las reservas de energía han condicionado las opciones energéticas de los países desarrollados desde hace más de tres décadas. De manera más reciente, las preocupaciones ambientales, el intenso proceso de crecimiento de los países emergentes (China, India, Brasil, Rusia, México, Indonesia, etc.), con el consiguiente efecto inflacionario sobre las fuentes de energía primaria y la liberalización del sector de la energía en Europa, han venido caracterizando el nuevo marco de referencia para la instrumentación de la política energética (IDAE 2011a).

En este contexto, la ONU (2011a) lanzó su iniciativa sobre **Energía Sostenible para Todos** (*Sustainable Energy for All* initiative) con el fin de doblar el porcentaje de energías renovables en 2030 así como de asegurar el acceso universal a la energía y doblar el ratio de mejoras de eficiencia energética.

No obstante, cabe señalar que durante los últimos meses el precio del petróleo ha sufrido fuertes bajas, fundamentalmente debido a turbulencias geopolíticas: conflictos en oriente medio, tensión en los mercados de gas y petróleo procedente de Rusia, aumento de las extracciones en Estados Unidos y otros países atlánticos, entre otras causas por el aumento de la extracción por fracturación hidráulica o *fracking* (The Economist 2014). La nueva situación en el mercado del petróleo a nivel mundial condiciona los mercados energéticos a nivel global y, en consecuencia, la velocidad de desarrollo de proyectos basados en energías renovables, entre ellas, la bioenergía. Sin embargo, director general de la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA) no ve impacto directo de la bajada de los precios del petróleo sobre la generación de energía, sino sobre la producción de biocombustibles líquidos, su inversión y en la movilidad hacia coches eléctricos o híbridos (Clark 2015).

#### **b) en Europa**

Para hacer frente a la creciente dependencia de la energía importada, la Unión Europea se ha ido apoyando en una nueva política energética orientada a la consecución de tres objetivos principales: competitividad, desarrollo sostenible y seguridad del suministro (CE 2005).

Con el fin de alcanzar estos objetivos estratégicos a nivel comunitario se elaboró ya en 1997 el Libro Blanco para una Estrategia Común y un Plan de Acción para las Energías Renovables (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.

Este mismo documento planteó un objetivo consistente en alcanzar la aportación por parte de las energías renovables de un 12% del suministro energético con energías renovables en el año 2010.

La implementación legislativa de estas directrices políticas lleva a la Comisión Europea en 2001 a redactar la Directiva Europea sobre el fomento de producción de la electricidad a partir de las fuentes de energía renovable (Dir. 2001/77/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de septiembre de 2001 y Dir. 2003/30/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 8 de mayo de 2003) derogadas y ampliadas por Directiva Europea 2009/28/CE (Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009)

Por otra parte, en la comunicación de la Comisión Europea, de 7 de diciembre de 2005, la UE lanza el Plan de acción sobre la biomasa (CE 2005). La Comisión Europea señala en este momento tres sectores en los que el recurso a la biomasa debería ser prioritario: la producción de calor, la producción de electricidad y los transportes. El plan de acción sobre la biomasa se enmarca en la nueva política energética de la UE, descrita con detalle en el Libro verde sobre la energía (CE 2006). La mayor parte de las recomendaciones contenidas en ese documento fueron aceptadas el Consejo Europeo.

En cuanto a la Directiva Europea 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, se 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 (Dir. 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009).

Uno de los objetivos es que la proporción de electricidad “verde” (energía eléctrica generada a partir de fuentes de energía renovable), alcanzar una cuota del 20% de energía procedente de fuentes renovables en el consumo total de energía de la UE en 2020 y el objetivo vinculante mínimo del 10% para todos los Estados miembros para las energías procedentes de fuentes renovables en el transporte. Concretamente, el objetivo fijado para España fija en un 22,7% de la energía total consumida, la energía proveniente de fuentes renovables. Para ello, 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.).

En este sentido, muchos países han seguido políticas de apoyo al uso de los residuos agroforestales, desarrollando legislación específica, instrumentos financieros al sector empresarial e incluso ayudas a los usuarios finales por el uso de este tipo de biomasa, centrandose



estas políticas, programas y proyectos en municipios y comarcas de marcado carácter forestal de manera que al mismo tiempo se incrementaran la cohesión y el empleo en zonas rurales (AEBIOM 2007a).

Por otra parte, el Reglamento relativo a la ayuda al desarrollo rural a través del Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER), para el periodo 2007-2013 (R (UE) nº 1698/2005 del Consejo de 20 de septiembre de 2005), continúa la labor en la política de desarrollo rural desarrollada por el Fondo Europeo de Orientación y Garantía Agrícola (FEOGA). De esta manera, se acentúan las inversiones que bajo directrices estratégicas buscan como objetivo el aumentar la competitividad en los sectores de la agricultura y silvicultura, a través de diversos cauces como la modernización de explotaciones, concesión de ayudas a jóvenes, formación e información, fomento e inversión destinada a la producción de energías renovables, forestación de tierras agrícolas y no agrícolas, utilización sostenible de las tierras o protección de los bosques.

### **c) en España**

Poco después de producirse la segunda crisis internacional del petróleo, la promulgación de la Ley 82/1980, sobre conservación de energía, representó el punto de partida para el desarrollo de las energías renovables (IDAE 2011a). La aplicación legislativa del Libro Blanco para una Estrategia Común y un Plan de Acción para las Energías Renovables (CE 1997) lleva a la elaboración de la Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico, que estableció la liberalización del sector de la electricidad en España y fijó como objetivo para 2010 alcanzar un 12% del consumo de energía primaria a partir de fuentes renovables. 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 (IDAE 1999). A continuación, se generan las directrices del Plan de Energías Renovables 2005-2010 (PER 2005), en el que se abren las puertas de un nuevo mercado energético nacional. Los principales objetivos del PER 2005-2010 son:

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

De este objetivo del 12% del consumo total de energía un 63% se pretende alcanzar a través del uso de la biomasa.

Así mismo, en 2011 al Plan de Fomento se adscribe al segundo Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020 (PAEE 2011) que fomenta el empleo de energías renovables.

La Disposición adicional cuarta de la Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de Montes y su modificación en la Ley 10/2006 de 28 de abril, señalaba textualmente: “El Gobierno elaborará, en colaboración con las Comunidades Autónomas, una Estrategia para el desarrollo del uso energético de la biomasa forestal residual, de acuerdo con los objetivos indicados en el Plan de Fomento de las Energías Renovables en España.” Tal disposición puede entenderse como el punto de partida en la elaboración de la Estrategia Nacional para el desarrollo del uso energético de la biomasa forestal.

Esta Estrategia, elaborada por el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (MMAMRM 2010) con el asesoramiento del IDAE ha permitido identificar y cuantificar las mínimas cantidades de biomasa forestal procedente de restos de aprovechamientos madereros y otras operaciones forestales que deberían movilizarse, tanto para mejorar las áreas forestales como para contribuir al desarrollo de las energías renovables. Debe ser interpretada siempre como el marco flexible a partir del cual las Comunidades Autónomas elaboren sus propias estrategias para el fomento del uso de la biomasa forestal residual con fines energéticos.

Los objetivos operativos que persigue la Estrategia son:

1. Establecer la disponibilidad actual y futura del recurso en el ámbito nacional.
2. Movilizar la biomasa forestal residual, impulsando su uso energético.
3. Definir los instrumentos normativos y financieros necesarios, ya sea mediante la adaptación de los existentes o a través de la creación en su caso de otros nuevos.
4. Facilitar el desarrollo de un mercado competitivo y sostenible y de una cadena de suministro de la biomasa forestal residual.
5. Aplicar el Plan de Energías Renovables en España 2005-2010 (PER 2005), promoviendo el uso de la biomasa forestal residual como fuente renovable de energía y limitando la dependencia energética exterior.
6. Definir la posibilidad de abastecimiento continuo de biomasa forestal residual.

La Estrategia estima una disponibilidad de residuo en monte de aproximadamente 10 millones de toneladas anuales que pueden ser aprovechados de forma sostenible en el tiempo. Además, teniendo en cuenta otros usos de alto valor añadido que se le pueden dar a estos residuos de madera, como es la industria del tablero, la biomasa forestal que puede ser valorizada energéticamente es de unos 6 millones de toneladas anuales (ASEMFO 2010), lo cual cubriría sobradamente las previsiones del PER 2005-2010 para biomasa procedente de trabajos selvícolas según Martín-Pinto y Jiménez-Shaw (2011).

Según los mismos autores, a pesar de que sería posible obtener esa posibilidad de biomasa en los terrenos forestales, no se ha producido un arranque de este sector todo lo satisfactorio que cabría esperar debido a la existencia de diversos tipos de barreras y dificultades que explican la situación actual de la biomasa en España (Cerdá 2012). Estas barreras se sitúan tanto en el ámbito de los recursos, el desarrollo tecnológico o las aplicaciones y limitan la posibilidad de

lograr un mayor desarrollo a medio plazo según APPA (2009), CONAMA10 (2010) y Prada et al. (2006).

Ello, junto a la situación de predominancia de pequeñas extensiones de propiedad privada forestal y agrícola en muchas zonas de España ha dificultado la posibilidad de garantizar el recurso de forma sostenible en el tiempo para poder hacer viables instalaciones que utilicen biomasa agroforestal como combustible (Martin-Pinto y Jiménez-Shaw 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 y revisando a la baja los objetivos demasiado ambiciosos del PANER 2005-2010 (PANER 2005).

Igualmente, 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 nuevo Plan de Acción Nacional de Energías Renovables de España para el periodo 2011-2020 (PANER 2010). Para poder cumplir con el objetivo de que el 22,7% de la energía total consumida sea renovable, actualmente el PANER prevé mecanismos que incentiven la utilización de la biomasa forestal como fuente energética de manera que se pueda alcanzar un suministro de 338 kTep para el año 2020. Con estas políticas se ha previsto que la biomasa, con independencia del origen, aporte 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.

Por otro lado, el MARM también está desarrollando una serie de medidas específicas vinculadas a la Ley 45/2007, de 13 de diciembre, para el desarrollo sostenible del medio rural, a través del Programa de Desarrollo Rural Sostenible 2010-2014 (PDRS 2010) que pretende llevar a cabo un impulso de desarrollo en las zonas rurales. Entre las medidas destacadas en este Programa se encuentran aquellas destinadas al fomento de las energías renovables, con especial mención de la biomasa.

Por otra parte, la Ley 2/2011, de 4 de marzo, de Economía Sostenible, en su artículo 89.2.h destaca la importancia del desarrollo del uso de la biomasa con fines energéticos 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” debido a la estrecha relación entre este recurso y el territorio, hecho especialmente relevante para las administraciones municipales.

Además, 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 (PEPNB 2011) incluye una nueva acción en el desarrollo del uso energético de la biomasa agroforestal.

En cuanto a los nuevos fondos estructurales de la Unión Europea 2014-2020, el 80 % de estos fondos deberá utilizarlos España en generar una economía baja en carbono, en invertir en I+D+i y en conseguir un aumento de la competitividad de las empresas y Administraciones públicas. En estas tres líneas puede contemplarse la producción de energía con biomasa (FORESTA 2011) lo que representa una oportunidad de financiación para el sector. Por su parte, la reforma de la

Política Agraria Común 2014-2020 (CE 2013a), afirma que “promoverá el suministro y el uso de fuentes de energía renovables provenientes de restos, residuos y otras materias primas no alimentarias con el fin de alcanzar una bioeconomía”.

Por último el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, en colaboración con el IDAE, ha elaborado el Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020 (PAEE 2011), continuación del Plan 2008-2012 (E4 2008) para dar cumplimiento a lo exigido por la Directiva 2006/32/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre la eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos (Dir. 2006/32/CE de 5 de abril). En este Plan se recoge la medida 12 de introducción de calderas de biomasa en edificios de la administración pública y campañas de promoción de la biomasa.

### **d) en la Comunitat Valenciana**

El marco legislativo sobre el patrimonio natural y forestal en la Comunitat Valenciana se ha orientado hacia la protección del territorio y la conservación de sus recursos mediante diferentes figuras de protección (Red Natura 2000, Microrreservas, Paisajes Protegidos, Parajes Naturales Municipales, etc.) que cubren más de la mitad del territorio forestal valenciano. Esta protección se realizó a base de restricciones y prohibiciones de los usos del territorio (PATFOR 2011).

Sin embargo, se han desarrollado normativas relativas a la ordenación del territorio (Ley 4/2004, de 30 de junio, de la Generalitat, de Ordenación del Territorio y Protección del Paisaje; Ley 10/2004, de 9 de diciembre, de la Generalitat, del Suelo No Urbanizable; Ley 16/2005, de 30 de diciembre, de la Generalitat, Urbanística Valenciana, culminando con la aprobación, en el año 2011, de la Estrategia Territorial de la Comunitat Valenciana (Decreto 1/2011, de 13 de enero, del Consell) que han posibilitado la apertura de la gestión del territorio forestal por parte privada y de la administración.

Mediante Decisión de la Comisión de 16 de julio de 2008, se aprueba el Programa de desarrollo rural de la Comunitat Valenciana, que incluye la medida 226. *Mitigación de la desertificación. Prevención de incendios forestales* (Generalitat Valenciana 2013). Dicha medida incluye, entre otras, actuaciones encaminadas a promover estructuras forestales menos vulnerables a los incendios, vinculando la gestión forestal con las estrategias de lucha contra incendios. La valorización de la actividad y del producto forestal como la biomasa, constituye un elemento fundamental. En este sentido, la Conselleria de Infraestructuras, Territori i Medi Ambient (CITMA) 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) para el período 2009-2013 en terrenos forestales de la Comunitat Valenciana (Orden 2008/10625 de 12 de agosto de 2008). Esta Orden se actualiza con la Orden 1/2013, de 14 de enero, de la Conselleria de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente, por la que se aprueban las bases reguladoras de un régimen de primas para la puesta en valor de la biomasa forestal en terrenos forestales de la Comunitat Valenciana durante el período 2013-2015.

Por su parte, la Agencia Valenciana de la Energía (AVEN 2000), perteneciente a la Conselleria de Economía, Industria i Comerç desarrolló un Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2001-2010 para la CV, en donde se fomenta entre otras actuaciones la utilización de las energías renovables, con destacado papel de la biomasa (AVEBIOM 2010) a través de la subvención de la utilización de dichas energías y el fomento de proyectos de investigación sobre las mismas. Actualmente este Plan está siendo revisado en la Estrategia Energética de la Comunitat Valenciana 2014-2020 (IVACE 2013) y pretende apoyar el aprovechamiento energético de la biomasa y de los residuos, con el objetivo de alcanzar 60 MW en operación en 2015 así como desarrollar las instalaciones de biomasa a través de líneas de incentivos y financiación.

El Programa de Desarrollo Rural 2007-2013 de la Comunitat Valenciana (PDR CV 2006) también contempla ayudas a la *forestación* de tierras agrícolas en la Medida 221 del Eje 2., aunque actualmente no están reguladas por ninguna Orden. Por otra parte, el Plan Estratégico de Infraestructuras 2010-2020 de la Comunitat Valenciana, en el que se recoge que el 12 % de las energías primarias ha de proceder de las energías renovables (PIE 2011).

En 2012 se aprueba el Plan de Acción Territorial Forestal de la Comunitat Valenciana (PATFOR 2011) que pretende servir como herramienta de ordenación y gestión que articula y programa en el tiempo y sobre el territorio las actuaciones futuras de la administración en el ámbito de la política forestal y que da cumplimiento a la Ley 3/93 Forestal de la Comunitat Valenciana.

El PATFOR (2011) define, de forma participativa, un nuevo modelo forestal valenciano que responde a las demandas y necesidades de la sociedad y donde la biomasa juega un papel relevante:

- 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.

En cuanto al aprovechamiento de biomasa, el PATFOR propone desarrollar por parte de la CITMA estudios de viabilidad de la biomasa con fines energéticos.

Según PATFOR (2011), existe una falta de coordinación entre las administraciones para articular una política que favorezca el desarrollo ordenado del aprovechamiento de la biomasa forestal como recurso energético, que priorice su uso en la adjudicación de dichas ayudas y fomente el uso de biocombustibles por parte de la sociedad, implicando también a ésta en la mitigación del cambio climático.

Finalmente, entre las temáticas que contempla el nuevo PDR 2014-2020 pendiente de aprobación por parte de la Unión Europea y elaborado con el consenso de la Dirección General de Medio Ambiente de la Comunitat Valenciana y la Plataforma Forestal Valenciana como representante de la sociedad civil, se amparan medidas de inversión en planificación e instrumentos de gestión forestal sostenible (con un presupuesto en torno a los 14 millones de euros), inversiones para la transformación y comercialización de biomasa y otros productos (10 millones de euros), inversiones para la mejora del potencial socioeconómico de los bosques (con 1 millón de € presupuestados). Las principales acciones contempladas en estas medidas incluyen asistencia técnica y asesoramiento sostenibilidad económica y ambiental, compra de maquinaria, calderas y equipos, inversiones para transformación y comercialización de biomasa o madera en toda la cadena, movilización de biomasa, madera y corcho y su transporte dentro de un bosque con maquinaria especializada y desarrollo de sistemas avanzados de aprovechamiento y logística de otros productos forestales: resina, corcho, aromáticas, miel, etc. Por todo ello el Nuevo Reglamento FEADER para el periodo 2014-2020 representa una oportunidad histórica de apuesta clara por el sector forestal (PFV 2014).

### **1.1.5. Marco jurídico-administrativo**

#### **a) en Europa**

A nivel europeo, según el documento “Burocracia en instalaciones de Bioenergía”, realizado por la Dirección General de Transportes y Energía de la Comisión Europea y en el que se comparan 130 casos reales de toda Europa, en 2009, la instalación de una planta de biomasa en España requería una media de 24 meses de trámites y de cinco a siete permisos, condiciones similares a las que se daban en Polonia y Grecia. En Alemania, sin embargo, la tramitación requirió uno o dos permisos y 17 meses de espera (FORESTA 2011).

**b) en España**

A nivel nacional, desde la Administración General del Estado se han están poniendo en marcha programas de financiación de pequeñas redes de calor y frío llevadas a cabo por empresas de servicios energéticos con un importe máximo por proyecto de 3,5 millones de € y que es aplicable para proyectos de biomasa solar y geotermia (PANER 2010).

En la actualidad los Estados miembros tienen en marcha distintos posibles sistemas de apoyo a la llamada “electricidad verde” (MMAMRMM 2010):

- Tarifas de alimentación garantizadas. Este sistema, conocido bajo la denominación genérica inglesa de *Renewable Energy Feed-in Tariffs* (REFIT), fija un precio en su totalidad (tarifa fija total) o en parte (prima o incentivo fijo) para los productores de electricidad verde y obliga a los operadores de la red a comprar la potencia que suministren. El precio se garantiza, por lo general, durante un período de tiempo dilatado con el fin de incentivar las inversiones en nuevas centrales de producción a partir de energías renovables. Las tarifas de alimentación actúan sobre la oferta y favorecen la entrada de electricidad verde en el mercado.
- Certificados u obligaciones. Cuando se produce electricidad a partir de una fuente renovable se emite un “certificado financiero verde”. Se pueden imponer cuotas de electricidad verde a las empresas y grandes consumidores, que pueden respetar ya sea mediante el uso de electricidad verde o mediante la compra de certificados verdes. Los certificados ecológicos negociables son medidas orientadas a la demanda que funcionan sobre la base de obligaciones de cuotas obligatorias que arrastran al mercado a la electricidad verde. Un certificado verde equivale habitualmente a un MWh renovable.
- Reducciones o exenciones fiscales. Las reducciones de impuestos de las inversiones, producción o consumo de electricidad verde constituyen sencillos ejemplos de medidas fiscales de estímulo de la oferta o la demanda. A menudo estas medidas consisten en la exención del pago de «ecotasas» o de las tasas sobre el CO<sub>2</sub> a que se someten las fuentes de energías procedentes de combustibles fósiles. Las medidas financieras también pueden incluir tipos de interés reducidos sobre los préstamos, lo que reduce los costes de las inversiones y favorece la creación de capacidad de generación a partir de nuevas fuentes renovables. Otro mecanismo se basa en un apoyo a la inversión que incluye la aportación directa de subsidios para la construcción de capacidad de generación a partir de fuentes renovables. Se trata de una medida de estímulo de la oferta y puede adaptarse en función de las particularidades de las distintas fuentes de energía renovables de acuerdo con las políticas nacionales o regionales.
- Apoyo a la inversión. Consiste en subsidios para la construcción de capacidad de generación a partir de fuentes renovables. Se trata de un estímulo a la oferta. El sistema de apoyo que mayoritariamente prevalece es el de tarifas o primas mínimas, ya que adecuadamente diseñados han demostrado ser capaces de impulsar el desarrollo de las

energías renovables de manera simple y eficaz en cuanto a objetivos, eficiente en cuanto a costes y competitiva en relación al mercado.

En cuanto a ayudas e instrumentos de apoyo para el uso de la biomasa forestal con fines bioenergéticos, a nivel nacional, a través del Real Decreto 661/2007 (RD 661/2007 de 25 de mayo) se estableció el marco legal para la producción de electricidad y energía térmica a partir de biomasa, en el cual se fijaban las primas por kWh eléctrico producido en instalaciones de régimen especial. Este mecanismo conocido como *feed-in tariff* se basaba en garantizar el cobro de una remuneración por tecnología superior al precio del mercado mayorista adjudicando este sobrecoste a través de la propia tarifa eléctrica (IDAE 2011a). En dicho régimen estaban incluidas las instalaciones que usan como combustible los residuos procedentes del monte, pero las instalaciones de producción de calor (que son las de mayor eficiencia energética), quedaron excluidas de apoyo.

Sin embargo, finalmente el Consejo de Ministros aprobó el Real Decreto Ley 1/2012 (RDL 1/2012 de 27 de enero) por el que paraliza las ayudas a las energías renovables. Esta medida, sin carácter retroactivo, afecta a las tecnologías acogidas al régimen especial (eólica, solar fotovoltaica, termosolar, cogeneración, biomasa, biogás, minihidráulica y de residuos), al igual que a las instalaciones de régimen ordinario de tecnologías asimilables a las incluidas en el régimen especial. Esto supone la aplicación de una tasa del 4,5% a la generación de electricidad con biomasa que según AVEBIOM (2012) hace inviable nuevos proyectos bioenergéticos.

Por otra parte, el IDAE otorga ayudas directas, es decir a fondo perdido, a través de las Comunidades Autónomas, a inversiones en determinadas tipologías de proyectos que promueven la eficiencia energética o que impulsan las energías renovables.

Estas ayudas incluyen las que se enmarcan en el Plan de Energías Renovables 2005-2010 (PER 2005) y en el Plan de Acción 2008-2012 de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España (E4 2008) y se gestionan de forma compartida con las CC.AA. a través de sendos convenios establecidos entre el IDAE y cada CC.AA.

Las respectivas CC.AA. son las encargadas del desarrollo de los programas de ayudas públicas, su preparación y convocatoria de bases reguladoras, gestión, tramitación y valoración técnica de expedientes, resolución de dichas ayudas, certificación y pago de las mismas, incluyendo el régimen de control, y, en su caso, el de reintegro y sancionador.

Igualmente, el IDAE, a través de diversos proyectos en el área de la biomasa como BIOMCASA y BIOMCASA II promociona y financia los proyectos de biomasa térmica en edificios.

### **c) en la Comunitat Valenciana**

A nivel autonómico de la Comunitat Valenciana, el aprovechamiento de biomasa con fines energéticos cuenta con financiación proveniente de las siguientes agencias y administraciones:



- Orden 10/2010, de 9 de abril, de la Conselleria de Infraestructures i Transport, sobre la concesión de ayudas de la Agencia Valenciana de la Energía (AVEN), en el marco del Plan de Acción de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética 2008-2012 (PAE4+) en las empresas, sector de la edificación, servicios públicos, comunidades de regantes, cogeneración y diversificación energética para el ejercicio 2010.

Con una ayuda del 10% del coste elegible y un máximo de 200.000 € por proyecto (debiendo cumplir el ratio energético económico mínimo de 2,82 ktep/M€.), promueve la construcción de plantas de cogeneración de alta eficiencia en la Comunitat Valenciana, en el sector terciario no industrial, mediante el otorgamiento de ayudas económicas que disminuyan el coste extraordinario de inversión en relación a otras cogeneraciones de sectores industriales más tradicionales.

También promueve las plantas de cogeneración de pequeña potencia, promoviendo la instalación de sistemas de cogeneración de potencia eléctrica igual o inferior a 150 kW con una cuantía máxima de la ayuda hasta el 30% en función de la potencia eléctrica de la cogeneración.

Por otra parte se fomenta las inversiones en cogeneración industrial mediante la subvención de la renovación de equipos principales y auxiliares que optimicen la cogeneración existente con una cuantía máxima de la ayuda del 10% del coste elegible y un máximo de 200.000 € por proyecto.

- Orden 13/2010, de 10 de mayo, de la Conselleria de Infraestructures i Transport, sobre la concesión de ayudas de la Agencia Valenciana de la Energía (AVEN), en materia de Energías Renovables y Biocarburantes, para el ejercicio 2010 con una cofinanciación por parte del IDEA y un presupuesto asignado para el área de la biomasa de 875.000 € que contempla actuaciones de biomasa térmica/eléctrica (aplicaciones industriales, domésticas e instalaciones híbridas solar térmica/biomasa térmica), equipos de tratamiento en campo de biomasa para su astillado o empacado, con fines energéticos y plantas de fabricación de pellets/briquetas con subvenciones a fondo perdido de hasta el 45 % del coste subvencionable de proyecto.
- Resolución de 28 de junio de 2013, del presidente del Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial (IVACE), por la que se convocan ayudas en materia de energías renovables y biocarburantes, para el ejercicio 2013. El objeto de este programa es impulsar las actuaciones encaminadas a la explotación de los recursos energéticos renovables y fomentar el uso de los biocarburantes. Durante el ejercicio 2013, las ayudas recogidas en la presente resolución cuentan con financiación del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), en un porcentaje del 80%, a través del Programa Operativo de la Comunitat Valenciana 2007-2013. Subvención a fondo perdido de hasta el 45% del coste elegible del proyecto.

En cuanto a biomasa, se financian instalaciones para el aprovechamiento de la energía solar mediante captadores térmicos e instalaciones híbridas de captadores térmicos y calderas de biomasa e instalaciones para el aprovechamiento (térmico y/o eléctrico) de residuos forestales, agrícolas, industriales o materia prima procedente de cultivos.

Equipos de tratamiento en campo de biomasa para su astillado o empacado, con el único fin de su utilización en procesos energéticos, maquinaria específica e instalaciones para fabricación de pellets/briquetas, para su uso energético; inversiones en equipo y maquinaria específica para la adaptación de camiones cisterna destinados a la distribución y/o suministro a granel de biomasa para su uso energético.

En este sentido, el rango energético financiado es el de producción de energía térmica para uso doméstico o en edificios, instalaciones de calefacción con sistemas de recuperación y distribución de calor, aplicaciones térmicas industriales (hasta 10 millones kcal/h), generación de energía eléctrica (hasta 10 MW) y cogeneración (hasta 10 MW).

- Orden de 1 de diciembre de 2009, de la Consellería de Medio Ambiente, Agua, Urbanismo y Vivienda, por la que se aprueban las bases reguladoras de un régimen de primas para la puesta en valor de la biomasa forestal residual en terrenos forestales de la Comunitat Valenciana.

El objeto de las ayudas, vigentes hasta 2013, y de 51€/t eran la retirada y puesta en valor de la biomasa forestal residual procedente de incendios, de aprovechamientos forestales y de trabajos de mejora de la estructura forestal de las masas arboladas y selvicultura preventiva sobre Terrenos forestales de la Comunitat Valenciana no gestionados por la Conselleria de Medio Ambiente, Agua, Urbanismo y Vivienda, y aquellos otros terrenos forestales de titularidad municipal gestionados por la Conselleria.

- Orden 1/2013, de 14 de enero, de la Consellería de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente, por la que se aprueban las bases reguladoras de un régimen de primas para la puesta en valor de la biomasa forestal en terrenos forestales de la Comunitat Valenciana.

El objeto de las ayudas es la retirada y puesta en valor de la biomasa forestal procedente de incendios forestales, de aprovechamientos forestales y de cortas de mejora que tengan objeto la conservación de la estructura forestal de las masas arboladas. Los trabajos de retirada de la biomasa forestal abarcarán recogida, empacado y astillado y en su caso apilado, debiéndose incluir la biomasa en plantas de valorización energética. Se mantienen los 51€/t vigentes hasta 2015, siendo excluidos de la subvención cualquier corta de árboles mayores de 23 cm de diámetro.

Según PATFOR (2011), la actual CITMA subvencionó 17.000 toneladas de biomasa forestal para su valorización energética, siendo la cantidad máxima subvencionable, 20.000 t/año, lo que corresponde al 14% del biocombustible que se podría extraer.

Según la misma fuente, la inversión pública en gestión forestal en la Comunitat Valenciana se sitúa por debajo de los 50 €/ha y año, lo que constituye algo menos de la mitad de lo que se necesitaría para gestionar la totalidad de los montes privados y públicos. En cuanto a la financiación privada, la rentabilidad casi nula de los usos actuales junto con una escasa

innovación en usos y mercados, ha hecho que vaya desapareciendo paulatinamente, hasta su casi desaparición.

Sin embargo, la coyuntura económica ha provocado, a partir del año 2009, una importante disminución de la financiación pública recogida en los Planes Económico-Financieros de Reequilibrio 2012-2014 de las Comunidades Autónomas aprobado en el seno del Consejo de Política Fiscal y Financiera (RDL 20/2012, de 13 de julio).

Como consecuencia, en el año 2009 el presupuesto correspondiente al Servicio de Gestión Forestal y el Servicio de Prevención de Incendios y Sanidad Forestal de la Comunitat Valenciana 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).

También hay que tener en cuenta que en el año 2014, se han dado diversas licitaciones por parte de la Conselleria de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente con el fin de redactar planes de ordenación de los recursos forestales:

- Licitación número 2014/21/16. Servicio de redacción de proyectos de ordenación de varios montes de utilidad pública de la demarcación forestal de Xàtiva.
- Licitación número 2014/21/21. Redacción del Plan de Ordenación de Recursos Forestales de la demarcación forestal de Sant Mateu.
- Licitación número 2014/21/18. Redacción de proyectos de ordenación de varios montes de utilidad pública de la demarcación forestal de Segorbe (Castellón).
- Licitación número 2014/21/19, Redacción de proyectos de ordenación de varios montes de utilidad pública de la demarcación forestal de Chelva.

Así mismo, el Ayuntamiento de Enguera (Valencia), en agosto de 2014 ha subastado el aprovechamiento de biomasa en los montes de utilidad pública números 72, 74 y 75, denominados Los Altos, Navalón y La Redonda, del municipio de Enguera, lo que sugiere nuevos pasos hacia la gestión público-privada de los montes públicos con el fin de movilizar la biomasa existente y generar valor añadido.

En cuanto a temas jurídicos suscitados con el aprovechamiento de la biomasa como bionergía, según Martín-Pinto y Jiménez-Shaw (2011), existen dos grandes grupos de trabas. De una parte, las relativas a las dificultades de celebrar contratos entre el titular de la planta y los diversos propietarios de las masas forestales, que garanticen en a largo plazo el suministro continuado de la materia prima para el funcionamiento de la planta de biomasa, y de otra parte, las asociadas a

las carencias de la regulación forestal, que no contempla de forma específica la problemática del aprovechamiento de la biomasa salvo algunas excepciones.

Según los mismos autores, en los montes públicos tampoco resulta sencillo compatibilizar los principios de concurrencia y transparencia a los que obliga la legislación de contratos del sector público, con la necesidad de concertar contratos, por ejemplo, con varios Ayuntamientos. La aplicación de la normativa de contratación pública encuentra también un escollo en el difícil encaje de los contratos forestales, que se han considerado contratos de obras, contratos de servicios y, sobre todo, contratos administrativos especiales, de los previstos en el artículo 19.1.b) de la Ley de Contratos del Sector Público (Pérez-Soba Díez del Corral y Solá Martín 2003) si bien la escasa regulación que ofrece esta última Ley para los contratos administrativos especiales hace plantear la conveniencia de que las Comunidades Autónomas regulen este tipo de aprovechamientos en montes públicos.

Cuando se trate de montes declarados de utilidad pública, lo dispuesto en el artículo 208 del Reglamento de Montes (Ley de Montes 43/2003) exige que para el caso de que no exista proyecto de ordenación o plan técnico, que existan al menos planes facultativos de aprovechamientos periódicos. Estos planes deberían ser preferiblemente plurianuales, y ha de preverse de forma específica el aprovechamiento de la biomasa.

Si se trata de montes privados, los contratos de aprovechamiento son también complejos, y conviene partir de un clausulado marco al que se deben adherir los propietarios de los montes, aun cuando se puedan establecer también cláusulas particulares que tengan en cuenta prevenciones para el supuesto de incumplimiento por parte de propietarios que supongan un volumen de materia a proporcionar debido a que se incumple en la cadencia o cantidades de biomasa previstas, dada la gran inversión que se realiza para el establecimiento de la industria se puede dar la paralización de la planta, con los graves perjuicios económicos consecuentes (Martin-Pinto y Jiménez-Shaw 2011).

### **1.1.6. Marco socio-económico**

Según Martínez Fernández et al. (2013) la biomasa forestal para uso energético reúne características que la convierten en un recurso competitivo en el mercado de las energías renovables. La gestión sostenible de los recursos en el monte, su aprovechamiento y transformación en biocombustibles y la valorización de éstos en energía térmica y/o eléctrica consumida crea cadenas de valor que contribuyen de forma significativa al desarrollo socioeconómico en zonas rurales.

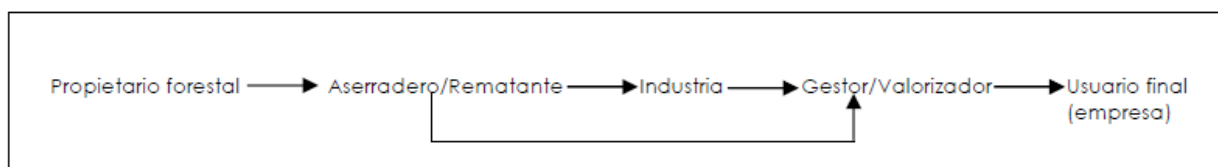
## a) Cadenas de valorización bioenergética

En cuanto a la valorización de biomasa forestal, ésta suele darse a través de la generación de productos bioenergéticos, principalmente, biocombustibles: astillas y pellets. Por otra parte, existe también biomasa forestal no transformada como leñas y restos de poda que se destinan directamente a gestores de residuos.

En este sentido, existen tres cadenas de valor bioenergético:

### a.1. Cadena de valor de energía térmica.

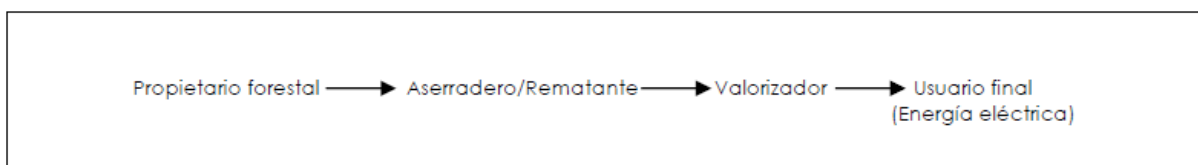
Valorización de la biomasa como combustible energético en empresas por combustión directa de astillas. La cadena de valor se refleja de forma esquemática en la Figura 5.



**Figura 5. Esquema de la cadena de valor de la energía térmica. Fuente: elaboración propia.**

### a.2. Cadena de valor de energía eléctrica.

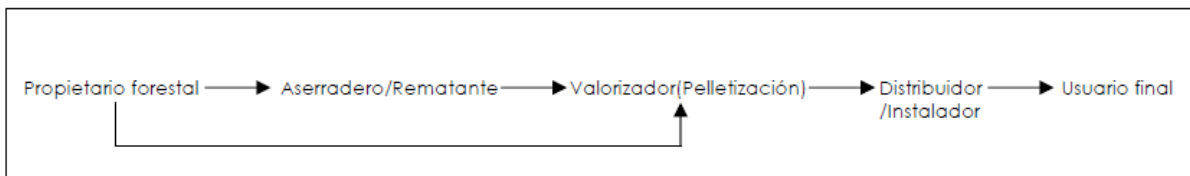
Valorización de la biomasa a través de la combustión o gasificación de astillas para la generación de energía eléctrica. Esta valorización se da en centrales de generación de energía eléctrica que posteriormente es subida a la red eléctrica para su distribución final. La cadena de valor se refleja de forma esquemática en la Figura 6.



**Figura 6. Esquema de la cadena de valor de la energía eléctrica. Fuente: elaboración propia.**

### a.3. Cadena de valor de fabricación de biocombustibles sólidos.

Valorización de la biomasa a través de la elaboración de biocombustibles sólidos para la generación de energía térmica, fundamentalmente pellets, pero también briquetas. Esta valorización se da en industrias de elaboración de pellets que posteriormente distribuyen el producto para su consumo en calderas de generación de energía térmica. La cadena de valor se refleja de forma esquemática en la Figura 7.



**Figura 7. Esquema de la cadena de valor de biocombustibles sólidos. Fuente: elaboración propia.**

Las astillas pueden ser utilizadas para generar energía eléctrica mediante su combustión o gasificación en centrales de generación eléctrica o para generar energía térmica (mediante cogeneración, CHP *combined heat and power*) que emplean para los sistemas de calefacción de la propia fábrica (Pellets@tlas 2009).

Por otra parte, las industrias de elaboración de biocombustibles sólidos de alto valor añadido (pellets) distribuyen su producto principalmente para su consumo en calderas de generación de energía térmica (agua caliente sanitaria y calefacción). Estas fábricas de pellets suelen destinar parte de las astillas no pelletizables y residuos del proceso de pelletización (como pellets defectuosos) a la combustión directa en planta para sus propios procesos industriales.

El resto de material biomásico es gestionado por empresas autorizadas como gestoras de residuos y suele tener como destino final la industria del tablero (uso material) y, en algunos casos, la elaboración de compost.

## b) Sector de la bioenergía

### b.1.) en Europa

En 2010 el 75% de la biomasa en la EU27 fue utilizada para generar calor, un 11% para generar electricidad y un 14% para biocombustibles (AEBIOM 2012). Los biocombustibles son casi exclusivamente producidos a partir de cultivos agrícolas como el maíz o la remolacha azucarera. La generación de electricidad a partir de biomasa está dominada por la

cogeneración térmica y eléctrica, con un 64% de la energía total producida a partir de biomasa en plantas de CHP (AEBIOM 2012). Más del 50% de la energía térmica producida es utilizada a nivel doméstico. Este sector está dominado por plantas a pequeña escala que van desde estufas de tan sólo unos kW utilizadas para calentar habitaciones individuales, a calderas de hasta 500 kW para mayores consumidores tales como escuelas o piscinas (IDAE 2007). El *distric heating*, es decir, la red de calor centralizada a nivel municipal, donde una planta central de biomasa (normalmente entre 100-1.000 kW) abastece de calor a las casas circundantes (usualmente entre 20-100 unidades) ha aumentado significativamente durante los últimos años están muy extendidas en el Centro y Norte de Europa (IDAE 2007). Sobre una tercera parte del calor generado es utilizado con fines industriales, principalmente para el procesado de la madera, como por ejemplo el secado de madera o papel (AEBIOM 2012).

Según Mantau (2010), en la UE el uso de la biomasa forestal se da en forma de aprovechamiento de leñas en estufas de manera tradicional. La contribución de los pellets a este fin se ha incrementado de manera significativa durante los últimos años y en el momento del estudio suponía un 7% del uso de la biomasa forestal para bioenergía. De nuevo, este uso se da a nivel doméstico privado. Una cuarta parte de esta biomasa forestal proviene de residuos de las industrias de transformación de la madera, destacando la cantidad de licor negro rico en lignina procedente de aguas residuales tras la cocción de las pastas celulósicas en las industrias papeleras.

Una cuarta parte de la biomasa forestal es utilizada por los productores de calor y energía, dominando la producción térmica seguida de la combinada CHP. En 2010 existían aproximadamente 7.000 plantas de CHP operando en la UE (AEBIOM 2012). El desarrollo de biorefinerías, es decir la fabricación de los biocombustibles líquidos a partir de biomasa forestal se encuentran aún en un estado de prueba y las plantas piloto existentes operan con muy pocas cantidades de recurso. Hoy día, se han probado esquemas a escala de laboratorio o piloto, pero todavía no ha sucedido una implementación comercial importante (Clark 2007, Kamm y Kamm 2004).

## b.2.) en España

Según IDAE (2011b), el conjunto de los hogares españoles gastan en energía cerca de 17.000 millones de euros, con una media de 990 € anuales por hogar. La energía eléctrica es la fuente más utilizada (35,1%), seguida por el gas natural (24,9%), los productos petrolíferos (22,1%), las energías renovables (17,7%) y el carbón (0,1%). Del 17,7 % de energías renovables, la biomasa es claramente la que más energía aporta (94,2%), seguida de la solar térmica (5,4%) y la geotermia (0,5%). Según IDAE (2011b), las energías renovables se encuentran presentes en el 11% de los hogares y aportan el 16 % de la energía destinada al agua caliente sanitaria (ACS). En cuanto a consumo de biomasa, esta representa el 35% del consumo para calefacción (con leñas y ramas) en instalaciones que se localizan sobre todo en el medio rural.

Sin embargo, el mercado doméstico considerado como fundamental para el desarrollo del aprovechamiento de la bioenergía, tiene un escaso conocimiento de las ventajas de utilizar astillas o pellets (FORESTA 2011).

Según el PANER (2010) para facilitar el uso de la biomasa se han instalado de forma singular, algunas redes con potencia de hasta 5 MW. Entre ellas destacan, el proyecto de Geolit (Jaén), primera instalación europea de biomasa con suministro de calor y frío a diversos usuarios, la red de calefacción de Cuéllar (Segovia), la red de calefacción en Molins de Rei (Barcelona) y el proyecto de Mataró-Tub Verd (Barcelona) o el proyecto Cantoblanco (Madrid) de red de climatización con energía geotérmica. En cualquier caso aún se trata de proyectos aislados. La misma fuente afirma que los proyectos impulsados por algunas empresas de servicios energéticos se encuentran con la gran barrera del desconocimiento y por consiguiente con la desconfianza, empezando por la propia administración.

Entre 2005 y 2011 la generación eléctrica con biomasa se ha incrementado en 199 MWe, a un ritmo de 33,16 MWe/año, procedentes de 29 proyectos con un tamaño medio de casi 7 MWe por instalación. La mayoría de estos proyectos están asociados a sectores industriales que utilizan subproductos o residuos propios como parte del suministro de biomasa. Por eso la potencia media es pequeña (45% de los proyectos < 6 Mwe) y las horas de funcionamiento medio son muy bajas (AVEBIOM 2012).

Según un informe del proyecto PELLCERT (2012), en 2010 existían en España 29 plantas de pellets con una capacidad de producción de 900.000 t anuales y una producción real de 150.000t. En cuanto a consumo se consumieron a nivel nacional 90.000 t. A día de hoy, según AVEBIOM (2014) el consumo de pellets en el mercado español en 2013 fue de 380.000 (más de cuatro veces respecto a las cifras del 2010) y la producción de pellets en España alcanzó las 350.000 toneladas (tres veces las producidas en 2010). Por otro lado, la producción de pellet en España está creciendo de forma sostenible: de las 38 plantas existentes en 2013, 30 poseen capacidad productiva superior a las 10.000 toneladas anuales, y siguen proliferando nuevos proyectos (AVEBIOM 2014). Según estimaciones del Observatorio Nacional de Calderas de Biomasa (ONCB 2013), a finales de 2013 funcionaban en España 80.000 instalaciones y la potencia acumulada alcanzaba los 5.000 MW térmicos. Las previsiones apuntan a que en 2020 llegarán a estar operativos 12.000 MW de potencia para uso térmico.

### b.3.) en la Comunitat Valenciana

Actualmente el sector bioenergético de la Comunitat Valenciana tiene un tejido empresarial poco desarrollado, siendo muy pocas las empresas que se abastecen de biomasa forestal en sus cadenas productivas. Tan sólo hay nueve empresas especializadas en la gestión de residuos de biomasa forestal, de las cuales, sólo cuatro se ubican cerca de las zonas forestales. PATFOR (2011) señala que hay cuatro empresas autorizadas por la misma Conselleria como valorizadoras, que usan la biomasa forestal para generar energía, todas ellas ubicadas en la costa.



El principal destino del aprovechamiento de biomasa propia de la Comunitat Valenciana, es decir, prácticamente toda la producción de astillas, es la exportación en barco a Italia para la producción de pellets (Pellet@las 2009a). Los altos costes de extracción y la ausencia de un mercado consolidado en torno al biocombustible forestal, que pueda acoger el recurso disponible, dificulta el desarrollo de este sector a nivel regional (PATFOR 2011).

Tan solo existe una planta de gasificación con una potencia de 1,5 MW (Xàtiva) que se alimenta exclusivamente de biomasa forestal (Cámara de Comercio de la Comunitat Valenciana 2009). Por otro lado, está prevista la instalación de otra planta con potencia en torno a 10 MW, en la comarca de Requena-Utiel, basada principalmente en residuos agrícolas lignocelulósicos del cultivo de la vid (sarmientos), y otros cultivos de secano, así como biomasa forestal.

En cuanto a fábricas de pellets, en la provincia de Valencia existe una fábrica en Montaverner (que basa su producción en biomasa forestal y agrícola) y otra en Castellón, así como dos empresas relacionadas con la fabricación e instalación de calderas de pellets (AVEBIOM 2014).

Así mismo, el PATFOR (2011) indica que en la Comunitat Valenciana existen una veintena de empresas generadoras de energía térmica que utilizan la biomasa mediante combustión de sus propios residuos, generando calor para sus procesos industriales, no estableciéndose un mercado de distribución de la energía. Cabe destacar el reciente proyecto de *district heating* en Todolella (Castellón), ya en funcionamiento y proyectos en diferentes municipios del interior de las tres provincias de Valencia, Castellón y Alicante.

### **c) Mercado de biocombustibles sólidos**

El biocombustible sólido más comercializado es el pellet. El uso de pellets de madera está creciendo rápidamente a nivel mundial y se espera que se incremente más de diez veces para 2020 (Sikkema et al. 2011). En el centro y norte de Europa existen mercados de pellets emergentes o definitivamente establecidos.

Según AEBIOM (2008) en diciembre de 2007 existían más de 440 plantas de producción de pellets a nivel mundial con una capacidad de entre 5.000-50.000 t/año, con una capacidad productiva mundial de 14 millones de toneladas anuales. La capacidad de producción y el tamaño de las fábricas de pellets han ido creciendo desde entonces. Entre 2008 y 2009 la capacidad de producción mundial instalada en la industria del pellet incrementó un 22% alcanzando 28 millones de toneladas. Los incrementos más altos en producción se dieron en Norte América (EEUU y Canadá) y Rusia, seguidos por países con tradición productora como Alemania, Suecia y Austria (AEBIOM 2012) como muestra la Figura 8.

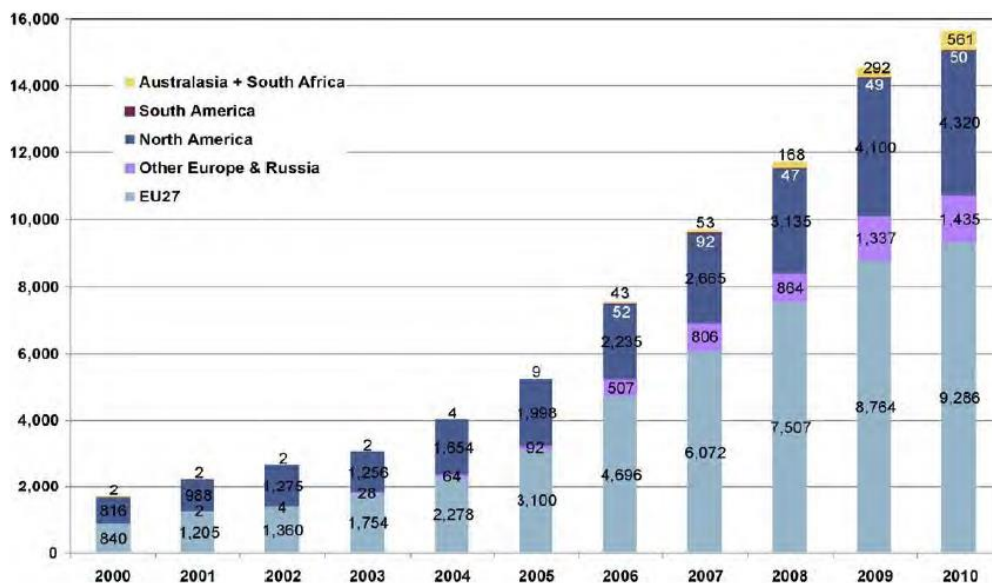


Figura 8. Estimación de la producción mundial de pellets entre 200-2010 en kilotoneladas. Fuente: Lamers et al. (2012).

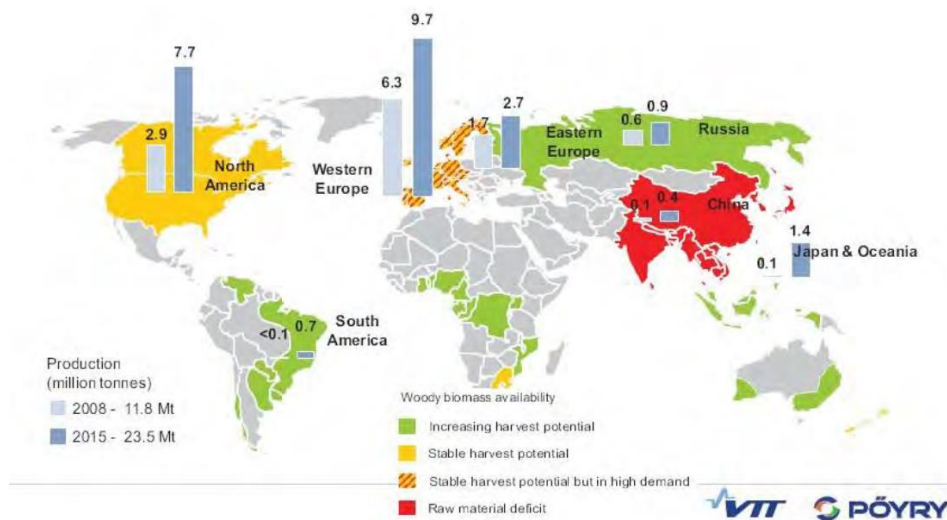


Figura 9. Disponibilidad de material y producción de pellets a nivel mundial entre 2008-2015. Fuente: VTT y Pöyry (AEBIOM 2012).

En cuanto a disponibilidad de biomasa, como muestra la Figura 9, Rusia y Sur América destacan por poseer una creciente capacidad de aprovechamiento, mientras que en Norte América el potencial de aprovechamiento permanece estable al igual que en Europa con la diferencia de que en Europa existe una alta demanda para otros productos. Por último en la mayor parte del resto de países asiáticos existe un déficit de material.

Según Sikkema et al. (2011) en 2009 tan sólo en Europa habían ya 650 plantas de pellets que producían alrededor de 10 millones de toneladas. El consumo de la Unión Europea (EU-27) era de 9,8 millones de toneladas (en 2009), suponiendo un 0,2% del consumo total bruto (unos 75 EJ en 2008).

En Europa la planta con mayor capacidad es la francesa situada en Alby con unas 200.000t/año de capacidad productiva, mientras que en Estados Unidos existen dos plantas una en Alabama y otra en Florida que superan los 500.000t anuales (Fernández 2009). Los pellets de estas plantas se embarcan para ser consumidas por las plantas de energía europeas (Marinescu y Bush 2009).

Sin embargo, el desarrollo del mercado de los biocombustibles sólidos presenta patrones diferentes entre los países del norte y del sur de Europa debido a razones bioclimáticas, políticas y económicas. El mercado de pellets de madera parece haber despegado con éxito en Italia aunque algo menos en España, mientras que en Grecia es casi inexistente (PROFORBIOMED 2012). Las dificultades que encuentran los productores van desde una dificultad de aprovisionamiento de materias primas hasta una falta de apoyo político y financiero (Passalacqua 2004).

El 90% del material procesado por las fábricas de pellets en España proviene de las industrias de la primera y segunda transformación de la madera (como aserraderos y fabricantes de mobiliario respectivamente). Pero estos residuos de madera se reciclan cada vez más en las fábricas en que se producen. Por otra parte, los residuos de madera también son muy valiosos para la industria del tablero, así que se da una gran competencia por esta fuente de material. Como consecuencia, algunas plantas de pellets han dejado de funcionar debido a las dificultades que comporta la garantía de un suministro de material tanto en calidad como en cantidad. Así pues, la dependencia de fuentes de material supone un serio obstáculo a la permanencia de la producción de pellets (Passalacqua 2004).

Según APROPELLETS (2012) el uso de biocombustibles sólidos para uso doméstico se ha incrementado notablemente y el consumo de pellets se encuentra orientado al mercado energético de pequeña escala (calefacción residencial). Concretamente de las aproximadamente 100.000 toneladas de pellets producidas en España, aproximadamente el 80% se destina a uso doméstico y calefacción de edificios públicos y privados y el resto a centrales de producción eléctrica, cementeras y cogeneraciones. Sin embargo, el consumo es más alto que la producción, y España necesita importar pellets provenientes de otros países europeos y de Canadá. Al mismo tiempo, parte de la producción española es exportada a Italia, Francia y Alemania. Esta aparente paradoja se explica por el mercado de precios del pellet (Passalacqua 2004).

El mayor consumidor de este producto en España es el sector doméstico, utilizándose principalmente en estufas equipadas con sistemas automáticos de alimentación. Por este motivo el sistema más usual de venta de los pellets es en sacos de pequeño tamaño (15-50 kg). En otros países, donde es muy común el uso de los pellets en sistemas de calefacción y producción de agua caliente sanitaria, tanto en viviendas unifamiliares como en edificios, y en calderas industriales, es muy normal que el material sea comercializado a granel y con un contacto directo con la fábrica, lo que permite reducir el precio de venta sustancialmente (Ortiz et al. 2003).

El fácil manejo y almacenaje de los pellets estandarizados así como su alta densidad energética (que hace muy eficiente su transporte) son factores clave en esta expansión de mercado, junto con la facilidad en que se disponen en calderas y estufas. Este rápido incremento en la producción de pellets conllevará inevitablemente a una escasez de recursos tales como polvo de aserrado y serrines, por lo que será necesario identificar fuentes de madera alternativas (Lestander et al. 2012).

En cuanto a datos económicos, Bush et al. (2012) indican que los precios de mercado, sus respectivas perspectivas, las condiciones de producción y los mercados de consumo varían según las clases de calidad de pellets. Estos autores afirman que en los mercados de pellets para uso residencial o doméstico en Europa, por lo general regionales, se espera un incremento del precio de los mismos. Por otra parte, en cuanto a los precios de los pellets industriales, más dependientes del producto y menos regionales se espera que estos se mantengan bastante estables debido a las grandes cantidades que aportaran nuevas regiones.

A nivel español, el precio medio de astilla en fábrica está entre 30 y 50 € por tonelada (ASERMA 2010), mientras que los precios de pellets oscilan entre 150 y 250 €/tonelada, según clases de calidad (Pellet@las 2009a). En el caso de la Comunitat Valenciana, donde no existen datos relevantes de mercados de pellets en el momento actual, los precios dependen de los distribuidores y oscilan entre 230-280 €/t (Factor Pelet 2010).

Pese a la potencialidad del desarrollo del mercado bioenergético, en la Comunitat Valenciana el sector se caracteriza por un bajo nivel tecnológico en la transformación, distribución y consumo de productos bioenergéticos (PATFOR 2011).

Las empresas que actualmente valorizan la biomasa residual de origen forestal demandan un producto de calidad caracterizado por (AIDIMA 2010):

- a) Material astillado (en función del precio y de si la empresa dispone de astilladora)
- b) Humedad del material entorno al 20% (para la elaboración de pellets la humedad debe ser entre el 8-12% y para la combustión o gasificación entorno a un 10-20%)
- c) Baja cantidad de impurezas (piedras, etc.) y acículas.

En este momento las empresas instaladas en la Comunitat Valenciana para la valorización de la biomasa como recurso energético establecen los siguientes precios de compra de la materia prima:

- a) BRF (incluyendo fustes no maderables): 30-50 €/Tn con humedad entorno al 30%, precio en fábrica (a mayor humedad menor precio).
- b) BRA lignocelulósica: 0 €/Tn; se asumen los costes de recogida, transporte y procesado.

Según AIDIMA (2010) en la Comunitat Valenciana existe una demanda incipiente de BRF para abastecer a la industria de la bioenergía. La calidad del material demandado viene marcada por las necesidades de la industria aunque en el caso de los requisitos en cuanto a humedad, la industria es la que actualmente se está adaptando a la disponibilidad del material.

#### **d) Asociaciones sectoriales**

##### d.1.) a nivel mundial

En cuanto a movimientos asociativos del sector de la bioenergía, cabe destacar asociaciones a nivel mundial especialmente activas como:

- La Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), organización intergubernamental creada oficialmente en abril de 2011 para promover el uso de las energías renovables y su producción y uso sostenibles. Sirve de plataforma para la cooperación internacional, centro de excelencia, repositorio de políticas, conocimientos en tecnologías y recursos y financiación en energías renovables. [www.irena.org](http://www.irena.org)
- *World Bioenergy Association* (WBA), nacida en mayo de 2008 es la organización mundial dedicada al apoyo y a la representación del amplio abanico de actores dentro del sector de la bioenergía (organizaciones, instituciones, empresas e individuos). Su propósito es promover el incremento del uso de la bioenergía a nivel mundial de manera eficiente, económica, sostenible y medioambiental. Constituye junto a otras energías renovables la asociación IRENA. [www.worldbioenergy.org](http://www.worldbioenergy.org)

##### d.2.) en Europa

- *European Biomass Association* (AEBIOM), fundada en 1990 agrupa 29 asociaciones nacionales del estudio de la biomasa y sobre 94 empresas. Es la voz del sector de la bioenergía a nivel europeo con los objetivos de desarrollo sostenible del mercado de la bioenergía y asegurar condiciones empresariales favorables para sus miembros. [www.aebiom.org](http://www.aebiom.org)
- *European Biomass Industry Association* (EUBIA). Establecida en 1996 agrupa empresas tecnológicas, mercados y centros de conocimiento activos en el área de la biomasa. Como objetivo principal apoyan a la industria europea de la biomasa a todos los niveles, promocionando el uso de la biomasa, desarrollando

conceptos innovadores y promoviendo la cooperación internacional en el campo de la bioenergía. <http://www.eubia.org/>

- *European Pellet Council* (EPC), forma parte de AEBIOM y constituye un organismo que representa los intereses del sector del pellet europeo de base lignocelulósica. Posee como miembros 17 asociaciones nacionales. Se encarga de tratar temas como la estandarización y certificación de la calidad de los pellets, la seguridad en el abastecimiento, educación y formación y la calidad de los pellets a través de dispositivos. [www.pelletcouncil.eu](http://www.pelletcouncil.eu)
- *European Industry of Pellet Suppliers* (EIPS), albergada por AEBIOM junto con EPC, constituye una plataforma que reúne a 16 compañías del mercado del pellet a nivel europeo. [www.pelletcouncil.eu/en/eips](http://www.pelletcouncil.eu/en/eips)
- *Sustainable Biomass Partnership* (SBP) reúne los mayores actores en el área del uso de la biomasa a grande escala a nivel europeo. [www.sustainablebiomasspartnership.org](http://www.sustainablebiomasspartnership.org)

### d.3.) en España

- La Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa (AVEBIOM) se constituyó en el año 2004 con el fin de promover el desarrollo del sector de la Bioenergía en España. Se encarga de dar visibilidad al sector, defender sus intereses ante las administraciones europeas, nacionales regionales y locales, establecer contactos, contribuir a la eliminación de barreras, divulgar las oportunidades que ofrece el uso energético de la biomasa y ofrecer información sobre el sector. [www.avebiom.org/](http://www.avebiom.org/)
- Asociación de Empresas de Energías Renovables, (APPA). Creada en 1987, la conforman sociedades de los sectores de los biocarburantes, biomasa, eólico, fotovoltaico, geotérmica de alta entalpía y geotérmica de baja entalpía, hidráulico, marino, minieólico y solar termoeléctrico. Existe una sección de trabajo dedicada a la biomasa donde se agrupan más de 30 empresas españolas dedicadas a la biomasa. APPA aboga por la valorización de residuos urbanos, agrícolas y ganaderos y la contribución de la biomasa, como energía gestionable, a la estabilidad del sistema eléctrico. [www.appa.es](http://www.appa.es)

### d.4.) en la Comunitat Valenciana

- Asociación de Municipios Forestales de la Comunitat Valenciana (AMUFOR) y la Asociación Forestal Valenciana (AFOVAL), que representan a los propietarios

municipales y privados respectivamente y que actúan como un instrumento de comunicación a nivel local y regional entre políticos y ciudadanos y que promocionan un mayor uso sostenible de la biomasa con el objetivo de prevenir incendios forestales, reducir la dependencia energética externa y fomentar el desarrollo y el empleo rural. [www.amufor.es](http://www.amufor.es); [www.geoscopio.net/empresas/afovalvalencia/](http://www.geoscopio.net/empresas/afovalvalencia/)

- Plataforma Forestal Valenciana, creada en mayo del 2013 es una asociación con carácter independiente y sin ánimo de lucro formada como un espacio participativo que integra actualmente a 31 instituciones y organizaciones que representan al conjunto de la sociedad civil forestal en la Comunitat Valenciana: asociaciones de propietarios públicos y privados, principales sindicatos agrarios, asociaciones empresariales del sector primario forestal y del sector de la madera, colegios y asociaciones profesionales, asociaciones conservacionistas, institutos tecnológicos y universidades públicas. La Plataforma pretende constituir un punto de partida para el desarrollo sostenible de la actividad forestal en la Comunitat Valenciana en el que compartir información y promover la investigación con los objetivos de vertebrar un sector tradicionalmente disperso, reconocer al propietario forestal como estrategia para favorecer el desarrollo del sector, la generación de valor medioambiental y socioeconómico, y contribuir a mejorar las condiciones de vida de los pueblos de interior. Uno de sus grupos de trabajo se dedica a la bioenergía y la prevención de grandes incendios forestales. La Plataforma Forestal Valenciana cuenta con un grupo de trabajo sobre Bioenergía Agroforestal. [www.plataformaforestalvalenciana.com](http://www.plataformaforestalvalenciana.com)
- APROBI-CV es la Asociación de Promoción de la Biomasa de la Comunitat Valenciana. Se constituyó en mayo de 2014 y cuenta en la actualidad con 20 empresas asociadas. APROBI-CV es una asociación que nace con sentido integrador, con voluntad de vertebrar los distintos eslabones que participan de este sector, desde el propietario forestal hasta los fabricantes, instaladores o distribuidores de calderas de energía térmica. Constituye la primera patronal valenciana dedicada en exclusiva a la biomasa térmica. [www.sinergiabiomasa.com](http://www.sinergiabiomasa.com)

### **1.1.7. Marco científico**

Con el fin de atender las demandas de las plantas que utilizan la biomasa como fuente de energía, muchos gobiernos y diversas organizaciones internacionales están impulsando programas para el estudio de inventario y valoración de los recursos forestales y agrícolas (Fernández-Puratich 2012). Líneas de investigación para el análisis del aprovechamiento de biomasa para uso energético se han abierto principalmente en Canadá, Estados Unidos, Alemania, Francia, Suiza, Austria y Escandinavia (OECD/IEA 2007).

### a) Programas de investigación

Entre todos los programas que existen a nivel mundial para el impulso de la bioenergía de base agroforestal, cabe destacar los siguientes:

- 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. A través de su programa de trabajo subdividido en tareas se desarrollan proyectos de investigación, desarrollo y demostración en el área de la bioenergía (combustión de biomasa, gasificación termal, comercialización, fuentes de biomasa para mercados energéticos, etc). <http://www.ieabioenergy.com/>
- *Biomass Programm* en Estados Unidos de la Oficina de Eficiencia Energética y Energías Renovables (EERE) del Departamento de Energía y dos programas de financiación del Departamento de Agricultura (USDA), *Hazardous Fuels Wood-to-Energy (W2E) Grant program* y el *Statewide Wood Energy Team (SWET) cooperative agreement program*. SWET apoya a las comunidades a realizar la planificación inicial, educación y formación y valoraciones preliminares para identificar fuentes de energía basada en madera prometedoras, mientras que W2E financia el diseño y otras construcciones previas necesarias para proyectos basados en bioenergía. Ambos promocionan el uso de la biomasa de las tierras del Sistema Nacional Forestal.
- *ForestEnergy2020* (2012-2016) es un programa de investigación e innovación financiado por METLA (Finnish Forest Research Institute) y VTT (VTT Technical Research Centre of Finland). Abarca toda la cadena de valor de la bioenergía, desde la producción de biomasa en monte, su logística, distribución y transformación en plantas hasta la distribución a usuarios finales. <http://www.forestenergy2020.org/>
- ERA-NET *Bioenergy* (2004-). Se trata de una plataforma creada en el entorno del Área de Investigación Europea (ERA- *European Research Area*) que promueve la interacción entre programas nacionales, regionales y europeos para la financiación de actividades relacionadas con la investigación, desarrollo de actividades conjuntas e implementación de programas transnacionales en el ámbito de la bioenergía. Financiada desde 2004-2010 por el 6º Programa Marco de Investigación y Desarrollo de la UE, continúa hoy en día sin financiación europea, sino por parte de los países integrantes. Pretende coordinar actividades nacionales y europeas con el objetivo de fortalecer los esfuerzos para alcanzar los objetivos de producción de energía renovable por parte de la biomasa y fortalecer la producción industrial mediante la cooperación y coordinación de programas de investigación a nivel europeo a través de conexiones internacionales. <http://www.eranetbioenergy.net/>
- El nuevo Programa Horizonte 2020, Programa Marco de Investigación y Desarrollo de la Unión Europea, establece como línea prioritaria el apoyo de los proyectos de



investigación entorno a la bioenergía a través de financiación de temas de investigación principalmente dentro del área de los biofueles en la sección de *Secure, Clean and Efficient Energy*. En el marco del programa Intelligent Energy Europe (IEE), la Comisión Europea financió hasta 2013 la investigación sobre barreras no técnicas que dificultan el acceso de esta energía renovable al mercado. Por otra parte, la gestión forestal sostenible, el desarrollo de zonas rurales y la provisión de servicios de los ecosistemas poseen financiación dentro de la sección *Food Security, Sustainable Agriculture and Forestry, Marine, Maritime and Inland Water Research and the Bioeconomy*. <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/>

- Programa LIFE+ financia proyectos que contribuyen al desarrollo y la aplicación de la política y el Derecho en materia medioambiental. Este programa facilita considerablemente la integración de aspectos medioambientales en las demás políticas y, de manera más general, contribuye al desarrollo sostenible. Financia proyectos en tres ámbitos temáticos: «Naturaleza y Biodiversidad», LIFE+ «Política y Gobernanza Medioambiental» y «Información y Comunicación», entre los que se encuentran proyectos dedicados a la cadena de valor de la biomasa y su utilización a nivel regional.
- Programa MED, cofinanciado por los Fondos de Desarrollo Europeos (FEDER) es un programa de cooperación transnacional que aborda desafíos más allá de límites nacionales con el fin de promover la cohesión territorial y mejorar áreas de competitividad transnacionales. Dentro de sus objetivos prioritarios la utilización de la biomasa ha estado presente en sus últimas convocatorias. <http://www.programmemed.eu/>

## **b) Redes de cooperación en investigación**

Por otra parte existen redes intergubernamentales de apoyo a la cooperación europea en ciencia y tecnología mediante la movilidad de la comunidad científica y el establecimiento de puentes entre comunidades científicas de distintos países. De entre las redes de cooperación en investigación en Europa, destaca en el área de la bioenergía la COST Action FP0902 “*Development and harmonization of new operational research and forest assessment procedures for sustainable forest biomass supply*”, <http://www.forestenergy.org>

## **c) Proyectos de investigación**

Algunos proyectos internacionales a destacar en el ámbito del uso de la biomasa de origen agroforestal con fines energéticos son:

- INFRES - *Innovative and effective technology and logistics for forest residual biomass supply in the EU* (2012-2014). Proyecto financiado por el 7<sup>a</sup> Programa Marco de Investigación, Innovación y Desarrollo de la UE. Tiene por objetivo la producción eficiente y precisa de biomasa de base forestal para la producción de calor y electricidad así como para el sector de las biorefinerías. Trata de desarrollar nueva maquinaria, soluciones de transporte y nuevas tecnologías de comunicación e información a lo largo de toda la cadena de gestión de la biomasa. <http://www.infres.eu/>
- IEA Bioenergy Task 43. - *Biomass Feedstocks for Energy Markets*. Este proyecto tiene por objetivo un desarrollo de la bioenergía a través de la toma de decisiones por parte de empresas, gobiernos, etc., con base científica y a través análisis realistas pertinentes. <http://www.ieabioenergytask43.org/>
- BASIS (2013-2016). Proyecto cofinanciado por el programa IEE y conformado por la AEBIOM junto con otras siete asociaciones nacionales de biomasa (Austriaca, danesa, francesa, italiana, alemana, española y sueca) con el fin de interactuar entre los promotores de proyectos bioenergéticos y los inversores, proporcionándoles una visión global sobre el uso sostenible de los recursos y la competición por la madera para con fines bioenergéticos. Se pretende así mismo proporcionar mapas intuitivos sobre potenciales de biomasa y el uso actual de la misma en forma de astillas y mostrar aspectos críticos para la sostenibilidad de la cadena de uso de la biomasa. <http://www.basisbioenergy.eu/>
- *The Cross Border Bioenergy project* (2010-2013) tiene por objetivo apoyar a las empresas a analizar el atractivo de los mercados bioenergéticos en Europa y apoyarles en la toma de decisión hacia su posible inversión en otros países. Para ello el proyecto ha desarrollado una herramienta que evalúa este atractivo para las empresas haciéndolas menos dependientes de la fluctuación de las condiciones de los mercados domésticos y fortaleciendo la totalidad de la industria de la bioenergía. <http://www.crossborderbioenergy.eu/>
- EUBIONET III - *Solutions for biomass fuel market barriers and raw material availability* (2008-2010). Tiene por objetivo incrementar el uso de la biomasa como biocombustible a nivel europeo mediante la búsqueda de soluciones efectivas para superar las barreras de mercado existentes. <http://www.eubionet.net/>
- Wood E3 Project - *Activation of wood energy* (2010-2013). es un proyecto MED cofinanciado por el programa FEDER, pretende presentar soluciones positivas y posibilidades potenciales para obtener y utilizar la biomasa leñosa en el área mediterránea. Su prioridad es fortalecer la competitividad del sector a través de un desarrollo regional sostenible a través del incremento de la concienciación y conocimiento de los actores implicados, especialmente los gestores de territorio, economistas y políticos [www.woode3.eu](http://www.woode3.eu).
- The BiomassTradeCentreII Project - *Development of Biomass Trade and Logistics Centres for Sustainable Mobilisation of Local Wood Biomass Resources* (2011-2014), es

un proyecto cofinanciado por IEE que tiene por objetivo incrementar la producción y el uso de la energía de base leñosa gracias a la implementación de estándares de calidad, concienciación y difusión de conocimiento entre los gestores a nivel local y regional y la introducción del uso de la bionergía en el sector público. Este proyecto sigue la idea de su predecesor, BiomassTrade Centers Project, que se centraba en los centros logísticos y de comercio de biomasa pero ampliándola a la importancia que tiene el control de la calidad para incrementar el consumo de biomasa en el mercado <http://www.biomasstradecentre2.eu>

- LIFE+07 Best4VarioUse - *Best Practices and Technologies to Develop Green Wastes and Residues as Raw Materials for Variants of Utilization* (2007-2010), tiene por objetivo la demostración, transferencia y aplicación de las metodologías convencionales e innovadoras para procesar residuos de aprovechamientos forestales, agricultura y gestión del paisaje. <http://www.best4varioususe.iff.fraunhofer.de/>
- LIFE+ 09 *Bioenergy and Fire Prevention* (2010-2013). El objetivo de este proyecto es el desarrollo de nuevas herramientas de gestión forestal que permitan la disminución del riesgo de incendios a través del aprovechamiento de la biomasa como energía renovable. Se pretende fomentar la generación de empleo rural mediante la gestión de la biomasa forestal. Como resultado se diseñó una Estrategia de Gestión Forestal Sostenible y se determinó la capacidad de producción de electricidad a partir de la biomasa generada en acciones de prevención de incendios forestales. <http://www.bioenergy-project.eu/>
- PROFORBIOMED (2010-2013), proyecto MED estratégico financiado por el programa de Cooperación Territorial Transnacional con el objetivo de promover el uso de la energía renovable en las zonas mediterráneas europeas mediante el desarrollo de una estrategia integrada para el uso de la biomasa forestal, la recuperación de su potencial, el desarrollo de los aspectos técnicos y jurídicos y la promoción de su uso para producir energía. <http://proforbiomed.eu/>
- The Biomass Policies Project (2014-2016), proyecto cofinanciado por IEE, tiene por objetivo desarrollar políticas integradas para la movilización eficiente de cadenas bioenergéticas con tal de contribuir a los objetivos bioenergéticos de 2020 dentro de los Planes Nacionales de Energías Renovables y otros objetivos políticos nacionales. <http://www.biomasspolicies.eu/>
- PromoBIO (2011-2014), proyecto financiado por IEE cuyo objetivo es activar iniciativas regionales bioenergéticas y ayudarles a establecer proyectos de negocio en los países del este de Europa a través del desarrollo de Planes de Acción de biomasa, asesoramiento para nuevos proyectos, desarrollo de talleres de políticas bioenergéticas, cursos de formación, etc. <http://www.promobio.eu/>
- PellCert - *European Pellet Quality Certification* (2010-2012). Financiado por el programa IEE, tiene por objetivo crear e implementar el sistema de certificación ENPlus para su uso por ambos, el sector térmico y eléctrico a nivel europeo y para las importaciones. [www.pellcert.eu](http://www.pellcert.eu)

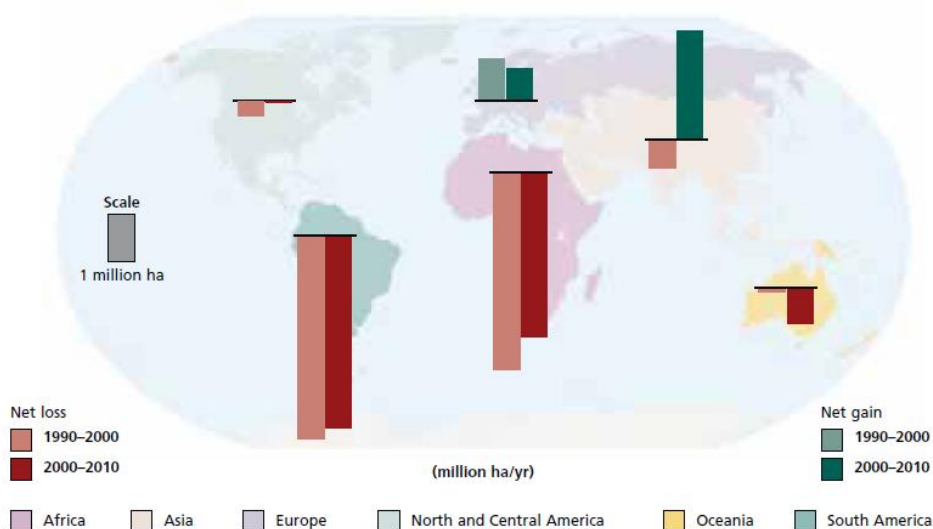
- MixBioPells - *Market implementation of extraordinary biomass pellets* (2010-2012), este proyecto financiado por IEE, el objetivo de este proyecto es identificar las restricciones y barreras para los pellets en detalle y encontrar conceptos prometedores de introducción de nuevos materiales en el mercado para mejorar el mercado de pellets alternativos en Europa. <http://www.mixbiopells.eu/>
- ENERSILVA (2005-2007) es un proyecto europeo de cooperación transregional financiado por el programa Interreg III B SUDOE. Su finalidad principal es dinamizar a los propietarios forestales particulares del sur de Europa en el aprovechamiento energético de la biomasa forestal primaria. En particular, ENERSILVA estudia las variables que inciden sobre el aprovechamiento de la biomasa forestal en los bosques y sobre la implantación de centrales de biomasa para producción de energía. Las especies objeto de aprovechamiento son de los géneros *Pinus*, *Eucalyptus*, *Quercus*, *Castanea* y *Populus*. [www.enersilva.org](http://www.enersilva.org)
- TIMBER - *Tools for Integrated Management of Biomass Energy Resources* 2010-2011 es una iniciativa europea enmarcada en el Programa “POWER: Economías de Baja Emisión de Carbono (INTERREG IVC)” cuyo principal objetivo es la creación de un modelo sostenible de aprovechamiento energético de la biomasa en la escala local. Cinco entidades públicas europeas trabajan de manera estrecha en el desarrollo de esta herramienta detectando barreras y dificultades, realizando estudios de viabilidad e identificando buenas prácticas en cada una de las regiones participantes. Finalmente, los resultados y la experiencia acumulada durante el desarrollo del proyecto se concretarán en la aplicación de este modelo para la elaboración de Planes de Acción de Biomasa a nivel regional. <http://www.powerprogramme.eu/>
- SILVAPLUS (2011-2012) El proyecto Silvaplus pretende desarrollar una nueva cadena de valor basada en la producción, transformación y consumo de biomasa forestal primaria con fines energéticos. El proyecto fue diseñado de manera que se privilegiase un componente práctico y operacional, a través de acciones en territorios específicos (Pontevedra y Minho-Lima), desarrollando nuevas áreas de actuación que puedan, posteriormente ser transferidas a otras áreas, potenciando su efecto demostrativo. Se pretende así mismo, buscar a través de la valorización de la biomasa forestal primaria, nuevas rentas para los propietarios forestales que compensen los largos turnos de corta de las especies forestales y contribuyan a la financiación de la actividad silvícola e influir en el mercado energético incentivando el uso de fuentes de energía renovable de producción local, contribuyendo tanto a la optimización de los recursos como al empleo local. <http://www.silvaplus.com/>

### 1.1.8. Marco forestal

#### a) a nivel mundial

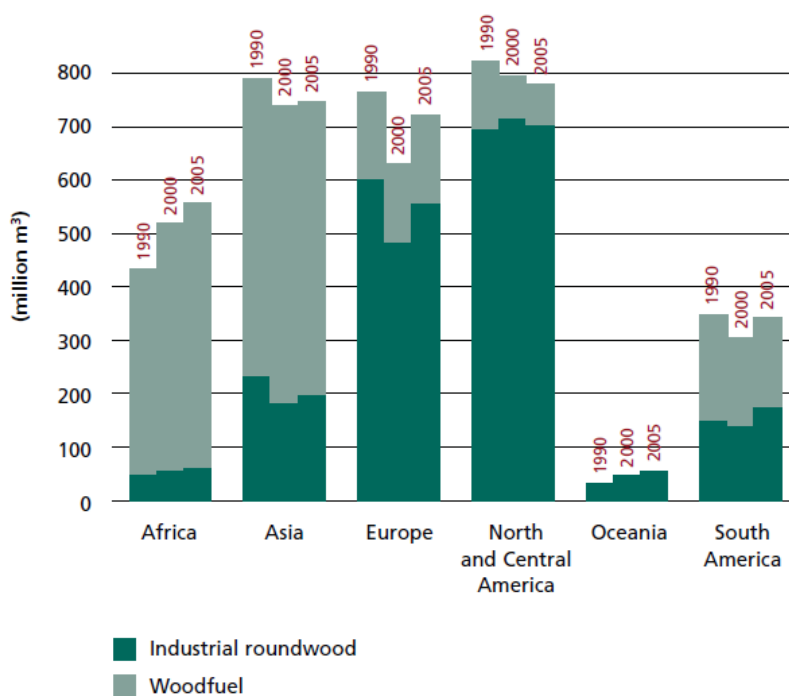
La superficie mundial cubierta por bosques ocupa aproximadamente 4.033 billones de hectáreas, de las cuales el 58% corresponden a zonas templadas y un 42% a zonas de clima tropical. Proporcionalmente, Europa (sin incluir a Rusia) no alcanza un 5% de esta superficie mundial de bosques pero es muy activa en el desarrollo de una gestión sostenible (FAO 2010). Esto corresponde con una media de 0,62 ha de bosque per capita, con diferencias significativas entre países según condiciones ecológicas principalmente (Scarascia-Mugnozza y Pisanelli 2008). Según los mismos autores Sur América es la región que más cobertura boscosa presenta, seguida por América del Norte y América Central.

Sin embargo, la deforestación, principalmente para la conversión de tierras forestales en agrícolas, sigue constituyendo un gran problema a nivel mundial pese a su decrecimiento en algunos países. La reforestación y la expansión natural de los bosques en algunas regiones han hecho que la pérdida neta de bosques a nivel mundial se reduzca de 8,3 millones de ha por año durante 1999-2000, a 5,2 millones de ha año en el período que va de 2000-2010 (FAO 2010). En la Figura 9 se puede apreciar esta variación por países. Así mientras que en Europa y en Asia existe una ganancia neta de superficie forestal en la última década (2000-2010), en Norte América, Sud América, África y Oceanía existe una balance neto de pérdidas aunque la superficie de bosque perdida se ha reducido en comparación con la década anterior (1990-2000), lo que en conjunto se traduce como una pérdida neta a nivel mundial.



**Figura 10. Cambio anual en superficie forestal por regiones desde 1999 al 2010. Fuente: FAO 2010.**

En torno al 30% de los bosques a nivel mundial (aproximadamente 1,2 billones de ha) son principalmente utilizados para la producción de madera y productos no maderables (FAO 2010). La cantidad de madera aprovechada durante 2003-2007 se sitúa en torno a 3,4 billones de metros cúbicos, sobre el 0,7 % de la cantidad de la posibilidad total. De esta cantidad, sobre la mitad de la madera aprovechada lo fue en forma de leñas y madera para combustible (*woodfuel*). La tendencia a nivel mundial puede observarse en la Figura 10.



**Figura 11. Tendencias del aprovechamiento forestal. Fuente: FAO 2010.**

Según la FAO (2010) cantidad de biomasa a nivel mundial (biomasa aérea y radical) se estima en 600Gt, lo que supone unas 149 toneladas por ha, cantidad que en Europa se traduce de media en 90 t/ha como muestra la Tabla 4.

**Tabla 4. Cantidad de biomasa forestal por regiones a nivel mundial. Fuente: FAO (2010).**

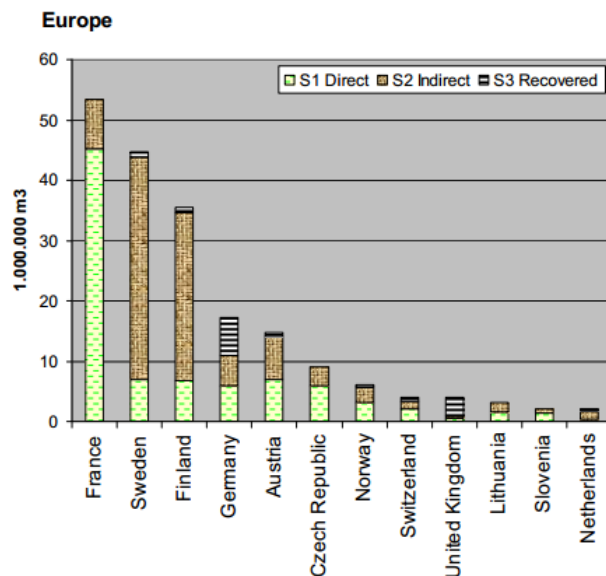
Region/subregion	Biomass	
	million tonnes	t/ha
Eastern and Southern Africa	33 385	124.8
Northern Africa	3 711	47.1
Western and Central Africa	81 603	248.7
<b>Total Africa</b>	<b>118 700</b>	<b>176.0</b>
East Asia	18 429	72.4
South and Southeast Asia	51 933	176.4
Western and Central Asia	3 502	80.5
<b>Total Asia</b>	<b>73 864</b>	<b>124.7</b>
Europe excl. Russian Federation	25 602	130.7
<b>Total Europe</b>	<b>90 602</b>	<b>90.2</b>
Caribbean	1 092	157.5
Central America	3 715	190.5
North America	76 929	113.3
<b>Total North and Central America</b>	<b>81 736</b>	<b>115.9</b>
<b>Total Oceania</b>	<b>21 302</b>	<b>111.3</b>
<b>Total South America</b>	<b>213 863</b>	<b>247.4</b>
<b>World</b>	<b>600 066</b>	<b>148.8</b>

## b) en Europa

Europa con Rusia incluida suma un cuarto de la superficie de bosques a nivel mundial, mientras que Rusia, que es el país de mayor superficie forestal del mundo cuanta con 800 millones de ha (Scarascia-Mugnozza y Pisanelli 2008).

En Europa, desde 1950 la superficie forestal se expande a un ratio anual de en torno al 0,5% debido al abandono de las tierras agrícolas, especialmente en las partes más montañosas y de más pendiente (FAO 2010). La mayor parte de la superficie forestal europea está constituida por bosques productivos que son gestionados para producir una variedad de productos y servicios (Scarascia-Mugnozza y Pisanelli 2008). Según los mismos autores, estas funcionalidades que adoptan los bosques varían por regiones, siendo en las regiones centro y norte europeas predominantes las funciones de producción maderera y servicios recreativos mientras que en las regiones del sur de Europa predominan las funciones de protección de los suelos frente a erosión y corrimientos de tierras así como mejora de los paisajes.

En cuanto al uso de la biomasa forestal con fines energéticos, según Steierer (2007) a partir de datos recopilados por la encuesta sobre energía de la madera de la FAO (2011) a la que respondieron 12 países de la Unión, esta supuso el 53% de madera equivalente aprovechada en Europa, en torno a 195 millones de metros cúbicos. De esta cantidad un 49% provenía de residuos de las industrias forestales (*indirect*), un 44% provenía directamente de su aprovechamiento en monte (*direct*) y en torno a un 7% provenía de productos usados al menos con un ciclo de vida consumido (madera recuperada, *recovered*). La Figura 12 muestra los resultados por países.



**Figura 12. Fuentes de bioenergía (wood energy) en Europa. Fuente: Steierer (2007).**

Según muestra la Figura 12 Francia destaca por ser el país en que un mayor número metros cúbicos de biomasa forestal se utiliza directamente con fines energéticos. Tras Francia, pero con gran diferencia, se encuentran Austria, Suecia, Finlandia y Alemania. En cuanto a cantidad de material proveniente de residuos de industrias forestales para usos bioenergéticos destaca Suecia, seguida de Finlandia, Austria y Francia. Por último, Alemania y Reino Unido destacan por ser los países en que se utiliza mayor cantidad de madera recuperada con fines energéticos.

Según FAO (2011) entre 2007 y 2011 el volumen de madera utilizado con fines bioenergéticos de este grupo de países se incrementó a un ritmo anual del 4% alcanzando en torno a 242 millones de metros cúbicos en 2011. Esto supuso un incremento del 4,3% al 5,4% en porcentaje que ocupa la bioenergía en el total de la energía primaria y un incremento desde el 49,8% al 51,4% del total de las energías renovables.

### c) en España

La superficie forestal en España ocupa a día de hoy el 54,85% del territorio español. Un total de 27,6 millones de ha, de las cuales el 66% son arboladas, es decir, unos 18,3 millones de ha (IFN3 2008). Con estas cifras, España se sitúa como tercer país en Europa en superficie forestal arbolada por detrás de Suecia y Finlandia y su masa forestal crece a un ritmo anual de 2,9% muy por encima de la media europea (0,51%), mientras que la tasa de extracción se sitúa en torno al 41% del crecimiento anual mientras la europea alcanza el 69% (IDAE 2011a).



Durante el siglo XX la superficie forestal ha sufrido un notable incremento. Concretamente este incremento ha sido de 3,38 Mha según Gómez y Mata (1993) desde 1940 hasta 1984 fruto de diversas políticas reforestadoras, iniciadas por el régimen franquista tras la guerra civil, que potenciaron las repoblaciones y plantaciones de frondosas (sobre todo de eucaliptos) y de coníferas (sobre todo pinos). Con la transición democrática y la consiguiente transferencia de las competencias en materia forestal y territorial a las Comunidades Autónomas, así como la influencia de la Política Agraria Común desde la entrada de España en la Unión Europea, se ha aumentado la superficie repoblada a nivel español. No obstante, aunque una proporción considerable de la superficie pública plantada se corresponda con masas protectoras en que la gestión es baja, hay un enorme potencial de producción de biomasa en cortas de mejora o claras (Tolosana 2013).

Según el mismo autor, la gestión forestal de estas repoblaciones y plantaciones ha sido por lo general olvidada y la mayoría de las masas no ha recibido ningún tratamiento selvícola, lo que ha derivado en unas masas forestales de baja calidad para el aprovechamiento de madera en rollo y una gran dificultad para acceder a bosques con una densidad de carreteras y vías de saca muy inferior a la media europea, lo cual desemboca de nuevo en un bajo interés de utilización del patrimonio forestal con fines económicos.

La gran cantidad de pinares repoblados durante los años 40-70 sobre los que no se han realizado primeras claras supone un riesgo para su estabilidad presente y su productividad y vida futura debido al alto riesgo de incendios que masas tan densas presenta (Ambrosio 2005).

La demanda creciente de biomasa forestal con fines energéticos puede constituir una buena oportunidad para movilizar el potencial forestal de estas repoblaciones y reducir este riesgo de incendios forestales. Además, este aprovechamiento energético aparece como una gran oportunidad para reducir la dependencia energética exterior y promover el desarrollo de un sector innovador con potencial indiscutible en nuestro país (Dopazo et al. 2013).

## **d) en la Comunitat Valenciana**

### **d.1.) Existencias**

En la Comunitat Valenciana existen 1,2 millones de ha forestales, de las cuales 747.821 ha son arboladas, lo que representa un 60% de la superficie forestal total. Toda esta superficie aporta apenas el 0,03 % al PIB autonómico (PATFOR 2011). Más de la mitad de los terrenos forestales son de titularidad privada y presentan diferencias significativas en cuanto al tamaño de las propiedades.

Dentro de la superficie arbolada, que ocupa más de un 54% de la superficie forestal, destacan las coníferas y en especial el *Pinus halepensis*, que es la especie dominante en el 72% de los terrenos arbolados, seguida a mucha distancia por el *Quercus ilex*, principal representante de las frondosas, y que no supera el 14% del monte arbolado (ver Tabla 5).

**Tabla 5. Clasificación de los ecosistemas arbolados en la Comunitat Valenciana y superficie ocupada. Fuente: PATFOR (2011).**

		<b>Ecosistemas</b>	<b>Superficie (ha)</b>
Coníferas	Cupresáceas	Arbolado de <i>Juniperus Thurifera</i>	4.015,00
	Pináceas	Arbolado de <i>Pinus halepensis</i>	518.664,00
		Arbolado de <i>Pinus nigra</i>	45.261,00
		Arbolado de <i>Pinus pinaster</i>	19.927,00
		Arbolado de <i>Pinus pinea</i>	1.572,00
		Arbolado de <i>Pinus sylvestris</i>	6.766,00
Frondosas quercíneas		Arbolado de <i>Quercus faginea</i>	5.669,00
		Arbolado de <i>Quercus ilex</i>	95.729,00
		Arbolado de <i>Quercus suber</i>	6.700,00
Otras		Otras formaciones arbóreas	11.287,00
		Vegetación de ribera	4.337,00
<b>Total</b>			<b>719.927</b>

Existen 596.205 ha de masas de coníferas puras de las cuales *Pinus halepensis* representa un 86% del total se puede apreciar en la Tabla 5. Esta especie representa la cuarta especie española con 73.443.552 m<sup>3</sup> y la primera en la Comunitat Valenciana con 13.408.019 m<sup>3</sup> en existencias con un crecimiento anual de 395.560m<sup>3</sup>.

La mayor parte de los pinares de carrasco (*Pinus halepensis*) (84%) se encuentra en estado adulto (latizal o fustal), dominando el estado de fustal. Aunque en Castellón y Valencia la proporción de monte bravo es superior, siendo muchas de estas zonas de regeneración natural tras incendio. Zonas que, en muchos casos, presentan unas muy elevadas densidades (PATFOR 2011).

Los pinares de pino rodeno (*Pinus pinaster*) aparecen según el PATFOR, mayoritariamente distribuidos en la mitad sur de Castellón y en el noroeste de Valencia, asociados a sustratos de menor basicidad. Más de la mitad de los ecosistemas de *Pinus pinaster* de la región están en la provincia de Valencia (11.430 ha). Los pinares de *Pinus pinaster* presentan densidades medias o altas en más de la mitad de su superficie, únicamente vegeta en forma de arbolado ralo en áreas relativamente restringidas. Muchas de las zonas donde aparece en forma de arbolado ralo han sido afectadas por incendios.

Por representatividad de las dos especies de coníferas predominantes en la provincia de Valencia, la tesis doctoral se centra con biomasa procedente de pinares de pino carrasco y rodeno (*Pinus halepensis* y *Pinus pinaster*).

#### d.2.) Distribución y tamaño de la propiedad forestal

En cuanto a distribución de la propiedad y tamaño de los montes, en la Comunitat Valenciana el 55,2% de los terrenos forestales pertenecen a particulares, el 38,6% son públicos y del 6,2% se desconoce su titularidad (PATFOR 2011).

La titularidad pública se reparte entre los ayuntamientos, que poseen tres cuartas partes de los terrenos forestales públicos, la Generalitat y otros entes locales. No obstante, no se dispone de datos totalmente exactos debido a la existencia de grandes áreas públicas que figuran con titularidad del antiguo Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza (ICONA) que pertenecen en realidad a Ayuntamientos o a la Generalitat.

En cuanto al tamaño de las explotaciones, en la provincia de Valencia el 70% de la superficie esta formado por explotaciones con un tamaño superior a las 25 ha. La práctica totalidad de las explotaciones de titularidad pública tiene un tamaño medio cercano a las 450 ha mientras que más de la mitad de la superficie privada está formada por explotaciones inferiores a 1 ha (PATFOR 2011).

En términos generales, el terreno forestal de la Comunitat Valenciana se caracteriza por estar dominado por un minifundio privado que, además, está fuertemente ligado e interconectado con el uso agrícola.

#### d.3.) Gestión forestal

En cuanto a su gestión, según PATFOR (2011) cada vez se saca menos madera de los montes valencianos. Este estima que el volumen de madera extraída ha disminuido más de un 50% desde el año 2003.

Apenas se hacen tratamientos selvícolas ni en monte público ni en privado. La escasa rentabilidad de los aprovechamientos de la madera y sus derivados (biomasa forestal) ha generado una gran dependencia de las subvenciones entre los propietarios privados. A pesar de la posibilidad de las subvenciones, los problemas asociados a éstas (dificiles procedimientos administrativos para la solicitud de las mismas, escasa cuantía económica que reportan, irregularidad en las adjudicaciones) dificultan una gestión sostenible y económicamente rentable en el tiempo en propiedad privada.

Los aprovechamientos que realizan los propietarios particulares son puntuales y están desligados de cualquier objetivo de gestión planificado en el tiempo y en el espacio. Muy pocos son los propietarios que gestionan sus fincas mediante instrumentos técnicos de gestión (menos del 2% de la superficie forestal cuenta con uno, y ninguno de ellos está aprobado por la CITMA al no existir un procedimiento para ello).

En cuanto a la superficie forestal pública, solamente un 1,4% cuenta con plan de ordenación redactado cuando todos los montes de dominio público, de utilidad pública y protectores deberían contar con un plan de gestión, de acuerdo a la legislación forestal valenciana. Esta situación podría cambiar fácilmente, puesto que la administración

forestal cuenta con más de 100.000 ha de monte de utilidad pública con proyectos de ordenación caducados, que solamente necesitarían ser revisados y actualizados para su puesta en marcha.

La Conselleria de Infraestructures, Territori i Medi Ambient gestiona un 32% de la superficie a pesar de ser titular de menos de una décima parte de la misma. Este hecho, junto a la atomización de las propiedades y las dificultades para el asociacionismo dificulta la definición de una única estrategia de planificación y gestión forestal.

Datos de 2005 señalan una ordenación del 1,55% (19.600 ha) del total de la superficie forestal de la Comunitat. En este sentido, cabe señalar que tan solo 2 montes de utilidad pública se encuentran con un proyecto de ordenación en vigor a día de hoy (Pérez-Laorga 2013), aunque como se ha comentado en el Apartado 1.1.5, se están dando generando licitaciones recientemente que hacen prever un aumento de la superficie y número de montes ordenados en la Comunitat a corto-medio plazo. Según E. PRESS VALENCIA (2014) el objetivo de la administración es llegar a 100.000 ha de monte público ordenadas antes del fin de la legislatura.

#### d.4.) Recursos y aprovechamientos

En cuanto a recursos forestales, existe a día de hoy un total de volumen maderable de 20.065.059 m<sup>3</sup>, según el último inventario (IFN3 2008) lo que duplica las cifras del inventario anterior (IFN2 1996) que la situaba en torno a 10 millones de m<sup>3</sup>, con un crecimiento anual de 755.533 m<sup>3</sup> con corteza, lo que indica el gran potencial existente y mayormente inexplorado. Esta escasa explotación se ve reflejada en los volúmenes extraídos según MAGRAMA (2010): 32.953 m<sup>3</sup> de madera de coníferas y unos 3.359 m<sup>3</sup> de madera de frondosas en la Comunitat Valenciana.

Según AFOVAL (2008), la media española de desaprovechamiento de la biomasa forestal se encuentra en un 90%. Esta media que es un poco menor en el caso de los montes de la Comunitat (81,5%). De las 500.000 toneladas anuales de biomasa forestal potencial que se pueden aprovechar en la Comunitat, estiman que se aprovechan unas 92.500 toneladas al año, esto es un 18,5%.

#### d.5.) Modelo de desarrollo forestal

Según el PATFOR (2011), desde la Administración se identifica en la Comunitat Valenciana un escenario forestal en el que se ha producido un abandono, casi generalizado, de la actividad, como consecuencia de los altos costes, la dificultad administrativa y el escaso reconocimiento social (PATFOR 2011):

1. Desvertebración de la cadena productiva del monte en la Comunitat Valenciana

Históricamente, y en contrapartida a lo que sucede en otras regiones españolas y europeas, en la Comunitat Valenciana se ha ido paulatinamente

devertebrando la cadena monte-industria-consumo. La potente industria forestal valenciana (madera, mueble, embalaje, papel) apenas ha podido ser suministrada con recursos por el monte valenciano, en lo que se ha denominado el “paradigma forestal valenciano”. El desarrollo industrial y la actividad forestal han sido divergentes, por lo que la función productiva del monte, clave para su mantenimiento y gestión, es una función residual en el conjunto de la gestión forestal y así ha ido asumiéndose en las administraciones y en la sociedad. La oportunidad que se abre con el aprovechamiento energético se enfrenta a esta debilidad histórica y clave del sector forestal valenciano.

2. Falta de infraestructuras para aprovisionamiento y transformación industrial en zonas rurales y altos costes logísticos

La difícil orografía forestal en el interior de la Comunitat Valenciana, la práctica ausencia de gestión en montes privados, el reducido número de montes públicos ordenados, el deficiente estado de las infraestructuras forestales, la debilidad del subsector de los trabajos forestales y su bajo grado de mecanización y especialización y la falta de parques industriales, infraestructuras y servicios en las zonas rurales son factores claves que incrementan los costes logísticos en el sistema de aprovechamiento forestal bioenergético, altos de por sí debido a la naturaleza y dispersión del recurso biomásico.

3. Falta de mercado local/comarcal de bioenergía

A pesar de que se están iniciando diferentes proyectos industriales, con apoyo de subvenciones y préstamos por parte de la Administración, hasta el momento no se dispone de un mercado establecido en la Comunitat Valenciana, ni de suministro (oferta) ni de distribución y consumo (demanda) de biocombustibles de base forestal. El desarrollo del mercado se debe basar en el consumo de los productos energéticos (enfoque demanda), que en un principio deben ser apoyados por medidas públicas. Sin embargo, la dependencia de las subvenciones constituye otra debilidad a superar mediante la necesaria regulación del mercado por sí mismo en un futuro.

Ante este diagnóstico realizado en el año 2011 desde el Gobierno Valenciano, la sociedad civil forestal se integró constituyendo la Plataforma Forestal Valenciana (PFV) en el año 2013. Según Oliver-Villanueva (2014), tras tres décadas de competencia autonómica en materia forestal y de desarrollo rural, el sector sigue adoleciendo de una serie de problemas históricos que han llevado a las siguientes debilidades o amenazas:

1. La superficie forestal ocupa más de la mitad de la Comunitat Valenciana, no estando reconocido el propietario forestal municipal o privado ni por la Administración autonómica ni por la sociedad. Esta superficie aumenta cada año de forma muy significativa a pesar de los incendios forestales. No obstante,

este aumento de masas forestales y de la consiguiente sobrecarga de combustible biomásico no viene acompañado de un aumento de su gestión, sino de un abandono generalizado de estas masas.

2. El sector forestal que siempre ha contribuido a fijar rentas para los dueños de los predios, basándose en la gestión activa, subsidiaria y sostenible, ha dejado de ser un generador activo de empleo y riqueza.
3. La Generalitat Valenciana apenas ha desarrollado políticas activas derivadas de una estrategia forestal, traduciéndose en un muy bajo índice de gestión, lo que genera desaliento y abandono, favoreciendo el despoblamiento rural y aumentando exponencialmente la propagación de incendios forestales de grandes dimensiones, como en el año 2012.
4. Existe una legislación abundante, a menudo contradictoria y, aunque principalmente proteccionista, no efectiva para poder asegurar el buen estado del patrimonio forestal. Esta situación lastra la gestión y los nuevos proyectos de los emprendedores y, por lo tanto, de una bioeconomía sostenible basada en el conocimiento y ligada al sector agroforestal, tal como prescribe la Comisión Europea y el Tratado de Lisboa. En el territorio llegan a coexistir hasta ocho figuras de protección sobre una misma superficie, con sus respectivas normativas y procesos administrativos diferentes.

Para favorecer el desarrollo sostenible del sector en su conjunto y poder generar un mayor valor medioambiental y socioeconómico contribuyendo a mejorar el nivel de empleo y las condiciones de vida en los pueblos del interior de la Comunitat Valenciana, la PFV propone las siguientes líneas de actuación prioritarias (Oliver-Villanueva 2014):

1. Potenciar y facilitar la gestión forestal sostenible a los propietarios forestales municipales y privados, posibilitando la generación de empleo y riqueza en las zonas del interior, impulsando un eficaz desarrollo rural, base de la cohesión territorial y social y otorgando el protagonismo y la responsabilidad de la gestión a los propietarios forestales municipales y privados, que nunca deben ser percibidos como agresores del medio natural.
2. Apoyar de forma decidida a través de la Administración la integración de proyectos de gestión forestal y el desarrollo de cadenas de valor de recursos forestales (aprovechamiento térmico o eléctrico de la biomasa residual forestal, cultivos de crecimiento rápido para biocombustibles o madera, hongos y truficultura, plantas aromáticas y medicinales para usos farmacéuticos o nutricionales, etc.) en la implementación de la nueva Política Agraria Común, en los Planes de Desarrollo Rural y en los contratos territoriales. En paralelo hay que redefinir el papel de la Red Natura 2000 para que realmente sea un instrumento de conservación de hábitats y especies ligado a potenciar aquellos usos tradicionales del territorio.

3. Incrementar los planes de gestión forestal sostenible de los montes valencianos. Se deben favorecer y apoyar los Planes de Ordenación Forestal a desarrollar en cooperación público-privada bajo la tutela de los técnicos de la Administración, permitiendo el desarrollo de empresas forestales locales como mejor sistema para generar empleo estable y de calidad en el medio rural.
4. Apostar decididamente por el sector de la bioenergía de base forestal como sustituto de los combustibles fósiles no renovables, basado en proyectos de gestión y aprovechamiento integral y responsable, transformación eficiente y consumo de biomasa a escala local o comarcal. Esta nueva cadena de valor puede actuar como elemento tractor de la reactivación de la gestión forestal sostenible, como se observa en otras regiones del entorno mediterráneo, constituyendo la mejor práctica de prevención activa de los incendios forestales.
5. Implementar los Pagos por Servicios Ambientales que generan los bosques, de los que se beneficia toda la sociedad. La conservación de la biodiversidad, la fijación de carbono, la recarga de acuíferos y la mejora de la calidad y de los ciclos del agua deben ser los aspectos prioritarios, ya que su gran valor debería verse reflejado en precios de mercado, generando flujos y actividad económicos.
6. Apoyar por parte de los agentes públicos y privados a la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación en todas las actividades de la cadena de valor forestal, así como la transferencia de conocimiento y de nuevas tecnologías.
7. Intensificar la formación avanzada y especializada en el sector forestal, así como la mejora de la educación y la cultura forestal en la sociedad valenciana.

## **1.2. Estado del arte**

### ***1.2.1. Modelos de cuantificación de biomasa forestal***

La estimación del volumen de fuste y de la biomasa arbórea es necesaria tanto para una planificación sostenible de los recursos forestales como para estudios de flujos de nutrientes y energía en los ecosistemas (Zianis et al. 2005). Del mismo modo, la biomasa forestal y evolución han sido consideradas como características clave de los ecosistemas forestales a lo largo del tiempo (Reichle 1982, Cannell 1982). Durante las últimas décadas, así mismo, la cantidad de carbono almacenada en la biomasa ha ganado una especial atención debido principalmente al Marco de la Convención sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas (UNFCCC) y el Protocolo de Kyoto (Somogyi et al. 2007).

La valoración sistemática de los recursos forestales sirve de fuente de información fiable para conocer la cantidad de volumen de los fustes a nivel nacional y regional y conforma una base adecuada los estudios de existencias de biomasa y carbono (Kauppi et al. 1992, Sedjo et al. 1992, Dixon et al. 1994, Laitat et al. 2000, Fang y Wang 2001).

Existen diversos modelos de cuantificación de la biomasa forestal. Los principales modelos de cuantificación de biomasa se basan en métodos tradicionales como la cuantificación a partir de la utilización de factores de biomasa, comúnmente conocidos como factores de expansión, o la utilización de ecuaciones de biomasa, es decir, ecuaciones a partir de variables alométricas que permiten calcular la cantidad de biomasa de un árbol de una especie determinada (Somogyi et al. 2007).

Otros modelos en desarrollo y cada vez más utilizados para estimar el contenido en carbono en los bosques y su cambio son modelos basados en imágenes satélite, fotogrametría aérea y en imágenes por láser (e.g. *Light detection and ranging* LiDAR) (Patenaude et al. 2004).

Como los inventarios forestales nacionales (IFN) están dirigidos al cálculo del volumen de los fustes su desventaja se centra en que carecen de estimaciones directas de biomasa (Lehtonen et al. 2004). En este sentido, además y salvo alguna excepción (Gracia et al. 1997), no existen estimaciones de biomasa para grandes áreas.

### **a) Metodologías de cuantificación**

En general, la valoración de la biomasa forestal y de las existencias en carbón almacenado se basan en información sobre los recursos forestales como por ejemplo, estimaciones del área forestal e incremento de volumen de las existencias según inventarios forestales nacionales o gran escala (Liski y Kauppi 2000). En estos inventarios se pone el énfasis en la valoración de la madera comercial y así pues los inventarios proveen de valoraciones de crecimiento de las existencias de gran exactitud (Laitat et al. 2003).

El volumen de las existencias se estima mediante la ayuda de ecuaciones de volumen. Estas ecuaciones están disponibles para la mayoría de especies en Europa de manera que se han desarrollado para diferentes zonas de vegetación basándose en su mayoría en un gran número de árboles muestreados. Sin embargo, estas ecuaciones de volumen varían en términos de dimensiones de lo que se considera como madera comercial (Zianis et al. 2005).

Debido a la gran cantidad de recursos necesarios para realizar mediciones concretas, la valoración de la biomasa a nivel de campo en la práctica es realizada, por lo general, de dos maneras indirectas (Somogyi et al. 2007), a través de factores de biomasa o a través de ecuaciones. También se van incluyendo paulatinamente nuevas tecnologías basadas, sobre todo, en imágenes satélite y sensores remotos.



## a.1.) Cuantificación por factores de forma (BF)

En términos generales, estos factores utilizan los datos de volumen de los árboles según vienen dados en los inventarios forestales u otras estadísticas nacionales y los multiplican por un factor apropiado, comúnmente conocido por Factor de Biomasa (BF) para según el caso necesario, expandir o reducir la estimación de volumen disponible a la estimación de biomasa requerida (Somogyi et al. 2007):

$$B = P \times BF$$

donde,

$B$  es la biomasa (en peso en verde o en seco, kg o t),

$P$  es el parámetro disponible del árbol o del rodal (e.g. volumen del árbol en m<sup>3</sup>)

BF es el factor de biomasa apropiado.

Este factor puede ser único que convierte directamente volumen maderable del fuste en biomasa del árbol completo (Schroeder et al. 1997, Fang y Wang 2001, Lehtonen et al. 2004) o bien puede ser doble, es decir, factores de expansión de biomasa (BEF) que convierten volúmenes maderables en peso en seco (factor de densidad) y de ahí a la biomasa completa del árbol (factor de expansión) (Johnson y Sharpe 1983, Karjalainen y Kellomäki 1996, Weiss et al. 2000).

Los factores de expansión y conversión más frecuentemente utilizados según Somogyi et al. (2007) son los siguientes:

1. Factor de expansión de volumen de fuste o comercial a volumen total
2. Conversión de volumen a biomasa
3. Expansión de la biomasa del fuste o comercial a la biomasa total del árbol

Estos BF se prefieren si existen solamente una agregación de la estimación del volumen, por ejemplo volumen de las existencias por especie arbórea.

## a.2.) Cuantificación por ecuaciones de biomasa (BE)

Otro modo de estimar la biomasa es aplicando una ecuación de biomasa adecuada (BE), que estima la biomasa como una función del diámetro a la altura de pecho (DAP) o DAP junto con otros datos medidos en una muestra de árboles, de nuevo prácticamente de los inventarios forestales (Somogyi et al. 2007):

$$B = f(P_1, P_2, \dots, p_1, p_2, \dots)$$

Donde  $B$  es la biomasa (en peso en verde o en seco, kg o t),  $P_i$  son los parámetros disponibles del árbol (e.g. DAP, cm; altura, m) y  $p_i$  son los parámetros de la ecuación.

Estas BE se prefieren si se tiene acceso a datos de muestras representativas de árboles de una población objetivo.

La mayoría de las BE se basan en unos cuantos rodales muestreados con un número muy limitado de árboles muestra, mientras que las ecuaciones de volumen se basan por lo general en datos más representativos que cubren mayores regiones geográficas. Además estas ecuaciones de volumen están disponible para la mayor parte de las especies arbóreas en Europa mientras que las ecuaciones de biomasa, desarrolladas generalmente sólo para la parte aérea de los árboles, cuentan con muy pocas ecuaciones desarrolladas en el sureste europeo (Zianis et al. 2005).

### a.3.) Nuevas tecnologías para la cuantificación

Recientemente se han utilizado nuevas tecnologías como tratamiento de imágenes satélite y sensores remoto para valorar el volumen y la biomasa forestal (Montes et al. 2000, Drake et al. 2002, García-Martín et al. 2006, Pflugmacher et al. 2014, Zhang et al. 2014). A este respecto, la extracción de información biofísica constituye una de las líneas más fructíferas en el ámbito de las aplicaciones forestales de la teledetección espacial (Bergen et al. 2000; Dobson 2000; Goetz 2000), siendo numerosos los trabajos orientados a la estimación de los índices de área foliar (LAI) y biomasa, principalmente con imágenes Landsat (Curran et al. 1992, Todd et al. 1998, Fazakas et al. 1999, Eklund et al. 1999, Mickler et al. 2002, Reese et al. 2002, Foddy et al. 2003, Phua y Saito 2003, Lu et al. 2004, Zheng et al. 2004).

Por otra parte, las técnicas LiDAR (*Laser Imaging Detection and Ranging*) han mejorado mucho las estimaciones de la estructura vertical de copas de la cubierta vegetal (Drake 2002, Dubayah 2002, Lefsky et al. 2005, Asner et al. 2010) pero la dificultad en su disponibilidad requiere de la fusión de múltiples fuentes de mapas de datos para calcular la biomasa aérea de grandes superficies (Zhang et al. 2014).

Cabe resaltar que la biomasa no puede ser medida directamente mediante imágenes satélite, sino a través de la reflectividad de las imágenes que puede ser relacionada con la biomasa estimada a partir de trabajo de campo (Dong et al. 2003, Muukkonen y Heiskanen 2005). Existen pocos estudios que hayan analizado las interrelaciones teóricas de los índices de vegetación obtenidos mediante sensores remotos y la biomasa (Zhang y Kondragunta 2006, Shi et al. 2013).

Los casos de aplicación han sido principalmente sobre bosques boreales densos, homogéneos y de topografía poco compleja, siendo escasas las experiencias sobre bosques mediterráneos (Salvador y Pons, 1998a y 1998b, Mallinis et al. 2004). Sin embargo, el estudio de Sevillano-Marco et al. (2013) cabe ser mencionado, ya que estos autores estimaron la cantidad de biomasa aérea a partir del Satélite Chino-Brasileño

---

(CBERS) y a partir de ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) sobre *Pinus radiata* en España.

Además hay una carencia importante de estudios acerca de la posibilidad de estimar biomasa forestal residual mediante imágenes satélite. Según Zianis et al. (2005), la estimación de biomasa depende de datos reales que deben ser medidos a partir de las dimensiones de los árboles y las BE son por tanto necesarias para predecir la biomasa en función de unas variables recogidas.

## **b) Casos de aplicación**

En general los factores de forma (BF) han sido aplicados para la estimación de existencias de biomasa forestal (FAO 2000, FAO 2001, Liski et al. 2002), aunque se conoce que estos factores varían con las condiciones de crecimiento y el estado de desarrollo del estrato forestal (Satoo y Madgwick 1982). En este sentido, las regresiones muestran una gran variación, no sólo por la zona geográfica (Ketterings et al. 2001), sino también por la calidad de estación, clima e incluso la edad de la población (Zianis y Mencuccini 2004).

Se han realizado grandes esfuerzos en facilitar la valoración de biomasa al representar esta una variable clave en el estudio de los ecosistemas (Somogyi et al. 2007). De esta manera, BF se publican en las experiencias de Fang et al. (2001), Lehtonen et al. (2004) y Levy et al. (2004).

Numerosas ecuaciones de biomasa (BE) específicas de ciertos rodales están disponibles. Así, recientes trabajos se han dedicado a desarrollar bases de datos de estas ecuaciones, por ejemplo Araújo et al. (1999), Parresol (1999), Zianis y Mencuccini (2004), Joosten et al. (2004) y Jenkins et al. (2004).

Zianis et al. 2005 recopila hasta 795 ecuaciones de biomasa y 238 ecuaciones de volumen. En este extenso trabajo, tan sólo un pequeño número de regresiones de biomasa y de volumen del fustal se recopilaron en el sur de Europa.

En España, las regresiones obtenidas son escasas, pudiendo destacar los trabajos existentes sobre el rebollo (González 1988), el pino pinaster (Esteban y Carrasco 2001) y la encina (Canadell *et al.* 1988), si bien en algunos de ellos se estima la biomasa aérea total, es decir tanto la biomasa residual como la del fuste.

Más recientemente, Montero et al. (2005) estimaron la producción de biomasa (aérea y radical) y la fijación de CO<sub>2</sub> para las 32 principales especies forestales (13 coníferas, 15 frondosas y 4 de laurisilva y fayal-brezal) y para los grupos de “otras coníferas”, “otras frondosas” y “otras laurisilva” consideradas en el Inventario Forestal Nacional a través del apeo, desrame, tronzado y separación de las siguientes fracciones de una muestra de árboles para cada especie:

- Fuste
- Ramas con diámetro mayor de 7 cm.

- Ramas con diámetro entre 2 y 7 cm.
- Ramillas menores de 2 cm. y hojas.

Cada una de las fracciones anteriores fue pesada en verde, y posteriormente, en laboratorio, se determinó el valor equivalente de biomasa en materia seca. Los datos obtenidos fueron ajustados, para cada especie, mediante modelos estadísticos lineales que permitieran relacionar y expresar la biomasa seca de cada parte del árbol con el valor de diámetro normal (DAP) medido a 1,30 m del árbol.

Montero et al. (2005) obtienen para cada una de las especies:

- 1) Tablas con valores modulares de biomasa seca por clase diamétrica, correspondientes al total del árbol y a cada una de las fracciones.
- 2) Incremento anual de biomasa para el árbol completo y cada una de las fracciones.
- 3) Valores modulares de CO<sub>2</sub> fijado en un individuo, por clases diamétricas.
- 4) Incremento del CO<sub>2</sub> acumulado anualmente por un árbol, resultado del crecimiento anual de los individuos de una masa forestal.

### **c) Problemática de las metodologías de cuantificación**

Diferentes métodos han sido publicados y están disponibles para calcular la biomasa y el volumen de árboles (Laasensanaho 1982, Marklund 1988, Brandel 1990, Korhonen y Maltamo 1990, Hakkila 1991), pero según Lethonen et al. (2004) estas ecuaciones para árboles individuales no son aplicables para la conversión de volumen del fuste de la masa de árboles en un bosque o estrato concreto a biomasa a nivel regional o nacional.

La experiencia indica que, al contrario que los datos de inventarios forestales que están diseñados para representar condiciones forestales sobre grandes áreas, los diversos BF y BE dependen en gran medida de las condiciones locales (Wirth et al. 2003, Zianis et al. 2005). Esto ocurre no sólo porque dependen de las especies, lugar, edad, tipo de tratamientos selvícolas, etc., sino también porque las definiciones que abarcan son distintas. Además cabe destacar que la mayoría de las BF y BR disponibles en la literatura se basaron en casos de estudios con condiciones específicas y, generalmente, con pocos ejemplares de muestra (Wirth et al. 2003). El objetivo de estos estudios era representar solamente las condiciones locales, no grandes áreas sobre los que puedan o deban ser luego aplicados (Somogyi et al. 2007). Además según los mismos autores, su aplicación resulta controvertida en ciertas ocasiones, fundamentalmente debido a la inconsistencia o uso inapropiado de las definiciones que implican. Al no existir una terminología estandarizada de los distintos factores, el uso de los términos y definiciones es a menudo confuso.

### **d) Estudios de cuantificación de biomasa**

#### d.1.) A partir del cálculo de biomasa en pie

En cuanto a proyectos de cuantificación de biomasa a nivel nacional y regional, la mayoría siguen la metodología de Montero et al. (2005), ampliamente aceptada por la comunidad científica en España, para a partir de datos de volumen procedentes del IFN obtener cantidad de biomasa en pie.

Algunos de los proyectos desarrollados son los siguientes:

- Proyecto LIGNOSTRUM (“Metodologías para evaluar el potencial de biomasa residual agrícola y forestal y sus posibles aplicaciones energéticas. Validación en la provincia de Teruel” (2002-2005). Dpto de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Zaragoza

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) que se podrían o deberían aprovechar en un territorio, con el propósito final de promover su valorización energética.

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

El objetivo principal de este estudio ha sido la aplicación de la metodología desarrollada en el proyecto LIGNOSTRUM a la provincia de Huesca.

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. Se evalúan dos tipos de biomasa para cada uno de estos grupos: biomasa potencial y estimación de la biomasa disponible.

- Análisis del potencial de biomasa de la provincia de Cádiz con fines energéticos (Diputación de Cadiz 2011)

En este estudio se valora cualitativa y cuantitativa de la biomasa potencial de la provincia de Cádiz se determinará cuáles son las superficies, y por ende los municipios, donde resulta más viable tanto técnica como económicamente realizar el aprovechamiento de los residuos agrícolas y/o forestales con fines energéticos.

Con este objetivo se pretende inventariar las superficies susceptibles de aprovechamiento de biomasa existentes en la provincia, y estimar su óptimo de producción de biomasa para elaborar un mapa de zonas potencialmente productivas de biomasa.

Esta publicación forma parte del proyecto TIMBER inscrito en el programa europeo INTERREG IVC.

- “Plan de Fomento de la utilización de los residuos forestales y agrícolas con fines energéticos: Evaluación de los residuos forestales y agrícolas potenciales en España”(Vignote et al. 1999). Plan realizado por Tecnologías y Servicios Agrarios, S.A. (TRAGSATEC) en colaboración con las Escuelas Técnicas Superiores de Ingenieros de Agrónomos y de Montes, para el Instituto de la Diversificación y el Ahorro de la Energía (IDAE) para el cálculo de la biomasa arbórea
- “Estudio de los recursos de fitomasa en la zona 1 de la Comunidad Autónoma de Galicia”. Estudio realizado por Tecnologías y Servicios Agrarios, S.A. (TRAGSATEC 2000) para Gestión Energética de Galicia, S.A. (GESTENGA) para el cálculo de la biomasa procedente de matorral.
- Estimación de la producción de biomasa en la provincia de Cuenca (Velazquez-Posada y García-Cobos 2007).

El objetivo del estudio es el análisis del potencial de biomasa existente en la provincia de Cuenca para el abastecimiento de combustible de una central eléctrica situada en Cuenca capital, estudiando a su vez los costes para verificar la viabilidad económica del proyecto.

- Evaluación del potencial de energía de la biomasa. Estudio Técnico PER 2011-2020 (IDAE et al. 2011)

El cálculo se centra en la biomasa generada a partir de los tratamientos sobre el vuelo arbóreo de las masas forestales existentes a partir de los cuales se pueden obtener restos o árboles completos con fines energéticos. La estimación de la biomasa se basa en ecuaciones de biomasa a partir de datos de volumen recogidos en itinerarios selvícolas para cada especie de las estudiadas y la posibilidad teórica proporcionada por los tratamientos a llevar a cabo a lo largo del turno correspondiente e itinerario. Este estudio estima una biomasa potencial disponible de 15,7 M t/año procedente del aprovechamiento de árbol completo en masas forestales existentes, parte de las cuales deberían proceder de cortas parciales (IDAE 2011a).

- Rigola y Bartrolí (2005). La biomassa com a Font de matèries primeres i d'energia : estudi de viabilitat al Montseny i Montnegre-corredor.
- Pla de Biomassa, Àmbit Forestal. Joanati et al. (2001). Conveni de col.laboració entre el Centre de Recerca Ecològica i Recursos Forestals (CREAF), el Centre Tecnològic Forestal de Catalunya (CTFC) i l'Institut Català de l'Energia. Generalitat de Catalunya, Departament d'Indústria, Comerç i Turisme.
- MMAMRM (2010). Estrategia Española para el desarrollo del uso energético de la biomasa forestal residual.

La metodología que se utiliza en la Estrategia Española para la cuantificación de la biomasa se basa en la metodología utilizada por Vignote et al. (1999) y TRAGSATEC (2000).

- PATFOR (2011). Plan de Acción Territorial Forestal de la Comunitat Valenciana.

El PATFOR, a través del estudio realizado por AIDIMA para VAERSA en 2010, desarrolla y calcula la metodología de estimación de biomasa forestal existente, la cantidad de biomasa forestal residual existente y la aprovechable y su potencial anual (posibilidad) en la Comunitat Valenciana. Así mismo se cuantifican las existencias y posibilidades de biomasa agrícola residual para los cultivos leñosos y se zonifica la Comunitat Valenciana en zonas supremunicipales consideradas autosuficientes para el aprovechamiento integral de la biomasa con fines bioenergéticos a través de sus propios recursos forestales y agrícolas.

Por regla general, en estos estudios tras obtener la cantidad de biomasa en existencias a nivel de un bosque, demarcación forestal o región, se obtiene la biomasa potencial teniendo en cuenta la posibilidad anual de producción de biomasa. El potencial total que se obtiene es susceptible de ser minorizado mediante la aplicación de restricciones tecnológicas, fisiográficas, ecológicas y socioeconómicas, con el fin de poder obtener el potencial real de biomasa disponible para ser aprovechado y utilizado.

### d.2.) A partir del cálculo sobre los aprovechamientos forestales

Otro tipo de estudios sobre biomasa recogen la cantidad de biomasa susceptible de ser utilizada a partir de biomasa de aprovechamientos forestales en lugar de biomasa en pie. Entre estos estudios destacan:

- Atlas de la biomasa forestal primaria en bosques cultivados de Galicia (Proyecto Biorreg Floresta 2006)

Resultado de un proyecto INTERREG IIIB “Espacio Atlántico”, este atlas de biomasa forestal pretende evaluar los recursos forestales de las provincias de A Coruña, Pontevedra y la comarca Mariña de la provincia de Lugo, identificando y tratando la información mediante sistemas de información geográficos (SIG).

Se estudia la biomasa procedente de aprovechamientos madereros y tratamientos selvícolas de poda, clareo y selección de brotes, descartando la evaluación de cortas intermedias comerciales, de policía, destocados y desbroces.

- WISDOM- ASTURIAS (Sánchez-García et al. 2015)

Este proyecto trata de la determinación de áreas de biomasa prioritarias para su aprovechamiento en Asturias a través de la herramienta WISDOM (Woodfuel Integrated Supply/Demand Overview Mapping).

La aplicación de esta herramienta sobre Asturias permite la identificación de áreas de actuación prioritarias donde convergen oferta local y demanda de biomasa basándose en la integración de aprovechamientos forestales, necesidades energéticas y datos socioeconómicos. Sirve para la detección de estas áreas y para el planeamiento estratégico del aprovechamiento de biomasa a nivel local, regional y nacional.

### d.3.) A partir de las nuevas tecnologías:

Otro tipo de estudios sobre biomasa han incluido nuevas tecnologías satelitales, de sensores remotos y de proyección de rayos láser. Entre estos trabajos destacan:

- Estimación de biomasa aérea en bosques mediterráneos a través del modelado estadístico de fracciones de imagen ASTER (Fernandez-Manso et al. 2014).

En este estudio se calcula la cantidad de biomasa aérea a partir de fracciones de imágenes de LSMA (Linear Spectral Mixture Analysis) para mejorar la débil relación entre biomasa aérea y bandas espectrales a partir de un bosque de *Pinus pinaster* en la provincia de Segovia.

- Datos CCD CBERS y ASTER para la caracterización dasométrica de *Pinus radiata* D. Don al noroeste de España (Sevillano-Marco et al. 2013).



Estos autores estimaron la cantidad de biomasa aérea a partir del Satélite Chino-Brasileño (CBERS) y a partir de ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) sobre *Pinus radiata* en España.

- Alta resolución de almacenaje de carbono forestal y emisiones en el Amazonas (Asner et al. 2010).

En este estudio se utiliza la tecnología LiDAR, imágenes satélites y parcelas experimentales para representar stocks de carbono en la vegetación sobre el suelo y sus emisiones en la zona peruana del Amazonas con el fin de revelar los factores determinantes de la densidad del carbono y constatar la efectividad de estos métodos para evaluar la Reducción de Emisiones desde la Deforestación y Degradación (REDD).

- Evaluación de los recursos de biomasa residual forestal mediante imágenes satélite Landsat y SIG (García-Martín et al. 2006).

En este estudio se desarrolla una metodología para evaluar mediante regresión logística la biomasa residual de los bosques de pináceas de Teruel a partir de una imagen satélite Landsat TM, información topográfica y variables derivadas del Mapa Forestal de Aragón.

- Combinación de estimaciones de biomasa aérea mediante LiDAR y estimaciones de edad de los estratos forestales mediante Landsat para la validación espacial extensiva de modelos de productividad forestal (Lefsky et al. 2005).

Estos autores desarrollaron una metodología para la estimación de la producción forestal primaria de biomasa aérea (sobre el suelo) basándose en la edad de la masa forestal y la biomasa con el fin de poder ser implementado sobre grandes extensiones y utilizado para la realización de validaciones a través de LiDAR e imágenes satélite.

### **1.2.2. Modelos de gestión de biomasa**

Los costes 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 (Madrigal et al. 2012, PROFORBIOMED 2012).

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, se empezaron a desarrollar planes integrales para el aprovechamiento de la biomasa, a nivel municipal y comarcal (IDAE 2007).

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).

A nivel nacional, cabe señalar que se encuentran diferentes estudios de interés a nivel de planes de aprovechamiento biomásico, 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 prevé 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.

- b) Plan estratégico de biomasa forestal de ADF Montseny Ponent, Comarca del Valles Oriental (Diputació de Barcelona 2009).

Sus objetivos son la elaboración de un plan para la explotación y puesta en valor de la Biomasa Residual Forestal en la comarca Montseny-Ponent y la extracción y comercialización de la biomasa de forma mancomunada por parte de los diferentes municipios.

- c) Aprovechamiento Integral de Biomasa Residual en Enguera (Marti 2011).

Los objetivos perseguidos son la 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.

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

El estudio trata de 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.

- e) Metodologías para la ubicación de plantas de biomasa mediante modelos de localización basados en programación lineal y evaluación multicriterio en el entorno de los Sistemas de Información Geográfica (Perpiñá 2012).

El estudio se centra en conocer la viabilidad económica, social y medioambiental, desarrollando y aplicando estrategias logísticas que permitan la identificación y cuantificación de la biomasa generada en un territorio, así como la localización óptima de una planta de biomasa y centros de transferencia, utilizando como herramienta fundamental los Sistemas de Información Geográfica (SIG), técnicas de evaluación multicriterio en entornos SIG y modelos de localización basados en programación lineal.

### ***1.2.3. Sistemas y tecnologías de aprovechamiento y logística de biomasa forestal***

Según Martínez-Fernández et al. (2013), la gestión de la biomasa forestal desde su recogida hasta que se convierte en energía, constituye un proceso muy costoso que requiere una correcta planificación de todas las partes implicadas y el empleo de nuevas tecnologías para conseguir su optimización. La baja densidad aparente que tiene la biomasa forestal hace que el transporte sea difícil y caro y que su empleo energético necesite grandes espacios de almacenamiento (IDAE 2008). La heterogeneidad de la biomasa así como la aplicación que se le va a dar, determina el tratamiento necesario para su aprovechamiento (AVEN 2011).

Para satisfacer de manera sostenible la creciente demanda de biomasa forestal, una tecnología adecuada de aprovechamiento (incluyendo reducción del tamaño, gestión de la biomasa y almacenado) y método de trabajo debe ser desarrollado y llevado a cabo con el objetivo de obtener biocombustibles de alta calidad (Röser et al. 2010).

#### **a) Aprovechamiento de residuos**

Los residuos forestales tienen un gran potencial de uso como biomasa (CE 2014). Especialmente en Europa debido a la alta utilización de los residuos procedentes de la industria forestal (primera y segunda transformación de la madera, pasta y papel), estos residuos empiezan a escasear y es aquí donde la biomasa procedente de residuos forestales empieza a jugar un papel importante. Es por ello que a nivel europeo se han desarrollado una serie de tecnologías que deben ser aún más optimizadas para reducir los costes de aprovechamiento de estos residuos forestales desde el monte a la planta de bioenergía (Kuiper y Oldenburger 2006).

De media, según Kuiper y Oldenburger (2006), de un 10 a un 15% del total de la biomasa aérea se deja atrás como residuos forestales durante los aprovechamientos forestales y actividades selvícolas (entorno a un 20-30% en primeras claras aunque sólo un 4-6% en cortas finales).

Sin embargo, en la zona mediterránea de Europa, el uso de los residuos de aprovechamiento forestal, ramas, copas y madera residual que no aprovechados con fines industriales o domésticos presenta dificultades de aprovechamiento debidas a los altos costos de extracción y su producción estacional, lo que genera problemas de suministro para el potencial consumidor final en las plantas de energía (Torres Rojo 2004, Sanz y Piñeiro 2004).

### a.1.) en Europa

Los países escandinavos son los que más aprovechan los residuos forestales con fines bionergéticos, especialmente Suecia y Finlandia, mientras que países como Reino Unido, Irlanda y Alemania están incrementando de manera notable la utilización de estos residuos (Kuiper y Oldenburger 2006).

En este sentido, en Suecia se vienen utilizando las astillas con usos energético procedentes de residuos de aprovechamientos forestales desde hace más de 30 años. La mayor parte de ellas provienen de cortas finales (más de un 71%). Esta utilización es creciente y se incrementa un 10% anualmente, situando a Suecia como el país líder en bioenergía procedente de residuos forestales a nivel mundial con un potencial teórico anual de 20 millones de m<sup>3</sup> aplicando restricciones medioambientales y técnicas (Richardson et al. 2002).

En cuanto a utilización de esta bioenergía, en este caso es Finlandia el país líder, aportando la bioenergía un 20% de la energía primaria consumida en este país. La posibilidad técnica anual de residuos forestales provenientes de cortas finales se sitúa sobre 5 millones de m<sup>3</sup>, de los cuales sobre 3 millones de m<sup>3</sup> son económicamente viables a nivel de aprovechamiento (Kuiper y Oldenburger 2006).

El potencial de aprovechamiento a nivel europeo se estima sobre 1028 GJ. Estos residuos se localizan principalmente en Alemania, Francia, Suecia y Finlandia, aunque sobre este potencial cabe aplicar restricciones ecológicas, técnicas y económicas (Richardson et al. 2002).

Meuleman et al. (2005) estimó la cantidad de residuos forestales potenciales en la EU-15, considerando un ratio de aprovechamiento del 15% de los residuos generados. Según los resultados presentados, existe un potencial de 18 millones de m<sup>3</sup> aprovechables en Europa, tal como se puede observar en la Tabla 6.

**Tabla 6. Cantidad de residuos forestales potencialmente disponibles para energía renovable asumiendo un 15% de ratio de recuperación. Datos para EU-15. Fuente: Meuleman et al. (2005).**

Estado miembro	Residuos forestales recuperados (m <sup>3</sup> )*
Austria	1.094.425
Bélgica	239.061
Dinamarca	137.695
Finlandia	2.318.877
Francia	4.930.198
Alemania	3.150.163
Grecia	739
Irlanda	206.577
Italia	1.318.613
Luxemburgo	32.332
Paises Bajos	91.196
Portugal	282.945
España	853.388
Suecia	2.942.641
Reino Unido	745.361
<b>Total</b>	<b>18.344.231</b>

\*m<sup>3</sup> de madera en rollo equivalentes

#### a.2.) en España

Pese a las estimaciones de 853.388 m<sup>3</sup> aprovechables en España (Meuleman et al. 2005), según Almagro et al. (2012) la superficie forestal sobre la que se realizan prácticas selvícolas (principalmente claras) representa una mínima parte de los montes españoles que necesitarían tales tareas. Además, en muy poca de esta superficie tratada se realiza algún tipo de gestión de los residuos generados (Tolosana 2003).

Según Ambrosio (2005) la ejecución de las primeras claras no suele realizarse debido a que no existe una oferta suficiente de este tipo de aprovechamientos a empresas especializadas ya que hasta el momento no se había planteado su rentabilidad. Algunas de las razones por las cuales estos tratamientos no se realizan son las siguientes:

1. Situación de las masas precaria desde el punto de vista selvícola.
2. Falta de formación silvícola de los propietarios forestales.

3. Distribución de la propiedad muy fragmentada, que impide la viabilidad de los aprovechamientos.
4. Falta de datos y de estadísticas sobre este tipo de cortas de mejora que impide establecer una planificación basándose en experiencias anteriores.
5. Déficit en lo que se ha denominado como transferencia tecnológica, que ha supuesto la no rentabilidad de estas actuaciones por no utilizar los medios adecuados.
6. Sistema fiscal que no ha considerado este tipo de tratamientos de mejora en las masas y su coste a la hora de la tributación por los bienes forestales.
7. Importantes daños a las masas forestales debido a los incendios, hecho que inhibe la posible inversión por parte del propietario en tratamientos de mejora.
8. Falta de personal cualificado.

Según Almagro et al. (2012) se puede afirmar que el tratamiento de los residuos forestales en España está creciendo pero es en general minoritario y se da sobre todo en terrenos llanos de fácil acceso. Antiguamente se aprovechaban estos residuos como leñas para calefacción o bien eran abandonados en el campo donde se les prendía fuego. Hoy en día, especialmente en la zona mediterránea y central española, debido al alto riesgo de incendios, esta práctica se ha abandonado y frecuentemente los restos o bien se trituran mediante desbrozadoras (de cadenas o de martillos) o bien se astillan (generalmente con astilladoras ligeras montadas sobre tractores) con el fin de esparcir los restos sobre el suelo (Tolosana 2003).

Aunque no existen estadísticas de la superficie forestal sobre la que se actúa anualmente en España, respecto a las prácticas selvícolas como a los tratamientos de residuos que las mismas generan, Almagro et al. (2012) presentan los tratamientos más comúnmente aplicados y el porcentaje estimado (sobreestimado según los mismos autores) de tratamientos por Comunidades Autónomas y que provienen de datos proporcionados en entrevistas con personal de las Administraciones e industrias forestales.

Para el caso de la Comunitat Valenciana, estos autores indican que en un 50% de los casos no se realiza ningún tratamiento y en el otro 50% que se realiza un astillado principalmente mediante astilladora montada sobre tractor (Almagro et al. 2012).

### **b) Tipos de aprovechamientos bioenergéticos**

De manera general, según Kuiper y Oldenburger (2006) el aprovechamiento de restos forestales se realiza en la práctica cuando se dan cortas a hecho, siendo menos indicada cuando se realizan claras o aclareos, debido a que el espacio requerido para realizar las operaciones de recogida

hace que los costes aumenten. Es por ello que principalmente se da en países donde estas cortas a hecho se llevan a cabo a gran escala, como es el caso del Centro y Norte de Europa.

No obstante, este aprovechamiento de residuos forestales está siendo cada vez más utilizado y no solamente en sistemas de cortas a hecho o finales. En este sentido, las claras con fines energéticos se aplican como operaciones que buscan a la vez una mejora de la calidad o de la resiliencia las masas forestales y la obtención de biomasa, en general en formaciones de alta densidad, procedentes de regeneración natural o artificial por siembra (Khärä et al. 2009). Esta aplicación se da principalmente en masas donde no se han aplicado clareos previos, en las que puede optarse por operaciones mixtas de obtención de madera industrial y energética o bien, en el caso de que el volumen industrial apeable sea muy bajo, a claras energéticas en sentido estricto (Heikkilä et al. 2007).

Como sistema de aprovechamiento (*Harvesting method*) se entiende la forma en que la madera es llevada a la vía de acceso al monte o cargadero y depende de los procesos realizados durante el apeo (desramado, tronzado, descortezado, astillado, etc.)(Pulkki 2014).

Tras el análisis exhaustivo de la bibliografía especializada, debido a la complejidad y confusión existente entre términos de aprovechamientos con fines bioenergéticos y definiciones de sistemas logísticos, se realiza una clasificación somera de los principales sistemas de aprovechamiento energético que permita aclarar las distintas posibilidades existentes según el estado de la masa, los tratamientos que más comúnmente se aplican atendiendo a ese estado y las opciones existentes según el objetivo final práctico o destino del aprovechamiento (ver Tabla 7).

Para la correcta interpretación de la Tabla 7, si los recursos aprovechados se destinan a industrias de transformación mecánica (aserrío, pero principalmente tableros) o química (pastas celulósicas) de la madera se clasifica como uso “material”, si se destinan tan sólo a fines bioenergéticos, uso “bioenergía” o bien si se destinan a ambas posibilidades “material + bioenergía”.

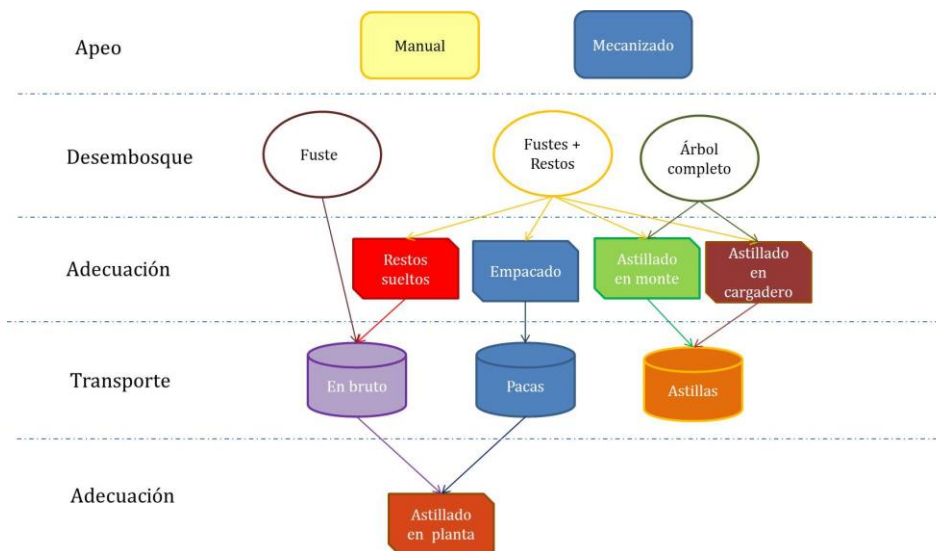
**Tabla 7. Clasificación de los principales sistemas de aprovechamiento energético. Fuente: elaboración propia.**

Estado de la masa	Tipo de corta	Sistemas de aprovechamiento según destino final		
		Material	Bioenergía	Material + bioenergía
Fustal	Cortas finales	Restos <i>in situ</i> (astillados/triturados)	-	Sistema integrado (fustes + restos)
Latizal/Fustal no tratado	Claros / Clareos/ Entresacas	Restos <i>in situ</i> (astillados/triturados)	Árbol completo	Sistema integrado (fuste + restos)
Monte bravo/Latizal bajo	Primeras claras ( <i>pre-commercial thinnings</i> )	Árbol completo	Árbol completo	Árbol completo

De esta manera, se obtienen tres grandes líneas generales de aprovechamiento de los residuos forestales:

1. No utilización de residuos: Restos astillados o triturados *in situ*
2. Aprovechamiento integrado. Este sistema se basa en la recolección de biomasa “residual” –ramas y copas– después del aprovechamiento de madera (Tolosana et al. 2013b).
3. Aprovechamiento mediante árbol completo

No obstante dentro de estas líneas generales de aprovechamiento se da cabida a numerosos sistemas logísticos como combinación de las distintas fases necesarias para llevar a cabo los aprovechamientos forestales (apeo, reunión, saca, adecuación y transporte). En la Figura 13 se representan gráficamente todos los sistemas logísticos más comúnmente utilizados con el fin de aprovechar la biomasa forestal.



**Figura 13. Clasificación de las opciones que conforman cada sistema logístico. Fuente: elaboración propia.**

La Figura 13 refleja las distintas opciones dentro de las operaciones de aprovechamiento de la biomasa forestal. En el caso del apeo, este puede ser bien manual, entendido aquel que se realiza por un operario mediante motosierra u otras herramientas manuales, o bien mecanizado cuando se da mediante máquinas que apean por ellas mismas los árboles (procesadoras o *harvesters*, taladoras-apiladoras o *feller-bunchers*, etc.).

Cabe señalar que en torno a un 55% del total de los aprovechamientos forestales a nivel mundial se realiza manualmente mediante motosierras, mientras que el restante 45% se realiza de modo mecanizado. Del aprovechamiento mecanizado se estima que en torno a un 65% se trata de

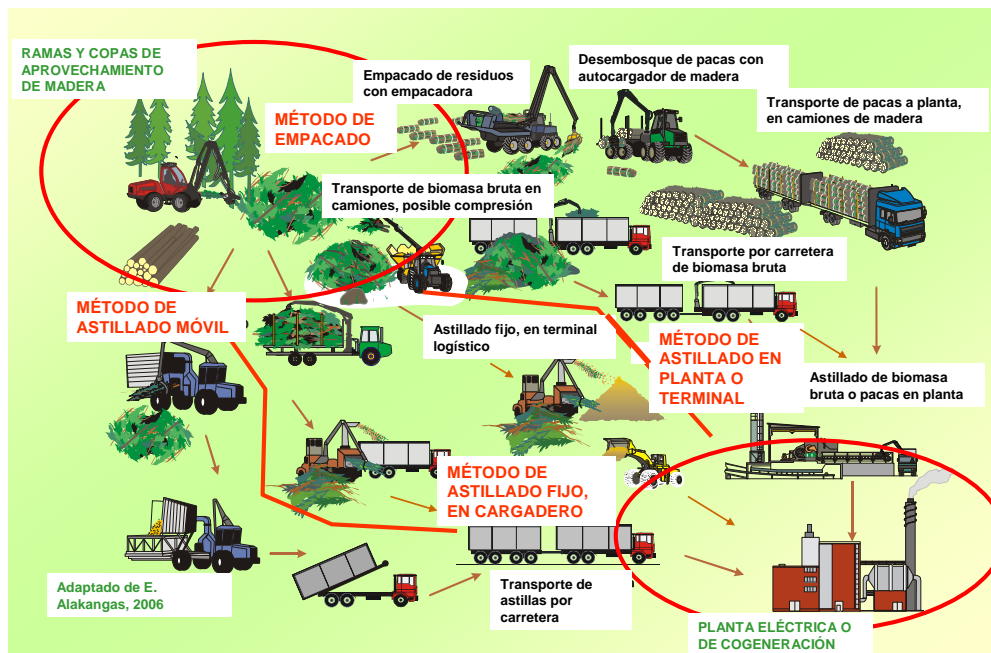


aprovechamiento de árbol completo mientras que en el restante 35% se aprovecha madera larga, generalmente para sierra (PONSEE 2005).

En el desembosque por lo general, según el destino y objetivo del aprovechamiento se extraerán fustes (dejando los restos en monte con o sin tratamiento) en el caso de aprovechamiento maderero estricto (“uso material”), fustes más restos (astillados o no), en el caso de querer aprovechar la madera por una parte y los residuos forestales con fines bioenergéticos (uso “material + bioenergía”), o bien árboles completos por lo general cuando se pretenden destinar a uso energético (“bioenergía”).

A partir de aquí, cuatro son las principales cadenas de abastecimiento (“*supply chains*”) según Kuiper y Oldenburger (2006). El uso de una u otra depende de las condiciones de los ecosistemas, infraestructuras, tradiciones forestales y el grado de integración deseado entre el aprovechamiento forestal regular y el aprovechamiento de los residuos derivados del mismo. Tal como se muestra gráficamente en la Figura 14, estas cadenas de abastecimiento son:

1. Método de astillado en monte: los residuos se astillan en el mismo rodal en que se realizan los aprovechamientos y estos se extraen a pista para ser transportados a planta
2. Astillado en pista o cargadero: los residuos se apilan en cargadero o en pista donde para ser allí astillados y de ahí transportados a planta en forma de astilla. Esta opción incluye la posibilidad de que en lugar de utilizarse una astilladora se utilice una trituradora y se refinen los restos en planta.
3. Método de empacado: se empacan o se hacen fajos de los residuos en el rodal y estos fajos se extraen a pista o cargadero desde donde se transportan a planta para su astillado
4. Método de restos sueltos: se extraen los restos forestales a pista o cargadero donde se apilan a lo largo de la carretera y se recogen para ser transportados a planta donde serán astillados.



**Figura 14. Ejemplo de cadena de suministro y maquinaria para la producción de astilla en los sistemas de aprovechamiento biomásico integrado con el aprovechamiento maderero. Fuente: adaptado de Alakangas (2006).**

Según Dopazo et al. (2009), en España las experiencias de seguimiento de aprovechamientos reales de biomasa con fines energéticos han estudiado básicamente tres opciones: astillado en pista o cargadero, astillado en monte y empacado en monte con posterior astillado en planta.

La tendencia a emplear equipos de astillado, preferentemente en cargadero, es creciente, con la excepción de los montes que cuentan con una fisiografía más favorable y donde los residuos están más concentrados (por ejemplo en choperas o plantaciones de eucalipto con poca pendiente), en las que es normal que las máquinas entren en el monte (Tolosana y Laina 2008). Este astillado a borde de pista (o cargadero) requiere una concentración previa de los residuos mediante un autocargador para abaratar el coste del desembosque, a la vez que permite un primer secado de la biomasa. La maquinaria necesaria es una astilladora semimóvil, que posee un motor propio de elevada potencia, y deposita la astilla producida en un camión o en un contenedor independiente que posteriormente se transporta a planta mediante camiones (Velázquez 2006). Según el IDAE (2007) es el sistema más económico en montes de gran superficie.

### **c) Consideraciones a tener en cuenta con respecto de un sistema de aprovechamiento de biomasa residual utilizado**

#### c.1.) Aprovechamiento integrado

En el caso de que los restos se recojan de manera integrada con el aprovechamiento de madera se ha de prestar tanta atención a la organización de estos trabajos de recogida como al mismo aprovechamiento maderero (Kuiper y Oldenburger 2006).

En general, según Spinelli (2007) y Tolosana (2009), la rentabilidad de esa recogida depende de:

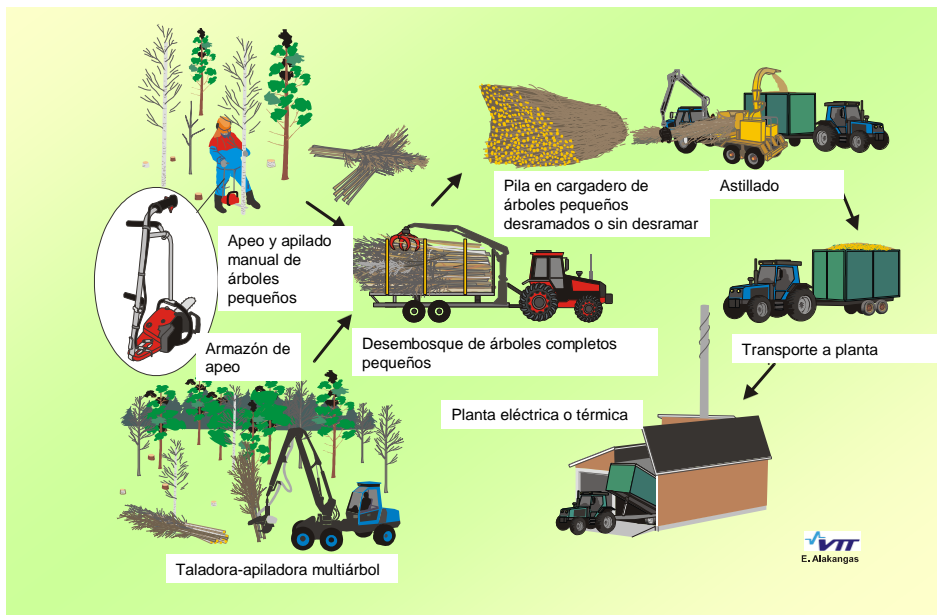
- 1) la integración entre el aprovechamiento de madera y “residuos” – las ramas y copas deben acumularse lo más limpios posible de tierra y piedras, lo que se facilita mucho si la corta y procesado son mecanizados,
- 2) la carga de biomasa a recoger por hectárea – cuanto mayor, mayor rentabilidad, y
- 3) el tamaño de las ramas y copas – cuanto mayor tamaño, mayor rentabilidad.

En las primeras claras, incluso muy retrasadas, los últimos factores perjudican la rentabilidad de la recogida de ramas y copas. No obstante, aprovechar por separado madera y biomasa puede tener interés para evitar la competencia entre la madera delgada sólida y el uso energético, importante problema de mercado en algunas zonas de España para la industria de tableros de desintegración (Tolosana 2013b).

#### c.2.) Aprovechamiento mediante árbol completo

Este método es especialmente indicado para rodales jóvenes con árboles pequeños que no alcanzan los diámetros comerciales y se conoce como cortas pre-comerciales (“*pre-commercial thinnings*”). La Figura 15 muestra gráficamente este sistema de aprovechamiento.

Según Tolosana et al. (2013b) el sistema mecanizado de árboles completos es frecuente para aprovechar la biomasa de árboles pequeños de claras o clareos, usando taladoras-apiladoras con cabezales acumuladores seguidas de autocargadores forestales, tanto en los Países Nórdicos (Alla-Fossi 2005, Kallio y Leinonen 2005, Kärhä 2007) como en Norteamérica (Adebayo et al. 2007). En los países mediterráneos europeos hay algunas experiencias en claras de plantaciones de coníferas y otras masas (Laina et al. 2008, Spinelli y Nati 2009, Canga et al. 2009a, Canga et al. 2009b; Tolosana 2009). Como conclusión general de estos trabajos, el sistema puede ser competitivo, pero su rentabilidad está muy condicionada por el tamaño de los pies, de modo que el uso energético compite con el uso de madera delgada para otros destinos.



**Figura 15. Ejemplo de cadena de suministro y maquinaria para la producción de astilla en los sistemas de aprovechamiento de árbol completo. Fuente: adaptado de Alakangas (2006).**

#### **d) Impactos ecológicos del aprovechamiento de los residuos forestales**

A partir de 1990 se empieza a estudiar los impactos que ocasiona el aprovechamiento de los residuos sobre el ciclo de nutrientes y sus efectos adversos sobre el crecimiento de los árboles (Yoshioka 2011).

En comparación con el tronco, las ramas y las acículas son especialmente ricas en nutrientes. Consecuentemente su retirada del monte de forma generalizada haría disminuir los nutrientes en el ecosistema forestal. Lundborg (1997) en un estudio llevado a cabo en Suecia sobre el aprovechamiento de árboles completos y residuos concluye que este aprovechamiento no tiene prácticamente efectos sobre la materia orgánica en el suelo pero sí sobre los nutrientes minerales. Sin embargo el retorno de las cenizas tras la combustión de los restos puede prevenir la acidificación del suelo y el descenso en la concentración de nutrientes, recuperando así su fertilidad (Lundborg 1998).

Kuiper y Oldenburger (2006) indican que no existe ninguna tecnología capaz de retirar todos los residuos de la copa de los rodales aprovechados. En este sentido, Alakangas (1999) confirma que en Finlandia la cantidad de residuos retirada con cualquiera que sea el sistema de aprovechamiento, extrae un máximo de un 70% de la masa de las copas de los árboles.

Sin embargo, son necesarias ciertas restricciones y gestión de los rodales para minimizar los impactos negativos que la retirada mecanizada de parte de la biomasa puede causar sobre el ciclo de nutrientes y la biodiversidad. Los impactos ecológicos negativos pueden reducirse a

través de un planeamiento cuidadoso y la adopción de las tecnologías más apropiadas. Ejemplos de métodos disponibles son los siguientes (Kuiper y Oldenburger 2006):

- Operaciones de aprovechamiento en los tiempos más adecuados (*proper timing*)
- Reducción de la eliminación de nutrientes a través de la deja de restos en campo para su secado por transpiración
- Desarrollo de técnicas de defoliado
- Restricción de las rutas de la maquinaria sobre el monte (Puttock 1995)
- Reciclado de las cenizas procedentes de las plantas de combustión (Puttock 1995).

Aunque estos métodos no compensan totalmente la pérdida de nutrientes, al menos la reducen. En cualquier caso, la retirada de residuos forestales debería evitarse en suelos pobres (Sikkema 1998, van Belle y Temmerman 2001, Burgers 2002, Hakkila 2002).

#### **e) Estudios sobre aprovechamiento, transporte y astillado**

El inicio de las investigaciones sobre astillado de árbol completo empieza de la mano de la industria de la celulosa y del papel, coincidiendo con la crisis de petróleo de los años setenta. Así, en 1975 y 1976, cuatro informes sobre el astillado de árbol completo (Malac 1976, Morey 1975, Palenius 1976 y Tufts 1976) fueron publicados por la revista de la Asociación Técnica de la Pasta y el Papel (TAPPI). Estos informes indican que en Estados Unidos y en los países nórdicos el aprovechamiento de árboles completos se realiza de manera mecánica por desarrollo de nuevas tecnologías y falta de mano de obra respectivamente en estos países, combinando taladoras-apiladoras y skidders con grapa.

Es a partir de las crisis del petróleo cuando se estimulan los estudios para aprovechamiento bioenergético (Yoshioka 2011). El aprovechamiento de árbol completo era rentable cuando se astillaban árboles de pequeño diámetro como los procedentes de claras, pero la mecanización de todo el sistema sólo era adecuada en bosques de grandes superficies y pendientes bajas mientras que resultaba de dudosa rentabilidad en medianas y pequeñas superficies y pendientes más pronunciadas (Folkema 1977). Además el aprovechamiento de árboles completos reducía los costes de reforestación sustancialmente (Malac 1976).

Por otra parte, estudios sobre recolección y astillado de residuos forestales dejados sobre cortas a hecho indican que no eran rentables económicamente durante la década de 1980 (Stuart et al. 1981). El proyecto “Forestry Energy Project” en Suecia (Andersson y Falk 1984) estudió diversas maneras de aprovechar estos residuos en montes a gran escala. De entre todas ellas, el método llamado “de árboles seccionados” que implicaba el apeo de árboles con taladoras-apiladoras, el tronzado mediante sierras sobre los autocargadores y la saca de trozas de fuste y trozas con restos de copas y ramas con autocargador, era la opción más productiva de entre todos los sistemas que producían fustes con procesadoras. Sin embargo, el mismo grupo de trabajo indicó

que en sistemas a pequeña escala la utilización de los restos por separado a partir de apeo motormanual con saca de árboles completos y astillado en pista o cargadero, o bien astillado con astilladora montada sobre un tractor en monte tras la saca de los fustes podía mejorar la eficiencia del sistema.

A partir de 1990, la investigación sobre biomasa forestal fue llevada a cabo de manera intensiva en el marco de IEA Bioenergy (ver apartado 1.1.7). Su primer proyecto se inició en 1978 y fue llamado “IEA Forest Energy”, en 1986 el proyecto fue renombrado a “IEA Bioenergy” para incluir biomasas no forestales y es a partir de este momento en que la palabra “bioenergía” se ha utilizado ampliamente para designar la utilización de la energía de la biomasa (Yoshioka 2011).

Goulding y Twaddle (1990) revisaron experiencias de aprovechamiento de árboles completos que se habían realizado en los países participantes en el primer proyecto IEA Bioenergy (1986-1988) “*Development of Improved Methods for Harvesting, Processing and Transport of Forest Biomass* (IEA Bioenergy Task III)” y presentaron el diseño del aprovechamiento integrado “Integrated Harvesting” que implicaba el aprovechamiento de productos convencionales forestales como madera y material para la industria del tablero junto con los restos de aprovechamientos forestales tales como copas y ramas y su utilización como energía. Es a partir de este momento que la palabra “aprovechamiento integrado” se convierte en una palabra clave en los proyectos de IEA Bioenergy a principios de los 90 (Yoshioka 2011).

En la Task IEA Bioenergy IX se trataron temas de aprovechamiento de cultivos de rotación corta (short rotation forestry, SRF) y se incorporaron diferentes tecnologías desarrolladas en Norte América (“método flail”) y en Finlandia (“método Massahake”) que separaban astillas para la industria de la pasta y el papel y astillas para bioenergía a partir de árboles completos y que hacían que las claras fueran económicamente más viables (Hudson 1995). Por otra parte, el sistema de “árboles seccionados” cae en desuso debido a la expansión de cosechadoras de un cabezal.

A partir de mitad de la década de los 90 es cuando el aprovechamiento de los residuos forestales empieza a ser económicamente viable gracias al desarrollo de astilladoras acopladas a autocargadores (ver Figura 16), cabezales de apeo múltiple en taladoras multiárbol (“*multi-tree felling heads*”) en los países nórdicos como solución para mecanizar aclareos pre-comerciales y mejorar su eficiencia económica. También proliferan desde entonces el uso de empacadoras (Yoshioka 2011). Según el mismo autor, esto hace que se impulsen estudios comparativos sobre métodos de aprovechamiento de biomasa forestal, tales como métodos de aprovechamiento de astillas, residuos sueltos o pacas.



**Figura 16. Astilladora Erjo 765 acoplada a autocargador Timberjack 1210. Fuente: <http://www.pracbrown.co.uk>**

Nurmi (1999) señala que los residuos forestales en Finlandia son normalmente transportados después de haber sido convertidos en astilla utilizando astilladoras móviles autopropulsadas o acopladas a autocargadores en el monte o en cargadero. La distancia de transporte es un factor clave y supone un punto crítico cuando la planta de cogeneración se sitúa a más de 40-50km. Heding (1999) señala que en Dinamarca las astillas provienen principalmente de claras que implicaban cortas durante el invierno, abandono de los árboles en el monte para su secado y para dejar que caigan las hojas sobre el suelo y astillado de árboles enteros en verano mediante astilladoras acopladas a autocargadores.

Los costes de aprovechamiento de los residuos forestales sin astillar, astillados y en pacas fueron estudiados por Andersson (1999), Andersson et al. (2000), Eriksson (2000), Hudson y Hudson (1999) y Hunter et al. (1999). En muchos de estos estudios se concluyó que el método más barato fue el transporte de residuos no astillados, en bruto, a planta de conversión energética con grandes trailers y astillado industrial en grandes astilladoras. Sin embargo, Hudson y Hudson (2000) indican que el empaquetado resultaba relativamente menos caro conforme se aumentaba la distancia de transporte, aunque el uso de empacadoras aún estuviera en fase experimental. La Figura 17 muestra un ejemplo de empacadora sobre autocargador.



**Figura 17. Empacadora de residuos forestales ENFO 2000 sobre autocargador PONSEE. Fuente: <http://www.monraforestal.com/>**

Por su parte Asikainen y Kuitto (2000) compararon en Finlandia los costes de aprovechamiento entre la recogida de residuos en cargadero junto a pista forestal y astillado y el astillado en monte con astilladoras móviles acopladas a autocargadores o tractores. Andersson (1999) y Eriksson (2000) estudiaron el uso de taladoras multiárbol sobre primeras claras que solían hacerse con motosierra de modo manual y concluyeron que el uso de estos cabezales aumentaría la productividad, reduciría costes y haría posible la utilización de estas primeras claras no comerciales para bioenergía.

Otros estudios de Desrochers et al. (2000) y Asikainen y Pulkkinen (1998) demostraron que el uso de astilladoras móviles tenía una menor productividad y mayor coste que la producción de astillas directamente en cargadero. Por su parte, en Nueva Zelanda, Hall et al. (2001) compararon los costes de aprovechamiento de residuos forestales en monte y en cargadero para cada posible localización del astillado, concluyendo que lo más económico era transportar los residuos a planta debido a que la escala del astillado tiene un gran efecto sobre los costes.

En España, Delgado y Giraldo (1995) investigaron la utilización de pies pequeños de primeras claras como material para calderas desramando y tronzando en el monte, agrupando mediante tractor, produciendo astillas en cargadero y transportándolas luego a planta. Estos autores calcularon unos costes de aprovechamiento y astillado de 1,45 y 2,45 ptas por kg (0,011 y 0,019\$ estadounidenses) para una distancia máxima de 30km de transporte respectivamente (con un contenido de humedad del 15% en base húmeda).

En cuanto a experiencias más recientes a nivel nacional sobre aprovechamiento de biomasa forestal, cabe destacar:

- Experiencias de CIS-Madeira en Galicia (IDAE 2008). El proyecto realizado por CIS-Madera en colaboración con las Universidades de Vigo y Santiago tuvo como fin analizar la valoración de la biomasa procedente de residuos forestales. El trabajo contempló la modelización de la producción de biomasa forestal, las tecnologías avanzadas de recogida, la caracterización de los residuos y el estudio de las implicaciones ambientales del aprovechamiento de los restos de corta de pino y eucalipto.
- Experiencia de CESEFOR (Tolosana et al. 2007), sobre diferentes situaciones en Castilla y León, entre los meses de octubre de 2006 y mayo de 2007, en aprovechamientos de *Quercus pyrenaica*, *Pinus sylvestris*, *Pinus pinaster* y *Populus spp.* Hay referencias a otras experiencias forestales realizadas en otros lugares. Los costes incluyen gastos generales empresariales y beneficio industrial, pero en ningún caso la retribución a la propiedad por los restos del aprovechamiento.
- Sistemas de Aprovechamiento de Biomasa en Castilla y León (Tolosana et al. 2008b)

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.



- Experiencia de FERÁLAVA (IDAE 2008). FERÁLAVA es una sociedad que fue creada con el objetivo de construir y explotar una planta de generación de energía eléctrica de 22 MW alimentada con 235.000 t/año de biomasa forestal y con una generación de energía eléctrica anual de 167.200 MWh/año. Como paso previo del proyecto se desarrolló un plan de pruebas utilizando la empacadora forestal Fiberpack 1490, realizándose diferentes experiencias con eucalipto, pino y chopo en diferentes escenarios. El objetivo final del proyecto no se llegó a cumplir debido a que en aquel momento las condiciones económicas no eran favorables para el desarrollo de un proyecto de estas características. Estimaciones de costes de aprovechamiento de biomasa forestal (de eucalipto, pino y chopo) en la cornisa cantábrica, de FERÁLAVA. Las experiencias muestran que la disposición del residuo (amontonado) y la limpieza de restos de tierra y piedras, aumentan el rendimiento de la empacadora evitando las frecuentes paradas por avería de la máquina, fundamentalmente por la rotura de cadenas de corte de los fardos y, en menor medida, por las roturas de las botellas de los hidráulicos.

De todas estas experiencias reales se puede concluir la gran dispersión de resultados obtenidos, incluso en situaciones en teoría parecidas, dependiendo fundamentalmente de la organización de los trabajos, de la densidad (t/ha) de restos por hectárea inicial, de la disposición de los restos sobre el terreno (dispersos, amontonados o alineados o apilados junto a vías de desembosque) y de las incidencias que la maquinaria haya podido sufrir por averías, desplazamientos, etc. La Tabla 8, basada en las experiencias recogidas por IDAE (2008), resume los costes del aprovechamiento (sin incluir costes de transporte).

**Tabla 8. Resumen de costes de aprovechamiento de experiencias reales. Fuente IDAE (2008).**

Especie	Tratamiento/ Proceso	Fuente	Costes (€/t)	
			Mínimo	Máximo
Pinos/ coníferas	Cortas a hecho	CIS – Madera	27,01	27,41
	Empacado de restos	ANFTA	15,00	42,30
		FERÁLAVA	26,11	31,51
		Cortas a hecho	CIS – Madera	25,91
	Astillado de restos	CESEFOR – ETSIM – JcYL	11,53	26,65
		Claros Empacado de restos	BIO – SOUTH	19,21
	Claros Astillado de restos	CESEFOR – ETSIM – JcYL	22,64	
	Cortas a hecho Astillado de restos	CIS – Madera	21,52	30,66
		CIS – Madera	25,14	29,54

A pesar de que propietarios públicos y privados forestales, así como empresas de aprovechamientos están altamente interesados en optimizar los costes de las operaciones, en la realidad actual en España existen muy pocas experiencias que persigan la modernización y optimización del tratamiento de residuos. En este sentido, Almagro et al. (2012) indican las siguientes tecnologías:

a. Empacadora de residuos sobre autocargador “Timberjack”

Se trata de un equipo autopropulsado basado en un autocargador al que se le acopla un equipo de prensado “Bala” (ver Figura 18). Sobre la plataforma del autocargador se coloca un equipo hidráulico de prensado y compactado de la madera. Equipo que gira 360° sobre la plataforma de manera que se puedan recoger los residuos de madera por el lado sea del suelo con la grúa hidráulica.

Se calcularon los costes y rendimientos para la eliminación de residuos tras una corta a hecho sobre una masa de *Pinus radiata* localizada en el País Vasco. La operación realizada fue la compactación y formación de balas de residuos sin tratamiento previo (no incluye transporte al parque de madera). El resultado fue un rendimiento de 8.550 kg/hora productiva (al 40 % de humedad), lo que supone 15 balas/hora productiva. El coste de este sistema es de 98 euros/hora productiva que, con el volumen de residuos medido en la experiencia, resulta de 313,63 €/ha.



**Figura 18. Empacadora de residuos forestales Timberjack. Fuente:**  
<http://michigansaf.org/>

b. Cosechadora de matorral

Se trata de un tractor de tracción total “FEND” equipado con una desbrozadora de martillos (marca SERRAT) y una tolva para la recogida de la jara (*Cistus ladanifer*) ya triturada. El equipo de trituración genera una corriente de aire capaz de transportar el material triturado hasta la tolva de almacenamiento.

Este prototipo se encuentra en fase de experimentación, y no se dispone de datos de experiencias controladas. Sin embargo, para la operación de cosechado de jara verde el consumo medio es de 25-35 litros gasóleo/h, con un rendimiento de 5.000-10.000 kg/h. Estimando la cantidad de biomasa de un jaral en 10.000-20.000 kg/ha, resulta un rendimiento horario de 0,5 ha/h aproximadamente (Beltrán 2012).

c. Astilladora “Forus” sobre autocargador

Se trata de una astilladora de madera “Forus Holzbrecher GmbH” compuesta por una tolva y el mecanismo triturador (ver Figura 19), transportada sobre un autocargador forestal “Norcar 490”. La astilladora funciona independientemente puesto que tiene su propio motor.

En una experiencia realizada en Valladolid sobre una clara y poda de una masa mixta de *Pinus pinea* (75 %) y *Pinus pinaster* (25 %) sobre un total de 210 pies/ha. Los restos con diámetro inferior a 10 cm se amontonaron manualmente (residuo a triturar), quedando uniformemente repartidos a unos 20-30 m unos de otros. La cantidad de residuo generado fue de 18 t/ha. El rendimiento medido fue de 8,2 t/h (0,46 ha/h), con un coste actualizado al año 2000 de 14,74 €/t (262,92 €/ha).



Figura 19. Astilladora Forus. Fuente: <http://www.technika2011.pl/>

d. Trituradora de residuos “Meri”

Utilizado en el norte de Extremadura por Almagro (2000). Se trata de una trituradora de residuos que simultáneamente al triturado laboreo ligeramente el suelo, enterrando parcialmente los residuos. El equipo lo forma una trituradora marca “Meri Crushers” (ver Figura 20) arrastrada por un tractor de orugas “Newholland” de 92 CV.

En la experiencia se trituraron los restos originados por la primera clara de una repoblación de *Pinus pinaster* consistente en ramas y copas completas. La máquina circula por el interior de la masa y por delante va un operario cogiendo los restos de zonas por donde no cabe la máquina y depositándolos en zona transitable. En estas condiciones, la máquina tritura unas dos hectáreas cada jornada de trabajo (de 10 h), lo que supone un rendimiento de 0,2 ha/h, estimando una densidad de residuos de 5000 m<sup>3</sup>/ha. El consumo medio de gasóleo es de 7 litros/h. Y el coste de trabajo es (incluido el operario que coloca los residuos manualmente) de 300,51 €/ha.



Figura 20. Trituradora Meri Crushers. Fuente: <http://www.wimvanbreda.nl/>

e. Astilladora sobre tractor forestal en clareo sistemático

Combinación de cosechadora cizalladora y astilladora “Tp960Th” montada sobre un tractor agrícola “Valmet 8750”.

El equipo de astillado va conectado a la toma de fuerza del tractor y se sitúa en la parte posterior. Una pluma alimenta a la astilladora y las astillas se esparcen por el suelo. Previamente a la astilladora, una cosechadora apea por cizalladura los pies. Ambas máquinas trabajan consecutivamente sobre terrazas de repoblación, realizando dos pasadas en cada terraza. En primer lugar se abre pista eliminando una línea completa de árboles y se astillan los pies apeados, posteriormente se realiza un clareo selectivo y se astillan los árboles procedentes de esta operación.

En este estudio (González Moreno 2000), este sistema presentó un rendimiento de 0,071 ha/hora (4,46 t/h). El coste estimado es de 2.494,20 €/ha (40 €/t) sin incluir el bulldozer Caterpillar D4 frecuentemente empleado para allanar las terrazas y permitir la circulación de la maquinaria.

## **f) Estudios de tiempos de trabajo**

El origen de los estudios de trabajo se dio hace más de 100 años con Taylor (1895). Desde entonces, los estudios de trabajo han formado una parte integral de la investigación forestal (Sundberg 1988, Samset 1990). Los estudios de trabajo se utilizan con muchos fines prácticos, tales como el establecimiento de rendimientos y ratios de productividad, la programación de las fases de los aprovechamientos y la comparación de métodos de trabajo o de tecnologías (Björheden 1991). La parte central de muchos estudios de trabajo es un estudio de tiempos (Spinelli et al. 2013).

El estudio de tiempos consiste en la medida, clasificación sistemática y análisis crítico del tiempo empleado en el trabajo para determinar la eficiencia, productividad y coste de realización de ese trabajo (Ambrosio y Tolosana 2007). Constituyen el método de medida de trabajo más extendido (Vöry 1954, Haarlaa et al. 1984, Björheden 1991). Al ser el objetivo de los estudios de trabajo por lo general la medida del tiempo y de la cantidad de trabajo realizado, los estudios de tiempo representan una herramienta para llevar a cabo los estudios de trabajo (Pukkila 1959, Prodan et al. 1997).

En los trabajos forestales, los estudios de tiempo se han utilizado para determinar ratios y racionalizar la producción (Makkonen 1954, Björheden 1991, Harstela 1993). Su importancia radica en la necesidad de mejora y optimización de los aprovechamientos forestales a través de la investigación de todos los factores que afectan la eficiencia y economía del trabajo desarrollado (ILO 1979).

La recopilación internacional más reciente para estandarizar el estudio de tiempos en el sector forestal se debe Magagnotti y Spinelli (2012) a través de la Action Cost FP0902 (Tolosana et al. 2013a) cuyo objetivo es armonizar y clasificar los protocolos de medición, las unidades y la clasificación de tiempos productivos. Esta publicación da continuación de iniciativas anteriores como la de Bjöherden (1991) y Thompson (2000) para IUFRO.

En España, el estudio de tiempos se inició en el sector industrial en 1956-1958 cuando se editaron una serie de normas por parte del Instituto Nacional para la Racionalización del Trabajo, del Departamento de Organización Científica del Trabajo que actualmente están en desuso (UNE 520001:1956. Estudio de tiempos y movimientos. Símbolos para el diagrama de proceso, UNE 520002:1956. Estudio de tiempos y movimientos, UNE 520003:1958. Determinación de tiempos de trabajo. Tiempo normal y tiempo tipo, UNE 520004:1958. Estudios de tiempo y movimientos. Diagrama del proceso.)

En el ámbito de los trabajos forestales el estudio de tiempos en España no ha sido muy frecuente debido al alto coste de los mismos y a la necesidad de personal especializado. Debido a que los trabajos forestales están sujetos a muchas variables, la metodología para llevar a cabo estudios de tiempo requiere planificación específica, cierta instrumentación y dedicación de personal cualificado para su desarrollo (Tolosana et al. 2013a). Según los mismos autores los tipos de muestreo de tiempo varían según las necesidades de precisión y el objetivo del estudio.

Los primeros autores a destacar a nivel nacional en esta materia fueron Gómez (1992), De la Mata (1997) y Prades y Rubio (1997). Tan sólo algunas empresas como TRAGSA, universidades como la Escuela de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid (Tolosana 1999, Tolosana et al. 2001, Ambrosio 2003, Tolosana et al. 2005, Ambrosio 2005, López et al. 2006, Tolosana 2009) o la de Universidad de Vigo en colaboración con CIS Madeira (Sanz et al. 2003) y más recientemente centros de investigación como CETEMAS en Asturias (Cangas et al. 2009a y b) han realizado estudios de tiempo en el ámbito de los aprovechamientos forestales. Actualmente, con la introducción de nueva maquinaria para la recolección de biomasa y la necesidad de investigación que este nuevo ámbito conlleva se están realizando nuevos estudios de tiempo (Ambrosio y Tolosana 2007).

Durante los últimos 20 años, las técnicas de conteo de tiempos en operaciones forestales han ido desarrollándose desde relojes decimales a grabadoras automáticas de datos en las mismas máquinas forestales (Peltola 2003, Kariniemi 2003). Cuando los cronómetros y registros en formato de papel dieron fueron remplazados por ordenadores en campo en los estudios de tiempo forestales durante la década de los 80, se incrementó la posibilidad de medir con mayor detalle y precisión los elementos de trabajo (Nuutinen et al. 2008). A pesar de el gran progreso que se ha dado en los estudios de tiempo automatizados (McDonald y Fulton 2005), muchos trabajos se realizan aún hoy en día de manera manual por investigadores en campo, con todas las ventajas y limitaciones que ello conlleva (Peltola 2003).

#### **1.2.4. Desarrollo de biocombustibles sólidos de base forestal**

A lo largo de la historia, la forma más generalizada de utilización de la biomasa con fines energéticos ha sido la combustión directa de la leña para producir calor, ya sea con fines domésticos o industriales (FAO 2014). En la actualidad, a parte de las leñas, el carbón y de otros biocombustibles sólidos generados en diversas industrias agroalimentarias como el orujillo, el hueso de la aceituna y las cáscaras de los frutos secos, se están fabricando biocombustibles especialmente para su uso en sistemas automatizados de combustión. Es el caso de las astillas, los pellets y las briquetas (Fernández 2009). El presente trabajo de investigación se va a centrar en las dos tipos más frecuentes de biocombustibles sólidos de origen forestal: astillas y pellets.

Los biocombustibles sólidos pueden proceder de biomasa herbácea o leñosa. Se basan en su naturaleza lignocelulósica al estar formados por celulosa (35-65%), hemicelulosas (10-30%) y lignina (10-30%) en distintos porcentajes. La biomasa leñosa, por su fuerte lignificación y bajo contenido en minerales produce pocas cenizas durante la combustión (Fernández 2009). Pero cabe señalar que tronco, ramas, corteza y hojas difieren en su composición química (diferentes contenidos en lignina, celulos, hemicelulosas y extractivos) y en la estructura de sus fibras (Lehtikangas 2001).

Entre los biocombustibles sólidos de origen forestal, éstos pueden provenir de residuos forestales, de aserraderos de madera industrial o en rollo y de la industria del tablero, puertas y muebles en forma de serrín y virutas que se aprovechan para hacer pellets (EN 14961). También los residuos de la industria corchera pueden ser utilizados (Fernández 2009).

En las industrias forestales de los países desarrollados el aprovechamiento de los residuos se ha convertido en objetivo de valorización energética. Así pues, los residuos industriales de las industrias de la primera y segunda transformación forestal (aserraderos, papeleras, fabricantes de muebles, etc.) ya están en su mayoría utilizando sus residuos para cogenerar calor y electricidad (e.g. lejías negras, residuos de corteza y otros). Incluso restos de madera, virutas y serrín 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 2007b).

La calidad de los biocombustibles se evalúa de modo general por las propiedades que afectan el balance energético y los costes. La humedad, el poder calorífico bruto y el contenido en cenizas de los residuos forestales son las tres propiedades utilizadas más comúnmente para evaluar la calidad de los biocombustibles, ya que cada una de ellas determina la viabilidad de la utilización de la biomasa con fines energéticos (Gautam et al. 2012, Brand et al. 2011) así como la utilización de la planta, eficiencia y economía de combustión (Röser et al. 2001).

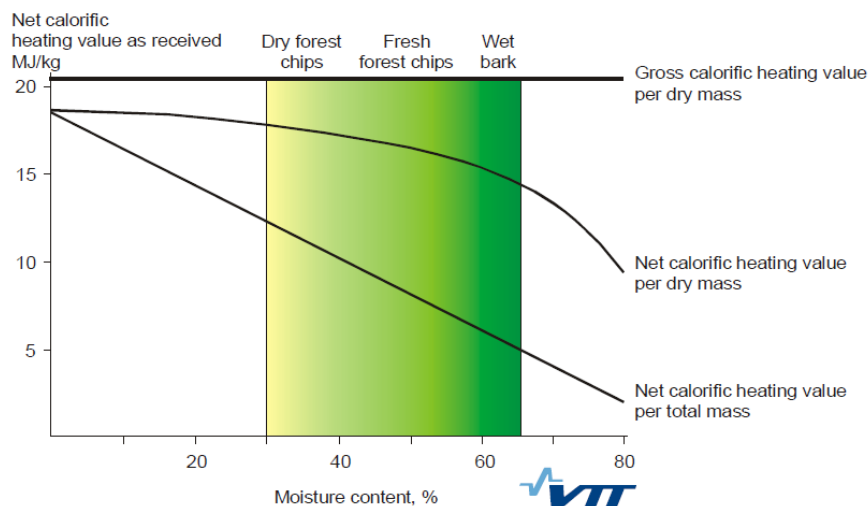
Una caracterización completa de la calidad de los biocombustibles pasa por la evaluación de sus características físicas (densidad aparente, densidad real, contenido en humedad, granulometría), de características químicas (composición, caracterización de las cenizas y análisis inmediato de compuestos volátiles, carbono fijo y cenizas) y de su caracterización energética (poder calorífico superior e inferior).

### a) Astillas

Las astillas provienen del astillado de materiales leñosos como ramas y troncos procedentes de tratamientos selvícolas, de aprovechamientos forestales o de podas de cultivos leñosos. Se generan a través de la utilización de astilladoras por medio de rotores o discos que llevan acoplados sistemas de cuchillas fijas o flotantes. Estas astilladoras pueden trabajar en campo siendo remolcadas o autopropulsadas o bien en planta de manera estática (Tolosana et al. 2008a).

Además de la especie, el factor más importante para la determinación de la calidad de las astillas es su contenido en humedad (Acuna et al. 2012). Esta afecta al poder calorífico, las propiedades de almacenaje y costes de transporte del biocombustible (Asikainen et al. 2001, Röser et al. 2011). Un exceso de humedad reduce el precio de las astillas mientras que humedades bajas lo incrementan (Acuna et al. 2012).

Según Alakangas (2005) el contenido en humedad afecta al poder calorífico neto debido a que la evaporación del agua requiere energía. Por tanto, tal como indica Hakkila (2004) y puede observarse en la Figura 21, a mayor contenido en humedad, menor poder calorífico neto (MJ) por kilogramo de biomasa. Así pues, el secado de un lote de astillas genera que estas posean un mayor poder calorífico para una misma masa en seco.



**Figura 21. Influencia del contenido en humedad en el poder calorífico de la biomasa.**

**Fuente: Hakkila (2004).**

Por otra parte, diferentes tipos de plantas de combustión de astillas necesitan astillas de diferentes calidades (Bäfver y Renström 2013). Así pues, la calidad óptima de un biocombustible para una planta depende del tipo de caldera, manejo del biocombustible, almacenamiento y mezclado y de la estrategia operativa de la planta, por lo que es necesario que estas instalaciones



consideren sus necesidades en cuanto a calidad de biocombustible que requieren para su funcionamiento óptimo (Nordhagen 2014).

Existen numerosos estudios de astillas abordados desde diferentes perspectivas. A continuación se presentan los estudios más recientes y destacables sobre diferentes temáticas.

a.1.) Estudios sobre calidad de las astillas producidas en diferentes tipos de bosques e intervenciones selvícolas:

- Nordhagen (2014) estudia la calidad de las astillas de tronco, árbol completo, residuos forestales, raíces y corteza de 116 muestras de astillas de abeto (*Picea abies*). Este autor concluye que la densidad aparente varía con el contenido en humedad de las astillas. Por otra parte, afirma que el poder calorífico de las astillas de los residuos forestales es mayor que el de las astillas procedentes árbol completo y de troncos. Afirma también que el tamaño final de las astillas depende en gran medida de su origen y que las astillas de tronco contienen menos finos y fracciones de partículas pequeñas frente al árbol completo o residuos que poseen más finos debido a las ramas, trozos de corteza, etc. Por último, Nordhagen (2014) indica que la cantidad de finos en las astillas de residuos forestales se incrementa con la humedad de estas.
- Por otra parte, Kuptz y Hans (2014) han estudiado cómo la calidad de las astillas y el consumo de energía por parte de la astilladora dependen del material de origen y de los parámetros de configuración de la astilladora comparando cuatro tipos de astilladoras estacionarias (dos de tambores, una de disco y otra de cono) con diferente afilado de las cuchillas, tamaño de tamiz, forma de cono, velocidad y sistemas de descarga, y dos tipos de material (procedente de residuos forestales y procedente de troncos de diversas especies). Sus resultados indican que las astillas procedente de residuos forestales contienen de media mayor cantidad de cenizas y que tan sólo las astillas procedentes de madera de tronco astillada con astilladoras de cuchillas afiladas pueden clasificarse como astillas de calidad alta (“graded wood chips” según ISO 17225-4). Estos autores indican que la forma de las astillas depende mayormente del nivel de afilado de las cuchillas y los consumos energéticos son mayores para el caso de astillas procedentes de residuos forestales, tamaño de tamiz pequeño y cuchillas desafiladas.
- Cabe mencionar un importante trabajo sobre la caracterización y medidas de las propiedades los biocombustibles en Finlandia realizado por Alakangas (2005) donde se recopilan poder calorífico, composición química, contenido en humedad, densidad y otros parámetros de calidad para diferentes fracciones de biomasa y biocombustibles. Por su parte, en Noruega, Dibdiakova et al. (2014) estudia las diferentes propiedades de troncos, corteza y ramas del abeto (*Picea abies*) según su localización geográfica y a lo largo del tronco.
- A nivel nacional, López y Codina (2010) estudiaron las características de la astilla forestal de pino laricio (*Pinus nigra*) y pino carrasco (*Pinus halepensis*) y desarrollaron un manual de buenas prácticas para su aplicación energética. Concretamente estudiaron la evolución térmica de las pilas (como indicador de la

actividad biológica y el riesgo de autoignición), la evolución de la humedad mediante dos muestreos y la pérdida de materia seca en dos pilas de astillas de dos pilas de astillas con diferente cobertura (bajo cubierta y bajo textil) en 2009, hasta enero de 2010. También se recogieron datos de densidad aparente de astilla y del rendimiento del astillado previo en pista.

a.2.) Estudios sobre la influencia de los parámetros de la astilladora sobre las características físicas de las astillas:

- Eliasson et al. (2014) ha estudiado como el aumento del tamaño objetivo de las astillas en las astilladoras incrementa la productividad y reduce el consumo de combustible por tonelada producida en astilladoras de tambor cerrado y de disco, mientras que en astilladoras de tambor abierto el tamaño de la astilla es controlado parcialmente por el tamaño de la malla de tamiz. Los resultados obtenidos muestran diferentes reacciones del tamaño de las astillas al reducir la malla del tamiz dependiendo de la marca de la astilladora, mientras sí que se observa un descenso de la productividad y un aumento del consumo independientemente de la astilladora estudiada. Estos autores concluyen que el parámetro más importante que afecta al tamaño obtenido de las astillas es la largarúa de las cuchillas en una astilladora de tambor abierto tal y como ocurre para las astilladoras de tambor cerrado.

a.3.) Estudios del contenido en humedad y diversos parámetros operacionales sobre la cadena de aprovechamiento de biomasa:

- Acuna et al. 2012 estudiaron la importancia de la influencia del contenido de la humedad para la optimización de la logística del aprovechamiento de biomasa. Estos autores señalan que ambos, el volumen y la proporción de biomasa transportada a planta son muy sensibles a las especificaciones del rango de humedad y la duración del período de almacenado y secado. Comparando con un escenario donde no se da un período de almacenamiento (secado), con la implementación de métodos de secado adecuados tales como cubrimiento de la biomasa antes de astillar y transportar la biomasa a una planta de transformación energética, se puede dar una reducción hasta del 33% del volumen de biomasa forestal que necesario a aprovechar para obtener la misma energía mensual demanda por la planta.
- Por último, Ghaffariyan et al. (2014) han estudiado como afectan diversos parámetros operacionales (demanda energética, contenido en humedad, ratio de interés, distancia de transporte y carga máxima de los camiones) a los costes la cadena de aprovechamiento de biomasa en el Oeste de Australia. Como resultado estos autores concluyen que el incremento de estos factores incrementa de forma proporcional los costes de aprovechamiento de biomasa, mientras que el mayor coste se da con humedades comprendidas entre el 20-30% de humedad debido a que aunque los costes de transporte aumentan con el contenido de humedad el coste de astillado se reducen.

## b) Pellets de madera

Por su parte, los *pellets*, son cilindros de biomasa celulósica densificada realizados mediante presas compactadoras, análogas a las utilizadas para la fabricación de piensos granulados, que producen presiones del orden de 100kg/cm<sup>2</sup>. La adhesión de las partículas se consigue por fusión térmica de algunos componentes naturales de la biomasa sometidos a las altas presiones de granulación o bien por la adición de productos químicos que no contengan elementos contaminantes en la combustión (Ortiz et al. 2003, Fernández 2009).

Los pellets representan un producto compacto y estandarizado que tiene de ventaja frente a las astillas el poseer un mayor poder calorífico debido a su baja humedad y a una alta densidad por lo que reducen 4 veces el volumen respecto a las astillas, facilitando y abaratando así el transporte (Fernández 2009).

La mayoría de material para producción de pellets proviene de astillas de madera de especies de frondosas y coníferas. La mayoría de coníferas son pinos, abetos, etc. y entre las frondosas se incluyen robles, hayas, chopo, abedul, y sauces. La mayoría de productores prefieren especies de coníferas porque su densidad es más baja y son más fáciles de procesar. Se prefiere madera de tronco sobre otras fracciones del árbol como corteza, raíces, copas y ramas porque se requiere homogeneidad y predictibilidad en la combustión. En general, la corteza se retira antes de que los troncos sean aserrados o las planas u otros productos de madera sean pulidos. La pelletización de troncos astillados sin descortezar puede implicar ciertas incertezas respecto a la calidad de los pellets (Filbakk 2011).

Aunque actualmente en Europa los sistemas de pequeña escala de combustión (mayormente domésticos como estufas y calderas) requieren pellets de altas calidades, la escasez de recursos debido a la creciente demanda está empujando hacia la utilización de otros materiales alternativos como madera de baja calidad (residuos forestales, corcho, etc.), pajas de cultivos, torta de prensa de oliva, etc. En la mayoría de países europeos se están dando las primeras actividades industriales que utilizan estos materiales alternativos junto con su integración también en el sector público (MixBioPells 2011).

Según Lestander et al. (2012), existen comparativamente muy pocos estudios que hayan examinado el uso de madera no descortezada para pelletizar. No obstante, de las experiencias existentes, cabe destacar las siguientes:

### b.1.) Estudios de pellets con corteza:

- Bradfield y Levi (1984) examinaron pellets mezclados de corteza y madera. Ratios de corteza y madera de 0%, 15%, 25% y 35% fueron estudiados procedentes de seis especies de frondosas y una conífera. La durabilidad más alta se alcanzó para los pellets de coníferas sin corteza añadida, mientras que sin embargo, para cinco de las seis frondosas, la durabilidad aumentó conforme se incrementaba el porcentaje de corteza añadida.

- Relova et al. (2009) examinaron la durabilidad mecánica de los pellets de polvo de aserrío de pino con un contenido de un 18,3% de corteza. A la más alta presión testada (340MPa), los pellets más durables fueron aquellos obtenidos utilizando partículas de 1-2mm.
- Filbakk et al. (2011) estudiaron el efecto de la presencia de corteza sobre la calidad final de pellets de madera. Concluyó que los pellets hechos utilizando una mezcla de madera de *Pinus sylvestris* y corteza fueron ligeramente menos durables y produjeron algo más de cenizas que aquellos hechos de madera de tronco descortezada.

### b.2.) Estudios de pellets procedentes de residuos forestales:

- Lehtikangas (2001) estudió las propiedades físico-mecánicas, químicas y energéticas de nueve tipos de pellets procedentes de polvo de aserrío, corteza y residuos forestales procedentes de *Pinus sylvestris* y *Picea abies*. Concluyó que los pellets procedentes de corteza eran los de mayor durabilidad mientras que los de polvo de aserrío eran los de menor. El contenido en cenizas era mayor en pellets procedentes de corteza y de residuos forestales y que la densidad de los pellets no influía sobre la durabilidad aunque el contenido en lignina aparecía correlacionado positivamente. En resumen, concluyó que los pellets de corteza y de residuos forestales son apropiados para la producción de pellets siempre que se controle el contenido en cenizas.

### b.3.) Estudios de pellets de mezclas de diferentes especies:

- Lestander et al. (2012) estudiaron la producción de pellets a través de un nuevo proceso de astillado en una planta experimental a nivel industrial de pellets. Se mezclaron diversas especies (*Picea abies*, *Pinus sylvestris* y *Fagus sylvatica*) con diversas humedades de entrada y se estudió el efecto de las mezclas y las humedades sobre la densidad aparente, la durabilidad, el contenido en humedad y en cenizas. Concluyeron que era factible fabricar pellets de alta calidad con estas distintas mezclas.

### b.4.) Estudio de la influencia de variables en la respuesta del pellet:

- Kaliyan y Morey (2009) revisaron diversos estudios sobre el efecto del material de origen y su composición, el contenido en humedad, el tamaño de partícula y su distribución, el efecto de la temperatura a la hora de pelletizar, la adicción de adhesivos, y variables de los equipos de densificación sobre la resistencia y la durabilidad de pellets y briquetas. La mayoría de autores señalan un aumento de la durabilidad cuando se reduce el tamaño de las partículas.

- Rhén et al. (2005) estudiaron el efecto del contenido previo en humedad, la presión de densificación y temperatura sobre la absorción de humedad, densidad y resistencia a la compresión de pellets de *Picea abies*. Se llegó a la conclusión de que la presión determinaba la densidad de los pellets mientras que ciertos rangos de temperaturas y humedades también la incrementaban.
- Salas-Bringas et al. (2010) analizaron el efecto de la temperatura de secado y el tiempo de almacenamiento sobre la compresibilidad y resistencia de pellets de *Pinus sylvestris*. La compresibilidad no se vio condicionada por estos factores mientras que mayores temperaturas de secado y tiempo de almacenamiento se relacionó con mayores resistencias.
- Samuelsson et al. (2009) determinaron como diversos factores (especie, lugar de origen, tiempo de almacenaje, humedad previa y tratamiento de vapor) influían sobre la densidad aparente y la durabilidad del pellet. Un mayor tiempo de almacenaje y una menor humedad generaron mayores densidades aparentes, mientras que también largo tiempo de almacenaje y humedades moderadas incrementaban la durabilidad. Se encontraron indicios de que la reducción de ácidos grasos y resinas con el tiempo influyó la calidad de los pellets.

### **c) Calidad de los biocombustibles sólidos**

La estandarización para los biocombustibles sólidos toma lugar tanto a nivel europeo (CEN) como a nivel internacional (ISO). En Europa, el Comité Técnico CEN/TC 335 “*Solid biofuels*” ha sido el responsable del desarrollo de los estándares europeos en cuanto a biocombustibles sólidos se refiere. En este sentido, este comité ha terminado prácticamente su plan de trabajo ya que todos los estándares europeos han sido ya publicados. A nivel mundial, en este momento es el Comité Técnico ISO/TC 238 “*Solid Biofuels*” el que ha empezado su programa y todos los estándares internacionales están en desarrollo. Muchos de los estándares europeos han sido elevados a estándares internacionales.

A día de hoy, la normativa europea vigente (EN-14961) establece los ensayos a realizar y los estándares de calidad tanto para pellets como para astilla. En base a esta normativa se ha establecido el proceso de certificación, tanto para la producción como para su distribución, bajo la marca de calidad EN Plus.

En el último año, en España, hasta ocho empresas productoras de pellets han alcanzado los estándares de calidad EN-Plus, establecidos por el Consejo Europeo del Pellet basado en la normativa establecida por los organismos competentes en la Unión Europea (*European Committee for Standardization*). Actualmente, numerosas empresas optando del mismo modo por la certificación.

### **1.3. Justificación de la investigación**

Tras el análisis de los antecedentes y el estudio del estado del arte, en líneas generales, el presente trabajo de investigación justifica su desarrollo por tres necesidades fundamentales:

- a) Estímulo de gestión y ordenación forestal orientada a la función productiva (bioenergética) de los montes valencianos a escala local/comarcal.
- b) Protección y cuidado de los ecosistemas forestales, fundamentalmente frente al abandono y a los incendios forestales y a la fijación de carbono.
- c) Desarrollo rural en base a la generación de empleo, empresas y riqueza en un sector económico clave como el de las energías renovables.

Para poder dar respuesta a las tres necesidades identificadas, se identifican los siguientes aspectos claves que justifican el presente trabajo de investigación, en aplicación del método científico:

#### **1) Estudio cualitativo y cuantitativo de las existencias de biomasa**

La cuantificación de la biomasa potencial y existente disponible es el primer factor determinante de la viabilidad de los aprovechamientos biomásicos con fines energéticos y también el pilar de apoyo de planes de gestión de biomasa que logren un aprovechamiento integrado y optimizado de los recursos existentes en el territorio. En la zona de estudio, es decir, en la Comunitat Valenciana, no existen estudios completos y científicamente desarrollados sobre las existencias reales de biomasa forestal movilizable para su uso bioenergético, ni desde el punto de vista cuantitativo ni cualitativo.

#### **2) Desarrollo de modelos de gestión**

Se necesitan programas para la utilización e implementación del uso de la bioenergía a nivel nacional y regional debido a que la biomasa es un recurso abundante y accesible en la Comunitat Valenciana que puede contribuir en gran medida a la revitalización del sector forestal (industrias forestales) así como de las zonas rurales y contribuir al mismo tiempo a los objetivos de autosuficiencia energética y sustitución de combustibles fósiles por energías renovables. Por último, el uso de la biomasa forestal de manera planificada y sostenible, contribuirá a mantener importantes funciones ecológicas, económicas y sociales de los bosques antropizados. No existen experiencias sobre la definición de modelos de gestión integral de bioenergía forestal a nivel local o comarcal en la Comunitat Valenciana.

### 3) Estudio de los sistemas de aprovechamiento

Hasta la fecha muy pocos estudios se han realizado sobre sistemas de aprovechamiento y logística forestales para la utilización de los recursos biomásicos en la Comunitat Valenciana. Por el contrario, sí existen numerosas tecnologías de conversión para la biomasa forestal desarrolladas y en uso. Por ello, es necesario establecer un sistema de aprovechamiento bioenergético de bajo coste para la biomasa forestal, adaptado a la realidad de las masas forestales en la Comunitat Valenciana.

Es muy importante tanto para los gestores de los montes como para los empresarios forestales conocer los rendimientos de los trabajos forestales así como sus costes de ejecución para poder valorar los montes en las subastas públicas debidamente. Aunque estos factores son muy difíciles de conocer con exactitud, ya que costes y rendimientos se ven afectados por infinitud de variables dependientes de las condiciones fisiográficas, selvícolas y de accesibilidad de cada monte, su conocimiento beneficiaría tanto a los propietarios forestales (tanto públicos como privados) como a las empresas forestales que realizan los trabajos, ya que los precios se ajustarían a la realidad del mercado, otorgando una renta más justa para los propietarios y un margen de beneficios más estable a las empresas.

En muchas ocasiones se desconoce completamente si algunos aprovechamientos son rentables o no y se dejan de hacer por este desconocimiento. En base a un trabajo de investigación riguroso, una vez conocidos los rendimientos se pueden planificar de manera adecuada los aprovechamientos, desde el inicio del procesado manual, el momento en que deben de entrar a trabajar los medios de saca y posteriormente el transporte a fábrica. La planificación, no sólo la debe hacer el empresario que ejecuta el aprovechamiento, sino que también debería hacerla el gestor para evitar parar los aprovechamientos sin estar terminados, por época de incendios, por plagas, por encharcamientos, etc. También se deben prever márgenes de retraso en todas estas fases del trabajo por los imprevistos que puedan surgir.

Aunque se conoce mucho sobre la productividad y sobre cómo afectan las variables de la masa forestal y del tipo aprovechamiento sobre la eficiencia de sistemas mecanizados de aprovechamiento existen aún hoy en día discrepancias en cuanto a diferencias en costes entre el sistema de aprovechamiento integrado y el de árbol completo. Los ingresos potenciales generados por estos dos sistemas pueden también ser diferentes debido a los distintos productos que a través de ellos se pueden obtener.

De este modo, aunque se suele preferir el sistema de aprovechamiento de árbol completo basado en las conclusiones de las experiencias de autores centroeuropeos y principalmente nórdicos, generalmente en aclareos de monte bravo y claras pre-comerciales latizal bajo, para el aprovechamiento de biomasa con fines energéticos se desconoce de manera explícita qué sistema es más favorable en las condiciones mediterráneas sobre *Pinus halepensis* en un estado de latizal medio-alto no tratado selvícolamente. Es debido a este contexto por lo que se realiza la presente investigación de comparación de sistemas de aprovechamiento.

#### 4) Estudio de la calidad de astillas y pellets y mezclas en su composición

La utilización de todo el tronco de los árboles, incluyendo la corteza, ayudaría a ampliar el material de base para la producción de los pellets y abarataría al mismo tiempo el coste de su procesado. No se tiene conocimiento sobre experiencias previas de pelletizado de astilla procedente de aprovechamiento a árbol completo de *Pinus halepensis*.

Por otra parte pocos estudios sobre pellets de madera se han publicado y el conocimiento existente sobre los efectos de las propiedades de la biomasa sobre la calidad de los mismos es muy limitado. La madera de tronco descortezado, corteza, ramas y hojas difieren entre sí en cuanto su estructura de la fibra y composición química (contenido de lignina, celulosa, hemicelulosa y extractivos). Procesos tales como la hidrólisis, autooxidación o degradación microbiológica además cambian las propiedades del material durante su almacenamiento en los procesos de la cadena de suministro desde el monte hasta la planta de valorización energética. Es por ello que es necesario abordar el estudio tanto de la calidad de los biocombustibles sólidos dependiendo de su procedencia así como de cómo ciertas variables como su composición, mezcla de especies y contenido en corteza puede afectar a sus propiedades físico-mecánicas, químicas y energéticas y por ende, a su calidad.



# CAPÍTULO 2. OBJETIVOS

---

## 2.1. Objetivo general

El objetivo general del trabajo de investigación de la tesis doctoral es el análisis y el desarrollo de un modelo integral de gestión, planificación, aprovisionamiento y valorización energética de la biomasa forestal residual de la Provincia de Valencia.

## 2.2. Objetivos específicos y operativos

Para alcanzar el objetivo general descrito, el trabajo de investigación cuenta con los siguientes objetivos específicos a alcanzar con los correspondientes objetivos operativos:

1. Cuantificar las existencias actuales y las posibilidades futuras de aprovisionamiento de biomasa residual en la Provincia de Valencia.
  - 1.1. Cuantificar la biomasa forestal y la cantidad de biomasa forestal residual.
  - 1.2. Estimar el potencial (posibilidad) de biomasa forestal y agrícola residual.
  - 1.3. Identificar zonas de gestión de biomasa autosuficientes.
2. Establecer directrices de gestión, aprovechamiento y logística de biomasa para las zonas de gestión identificadas en la Provincia de Valencia.
3. Seleccionar parcelas de estudio representativas de los bosques mediterráneos en la provincia de Valencia.
4. Analizar y comparar sistemas de aprovechamiento y logística óptimos para el aprovechamiento de la biomasa de un latizal alto de *Pinus halepensis*.
  - 4.1. Planificar, organizar y ejecutar dos sistemas de aprovechamiento de biomasa (aprovechamiento integrado de fustes más residuos y aprovechamiento de árbol completo).
  - 4.2. Analizar los aprovechamientos en cuanto a rendimientos, consumos, calidad de biomasa obtenida, impacto medioambiental generado, rentabilidad, balances de emisiones de gases de efecto invernadero, y balances energéticos.
5. Analizar las características físicas, químicas y energéticas del material astillado procedente de parcelas de estudio para su uso energético.

6. Desarrollar biocombustibles sólidos de alta calidad (pellets)
  - 6.1. Seleccionar los equipos para una planta piloto de elaboración de pellets.
  - 6.2. Elaborar pellets a partir de las astillas procedentes de tronco, ramas y presencia de corteza de las especies *Pinus halepensis* y *Pinus pinaster*.
  - 6.3. Analizar la calidad de los pellets producidos y las relaciones entre variables de calidad.
  - 6.4. Elaborar pellets a partir de mezclas de astillas con corteza y sin corteza y determinar el contenido en corteza máximo tolerado para cumplir con los requisitos de la norma europea en cuanto a contenido en cenizas.

## ***CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS***

---

### **3.1. Planificación**

Con el fin de conseguir una planificación a nivel provincial, pero también a nivel comarcal o local, de la gestión de la biomasa forestal residual leñosa, en este apartado se procede a describir la metodología desarrollada para la cuantificación de las existencias actuales y las posibilidades futuras de biomasa forestal y agrícola en la Comunitat Valenciana, concretamente en la Provincia de Valencia.

En base a la cuantificación de las existencias totales de biomasa leñosa forestal, se ha calculado la posibilidad de obtención de biomasa forestal residual anual, es decir, las toneladas aprovechables anualmente de biomasa residual. Para el caso de la biomasa agrícola se han calculado directamente posibilidades de biomasa residual, que es aquella procedente de podas.

#### ***3.1.1. Materiales***

Las bases de datos y material cartográfico sobre el cual se ha desarrollado la metodología han sido el 3<sup>er</sup> Inventario Forestal Nacional (IFN3 2008) y el Mapa Forestal de España (MFE 2007).

Los principales datos recabados han sido los siguientes:

- Datos dasométricos generales por estrato, especies y provincias. En concreto los datos de la tabla 301: *Densidad de la masa. Existencias por hectárea de cada estrato y especie*: volumen con corteza del fuste (Vcc) en m<sup>3</sup>, incremento anual del volumen con corteza (IAVC) en m<sup>3</sup>/ha, número de pies menores y altura media obtenida de las parcelas del IFN3.
- Base cartográfica del MFE 50, modificada por los estratos arbolados y desarbolados definidos para los Ecosistemas del PATFOR (2011).

#### ***3.1.2. Metodología para la cuantificación de las existencias de biomasa***

Para el análisis del potencial de valorización de la biomasa existente en la Provincia de Valencia para su uso energético, es necesario considerar como biomasa susceptible de ser aprovechada como recurso energético y objeto del presente estudio:

1. Determinadas fracciones de biomasa forestal (especificadas posteriormente en el apartado 3.1.2.2). Los residuos generados por los cultivos leñosos en la Provincia de Valencia.

Debido a que existen claras diferencias tanto en la obtención del material en campo como en los datos de registro, se establece una metodología de estimación de recursos existentes para cada una de las tipologías del material a considerar, es decir:

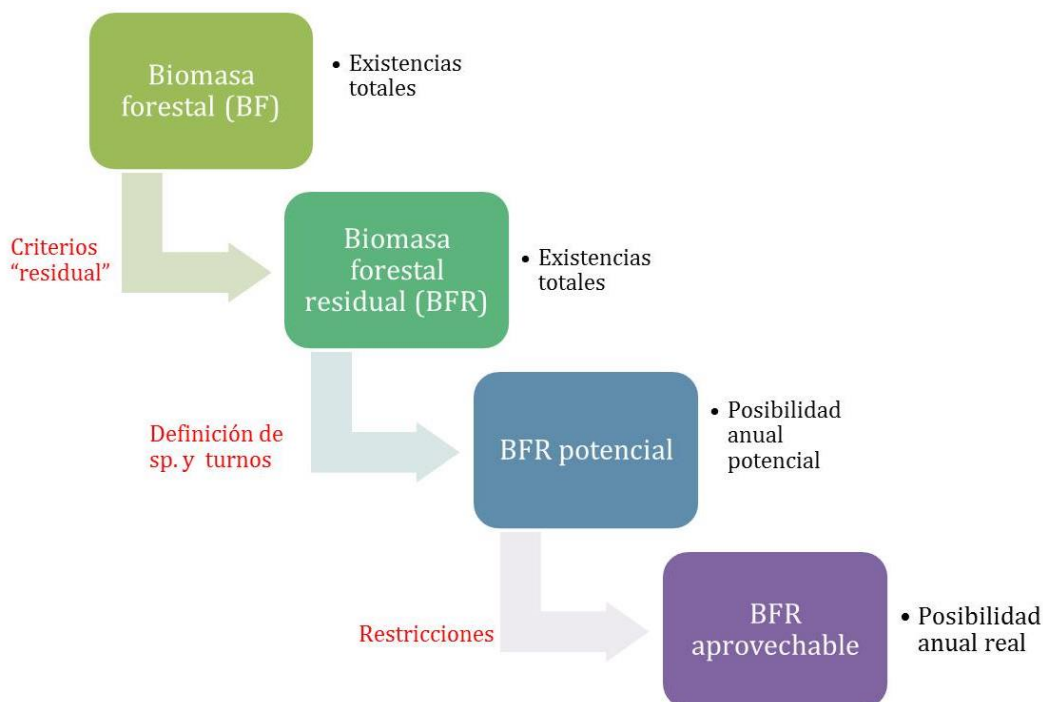
- a) una metodología para el cálculo de existencias de biomasa residual forestal y
- b) otra metodología para el cálculo de existencias de biomasa residual agrícola.

En el caso del cálculo de existencias de biomasa residual agrícola, estas existencias coinciden con la posibilidad anual de generación de residuos del cultivo, por lo que la metodología para su estimación se ha incluido en el punto *1.3.2 Metodología para estimación de potencial anual de biomasa forestal y agrícola residual*.

El nivel de detalle al que se pretende llegar es al de una planificación local de la gestión de los recursos, por tanto los datos de entrada para la realización de las estimaciones deben ser adaptables a este nivel de detalle. En el caso de la biomasa forestal, la entrada de datos se hace a partir de la unidad de superficie de la tesela (recogida por el IFN3) y posteriormente éstas son agrupadas por municipios. Los datos relativos a la biomasa agrícola vienen detallados a nivel local.

#### **3.1.2.1. *Cuantificación de las existencias totales de biomasa forestal***

La Figura 22 muestra de forma esquemática la metodología general que se ha seguido para la estimación de la biomasa potencial de aprovechamiento energético.



**Figura 22. Esquema de la metodología a seguir para la estimación de la biomasa potencial de aprovechamiento energético. Fuente: elaboración propia.**

En primer lugar se ha desarrollado una metodología basada en criterios e indicadores cuantitativos para estimar la biomasa forestal existente en el territorio de la Provincia de Valencia.

Se han empleado los datos disponibles de las diferentes fuentes cartográficas y bibliográficas, siendo lo más riguroso posible en la toma de decisiones de los criterios a emplear, teniendo en cuenta la escala de trabajo y el objetivo de aplicación de los datos. En base a los datos disponibles del IFN3, se calculan las existencias de biomasa arbórea: pies mayores, pies menores y monte regenerado.

Una vez determinada la biomasa forestal se ha calculado la potencialidad de aprovechamiento biomásico de la Provincia de Valencia. Para ello, se han seleccionado en primer lugar, las especies susceptibles de aprovechamiento, teniendo en cuenta para ello las existencias y las características de la especie. Una vez seleccionadas se ha procedido al cálculo de la biomasa considerando los diferentes criterios de definición del material (parte del árbol a aprovechar, estado de la masa, etc.).

Después del cálculo de las existencias de biomasa forestal aprovechable como recurso energético, se han aplicado una serie de restricciones teniendo en cuenta las diferentes limitaciones existentes en el territorio que hacen insostenible su extracción, ya sea por cuestiones medioambientales, técnicas o de viabilidad económica.

Como resultado previo se obtienen toneladas (t) de biomasa existentes en la Provincia de Valencia para todas las especies georreferenciadas sobre el territorio. Posteriormente se

obtendrá la biomasa real aprovechable atendiendo a las restricciones pertinentes y con ello, se establecerá una zonificación de áreas de mayor concentración de biomasa donde se podrán establecer medidas de actuación.

Finalmente, se ha decidido elaborar una metodología de estimación de biomasa forestal propia debido a las restricciones de los datos de partida, basados en los datos proporcionados por el IFN3, y en los resultados del trabajo de Montero et al. (2005).

### a) Estimación de biomasa procedente de pies mayores

#### a1) Datos de partida

Para la obtención del total de la biomasa forestal arbórea, según la metodología que se va a exponer seguidamente, se precisa conocer la cantidad total de biomasa (t) de la totalidad de especies arbóreas forestales en la Provincia de Valencia. Sin embargo, los datos de campo provenientes del IFN3 sólo ofrecen datos de existencias en volumen del fuste (m<sup>3</sup>). Por ello, el tratamiento de los datos de partida tiene como objetivo la obtención del volumen de biomasa por especie referenciada sobre la unidad mínima del territorio (tesela) con el fin de realizar análisis territoriales sobre existencias y potenciales biomásicos en la Provincia de Valencia.

Cada tesela está caracterizada en el IFN3 por una serie de parámetros que indican valores medios homogéneos para toda su superficie. De entre estos parámetros, el descriptor “Estrato” proporciona información sobre el tipo de vegetación arbórea del recinto, según la(s) especie(s) presentes, sus ocupaciones respectivas, sus estados de masa y fracción de cabida cubierta arbórea. Es decir, se trata de un caracterizador de los tipos de vegetación existentes en cada provincia que proporciona datos dasométricos homogéneos para cada estrato, como viene indicado en la Tabla 9.

**Tabla 9. Estratos definidos para la Provincia de Valencia. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del IFN3.**

Estrato	Formación forestal dominante	Ocupación (%)	Estado de masa	Fracción de cabida cubierta (%)
01	<i>Pinus halepensis</i>	>=70	Fustal. Latizal	70-100
02	<i>Pinus halepensis</i>	>=70	Fustal. Latizal	40-69
03	<i>Pinus halepensis</i>	>=70	Fustal. Latizal	20-39
04	<i>Pinus halepensis</i>	>=70	Monte bravo. Replado	5-100

Estrato	Formación forestal dominante	Ocupación (%)	Estado de masa	Fracción de cubida cubierta (%)
05	<i>Pinus nigra</i> y <i>P. pinaster</i> puros o en mezcla entre sí o con <i>Pinus halepensis</i>	$\geq 70$ ; $30 \leq \text{Esp.} < 70$	Fustal. Latizal	40-100
06	<i>Pinus nigra</i> y <i>P. pinaster</i> puros o en mezcla entre sí o con <i>Pinus halepensis</i>	$\geq 70$ ; $30 \leq \text{Esp.} < 70$	Fustal. Latizal	20-39
07	<i>Quercus ilex</i> puro o en mezcla con <i>Pinus halepensis</i> o <i>Ceratonia siliqua</i>	$\geq 70$ ; $30 \leq \text{Esp.} < 70$	Fustal. Latizal	20-100
08	<i>Quercus ilex</i> puro o en mezcla con pinos	$\geq 70$ ; $30 \leq \text{Esp.} < 70$	Monte bravo. Repoblado	5-100
09	<i>Juniperus thurifera</i>	$\geq 70$	Fustal. Latizal, Monte bravo. Repoblado	20-100 5-100
10	Árboles de ribera	$\geq 70$ ; $30 \leq \text{Esp.} < 70$	Todos	5-100
11	Matorral con arbolado ralo y disperso	$\geq 70$ ; $30 \leq \text{Esp.} < 70$	Fustal, Latizal	5-19

El IFN3 (2008), además caracteriza cada provincia con los siguientes parámetros por estrato recogidos en tabla 301 del IFN3:

- Nº pies mayores (P.MA.)/ha,
- Área basimétrica (AB) en m<sup>2</sup>/ha,
- Volumen con corteza del fuste (Vcc) en m<sup>3</sup>/ha
- Volumen sin corteza del fuste (Vsc) en m<sup>3</sup>/ha
- Incremento anual del volumen con corteza (IAVC) en m<sup>3</sup>/ha
- Nº pies menores (p.me.)/ha,

Estos valores dasométricos corresponden la totalidad de las especies presentes en un estrato, pero igualmente se conoce para cada una de las especies que componen el estrato el Vcc medio de esa especie (m<sup>3</sup>/ha) dentro del estrato en la misma tabla 301

como se muestra en la Tabla 10 (muestra parcial de la tabla 301 para la Provincia de Valencia).

**Tabla 10. Datos dasométricos definidos para *Pinus halepensis* para todos los estratos en la Provincia de Valencia. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del IFN3.**

Estrato	CANT. P. MA.	AB	Vcc	Vsc	IAVC	Cant. p. me.
1	606	15,72	67,96	50,71	2,35	286
2	306	7,94	31,13	23,13	1,19	185
3	121	3,37	12,38	9,27	0,49	90
4	33	0,33	0,94	0,70	0,05	312
5	54	2,03	9,35	7,08	0,29	52
6	17	0,50	1,86	1,40	0,07	14
7	44	1,33	5,47	4,16	0,18	18
8	8	0,21	0,65	0,47	0,03	4
9	1	0,07	0,25	0,19	0,01	1
10	9	0,28	1,47	1,14	0,04	0
11	32	0,92	3,49	2,63	0,13	45
Todos	201	5,22	21,06	15,70	0,78	157

Por los ítems en la tabla 301 de cada provincia del IFN3, se conocen todas las especies presentes en ese estrato, y con ello se conoce así el Vcc del fuste de cada especie por estrato. Por ejemplo, en el caso de una tesela caracterizada por pertenecer al Estrato 1 de la Provincia de Valencia existe un volumen de 67,96 m<sup>3</sup>/ha de *Pinus halepensis*. Multiplicando por el número de hectáreas que existen en una determinada tesela se obtiene el Vcc del fuste de una determinada especie esa tesela. Igualmente sucede con el resto de volúmenes del fuste de las especies que aparecen en esa tesela.

Las especies más abundantes están especificadas de mayor a menor en la misma tabla 301 para cada provincia. De esta manera se realiza una simplificación de la realidad, pero debido a la falta información de base más precisa, esta es la mayor aproximación que se puede alcanzar.

### a2) Cálculo de biomasa

Las estimación de la biomasa forestal existente en la Provincia de Valencia se ha realizado utilizando los resultados de la metodología desarrollada por Montero et al. (2005). Este autor desarrolla una metodología de medición indirecta que determina el porcentaje de materia seca en peso (Kg) que ocupa cada una de las fracciones de un árbol, tanto en su parte aérea (fuste y ramas) como en su parte radical (raíces), sobre la totalidad de la biomasa seca de un individuo de las principales especies de interés en la Península Ibérica (ver Tabla 11). Se ha utilizado los resultados de Montero et al. (2005), debido a que se trata de la metodología más detallada y más ampliamente utilizada en los



estudios sobre la evaluación de biomasa realizados en el territorio español (TRAGSATEC 2000, Esteban et al. 2008) y así mismo se basa en muestras de pies que comparten las más próximas condiciones fitoclimáticas con los correspondientes en el ámbito del presente estudio.

**Tabla 11. Porcentajes obtenidos de los valores modulares de biomasa seca (Kg anhidros) de las distintas fracciones de biomasa según Montero et al. (2005). Fuente: elaboración propia (tabla completa para todas las especies de estudio en Anexo 1).**

Especie Nombre Cient.	Biomasa Aérea					Biomasa Radical	
	Fuste	Ramas R >7cm	R 2-7cm	R <2cm	Hojas		Total
<i>Pinus halepensis</i>	37,0%	9,8%	8,4%	21,2%	0,0%	76,4%	23,6%
<i>Pinus pinaster</i>	61,9%	0,9%	4,1%	10,9%	0,0%	77,9%	22,1%

Sin embargo, para la aplicación de estos coeficientes es necesario en primer lugar transformar los datos conocidos en volumen (m<sup>3</sup>) a materia seca en peso (kg). Para ello es necesario utilizar la densidad básica de la madera, tal como se muestra en la Tabla 12.

**Tabla 12. Densidad básica de la madera para algunas de las especies de estudio. Fuente: elaboración propia a partir de diferentes fuentes (tabla completa para todas las especies de estudio en Anexo 1).**

Especie	Densidad básica (g/cm <sup>3</sup> )
<i>Pinus halepensis</i>	0,386
<i>Pinus pinaster</i>	0,455

A partir de los datos de materia seca en peso del fuste de cada una de las especies en la tesela (t), aplicando los porcentajes definidos por Montero et al. (2005), se estima la cantidad total de biomasa existente en cada tesela por especie mediante el producto de la inversa del porcentaje que ocupa el fuste sobre el total de la materia seca de un individuo de una especie determinada. Mediante el sumatorio de la materia seca de todas las especies que se dan en la tesela obtenemos la cantidad total de biomasa anhidra por tesela (toneladas).

$$BT_{i,t}(\text{toneladas}) = \Sigma(100 * \text{Materia seca fuste}_i / \% \text{fuste}_i)$$

siendo,

Materia seca fuste i, (t): la materia seca en peso de los fustes de una especie (i) sobre una tesela

%fuste  $i$  : el porcentaje que ocupa el fuste de la especie ( $i$ ) sobre el resto de la biomasa del árbol según Montero et al. (2005).

$BT_{it}$ , la biomasa total existente por especie ( $i$ ) y tesela ( $t$ )

Las existencias totales de biomasa arbórea en la Provincia de Valencia son el resultado de la suma de toda la biomasa total de cada especie para todas las teselas correspondientes a la Provincia de Valencia y se expresan en toneladas de biomasa seca.

$$BT(T) = \Sigma(BT_{it})$$

#### b) Estimación de biomasa procedente de pies menores

##### b1) Datos de partida

Como en el caso anterior, para el cálculo de la biomasa procedente de pies menores se requiere conocer el  $V_{cc}$  de cada una de las especies presentes en la Provincia de Valencia. Igualmente, con el fin poder georreferenciar estos datos sobre el territorio se necesita utilizar la unidad básica de la tesela procedente del IFN3.

Los pies menores corresponden a la Categoría 4 del estudio de regeneración y quedan definidos como aquellos pies con altura superior a 130 cm. y diámetro normal comprendido entre 2,5 y 7,5 cm. Generalmente, se toma como diámetro medio de pies menores  $\emptyset=5$  cm.

En este caso, el dato que proporcionan los estadillos de campo del IFN3 es el diámetro medio de los pies menores para cada una de las provincias y se obtiene una altura media de los pies menores para todas las especies<sup>1</sup> y por provincia.

Considerando un diámetro medio para todos los pies menores (con independencia de especie y estrato) y con el dato de la altura, se obtiene un volumen medio<sup>2</sup> de un pie menor de 3,23m.

---

<sup>1</sup> Se obtiene una altura media de todas las especies al comprobar que no hay diferencias significativas en los datos medios por especie.

<sup>2</sup> Para las especies de coníferas se aplican los coeficientes mórficos aportados por Pita Carpenter (1975): *Pinus sylvestris*  $f= 0,51$ ; *Pinus nigra*  $f= 0,57$ ; *Pinus halepensis*  $f= 0,5$ ; *Pinus pinaster*  $f= 0,57$ ; *Pinus pinea*  $f= 0,53$ . Para el resto de especies se aplica  $f= 0,5$  siendo  $f$  el coeficiente mórfico.

## b2) Cálculo de biomasa

Al igual que en la estimación de la biomasa forestal arbórea de los pies mayores se ha utilizado porcentajes de materia seca. En este caso se necesita calcular de forma previa la relación de cada una de las fracciones del árbol sobre la totalidad de la biomasa de un individuo para pies con un diámetro medio de 5 cm (ver Tabla 13), ya que los porcentajes proporcionados por Montero et al. (2005) hacen referencia a pies con un diámetro medio entre 20-30 cm de diámetro y aparecen variaciones conforme disminuye el diámetro del árbol.

**Tabla 13. Porcentajes obtenidos de los valores modulares de biomasa seca (Kg anhidros) de las distintas fracciones de biomasa para pies con un diámetro medio de 5 cm según Montero et al. (2005). Fuente: elaboración propia (tabla completa para todas las especies en Anexo 1).**

Especie	Biomasa Aérea					Biomasa Radical	
	Fuste	Ramas			Hojas		Total
		R >7cm	R 2-7cm	R <2cm			
Nombre Cient.							
<i>Pinus halepensis</i>	43,6%	0,0%	7,3%	29,1%	0,0%	80,0%	20,0%
<i>Pinus pinaster</i>	56,8%	0,0%	2,7%	13,5%	0,0%	73,0%	27,0%

Una vez obtenidos estos porcentajes de aplicación se sigue la misma metodología que en el caso de los pies mayores, obteniendo como resultado toneladas de biomasa de pies menores por tesela.

### 3.1.2.2. *Cuantificación de existencias de biomasa residual forestal*

Tomando como datos de partida los obtenidos de la estimación de las existencias de biomasa forestal en la Provincia de Valencia, para estimar la cantidad susceptible de ser aprovechada como recurso energético es necesario, en primer lugar, definir qué especies se van a considerar como aprovechables y qué fracción de éstas.

Así pues, se consideran como aprovechables las especies arbóreas de mayor ocupación y presencia en el territorio de la Provincia de Valencia. Según se detalla en el IFN3, estas son las especies de los géneros *Pinus* de entre las coníferas y *Quercus* de entre las frondosas. De entre ellas, en la Provincia de Valencia predomina la existencia de *Pinus halepensis*, *Pinus nigra*, *Pinus pinaster* y de *Quercus ilex* y *Quercus faginea*.

La importancia de estas especies en cuanto a su aprovechamiento se refleja en la Tabla 14 extraída de los datos proporcionados por el IFN3 donde se representa la superficie que ocupan del total de la superficie forestal de la Provincia de Valencia (1.250.051 ha) y sus existencias (612.130,19 m<sup>3</sup> total de todas las especies, según datos del IFN2).

**Tabla 14. Datos de existencias y ocupación de las principales especies arbóreas de la Comunitat Valenciana. Fuente: Documento consultivo PATFOR (2009).**

Especies	Áreas (ha)	Existencias		Incremento anual medio	
		Nº de árboles <sup>1</sup>	Volumen <sup>2</sup> (m <sup>3</sup> )	Nº de árboles <sup>1</sup>	Volumen <sup>2</sup> (m <sup>3</sup> )
<i>P. halepensis</i>	455.866,4	127.890.278	13.408.019,0	2.249.199	395.560,5
<i>P.nigra</i>	32.424,0	20.906.799	2.624.410,4	478.526	88.431,4
<i>P.pinaster</i>	21.058,9	8.578.766	1.244.869,9	86.048	23.478,8
<i>P.sylvestris</i>	6.686,2	2.973.985	417.884,2	131.681	19.849,6
<i>Q. ilex</i>	101.675,9	48.810.796	1.061.979,8	1.836.815	45.044,4
<i>Q.faginea</i>	9.317,1	6.842.729	253.782,1	262.152	10.335,3

<sup>1</sup> Árboles con un diámetro normal (DAP 1,30m) igual o mayor a 7,5 cm

<sup>2</sup> Volumen con corteza

Pese a su reducida importancia territorial a escala de la Comunitat Valenciana se ha incluido dentro de este grupo al *Pinus pinea* debido a su destacada presencia en ciertas zonas del territorio donde constituye la especie dominante en el estrato arbóreo.

Generalmente, se considera biomasa forestal susceptible de ser aprovechada como recurso energético aquella biomasa procedente del conjunto de residuos vegetales generados a partir de operaciones selvícolas como podas, selección de brotes, clareos, etc. Sin embargo, debido a la situación actual de las masas forestales en la Provincia de Valencia sobre las cuales no se realiza actualmente ningún tipo de intervención, los criterios de clasificación de la biomasa arbórea de uso industrial y las especificaciones de los técnicos de la Consellería de Medi Ambient, Aigua, Urbanisme i Habitatge de la Generalitat Valenciana, se ha considerado tener en cuenta en función del estado de la masa las siguientes fracciones del árbol.

#### a) BRF en estado de fustal

Está compuesta por todas aquellas fracciones del árbol obtenidas de las actuaciones definidas anteriormente, que no pueden ser incluidas en el aprovechamiento maderero. Es decir, por las ramas de diámetro menor de 7 cm:

- Ramas de diámetro comprendido entre 2 y 7 cm
- Ramillas de diámetro menor de 2 cm
- Hojas o acículas

### **b) BRF en estado de latizal**

Siguiendo instrucciones de los técnicos de Consellería de Medio Ambiente, Aigua, Urbanisme i Habitatge de la Generalitat Valenciana todos aquellos pies de diámetro con corteza menor de 23 cm son susceptibles de ser considerados de forma íntegra como recurso bioenergético. Es decir todo el conjunto de la biomasa aérea de estos pies es considerado como BRF.

De esta forma las siguientes fracciones del árbol se incluirían en la definición de BRF:

- Fuste
- Ramas de diámetro mayor de 7 cm
- Ramas de diámetro comprendido entre 2 y 7 cm
- Ramillas de diámetro menor de 2 cm
- Hojas o acículas

En el caso del aprovechamiento de los pies menores se considera BRF al conjunto de la biomasa aérea.

Siguiendo la metodología explicada para la determinación de la biomasa forestal arbórea existente en la Provincia de Valencia se aplican estos porcentajes a cada una de las teselas de las especies seleccionadas teniendo en cuenta el porcentaje que ocupa el latizal y fustal en cada una de ellas (ver Anexo 1). Con el objetivo de prevenir la erosión, no se aprovechará la biomasa forestal de aquellos estratos con fracción de cabida cubierta (FCC) <20%. Así mismo, desde el punto de vista conservador tampoco se consideran aprovechables los estratos de monte bravo o regenerado. De esta forma se obtienen las existencias en toneladas de BRF en el territorio de la Provincia de Valencia.

### ***3.1.3. Metodología para estimación de potencial de biomasa forestal y agrícola residual***

#### ***3.1.3.1. Cuantificación de posibilidad anual de biomasa forestal residual***

##### **a) Cuantificación de posibilidad potencial de aprovechamiento**

Para la planificación sostenible del aprovechamiento de la biomasa forestal residual, es necesario determinar la posibilidad de extracción de biomasa. La metodología seguida para esta estimación es paralela a la definida por FESERMAGA (2003), donde:

$$P = (E/T) + (CC/2)$$

siendo,

P, posibilidad (t/año)

E, existencias (t)

T, turno de corta (años)

CC, crecimiento corriente anual (t/año).

Consideraciones previas tenidas en cuenta:

Siguiendo la metodología señalada, la definición de BRF, y en concordancia con la estimación de la biomasa forestal existente en la Provincia de Valencia, los estratos empleados para dicho cálculo serán los definidos por el IFN3 excluyendo los siguientes:

- los estratos en los que entre las especies principales no aparezcan ni *Pinus* ni *Quercus ilex* o *faginea*, es decir, aquéllas consideradas como aprovechables.
- Los estratos de monte bravo o regenerado.
- Los estratos con Fcc <20%.
- Los estratos de matorral.

Los turnos determinados para el cálculo se han establecido en función de la especie y el estrato, además de las siguientes consideraciones:

- Los turnos de los pinares mediterráneos (carrasco, piñonero y resinero) serán constantes de 80 años (PGOF 2002).
- Los turnos de los pinares de montaña (laricio y silvestre) serán constantes de 140 años (PGOF 2002).
- Los *Quercus* presentan un turno constante de 150 años (Serrada et al. 2008).
- Se emplearán turnos conservadores.

### **b) Cuantificación de posibilidad real de aprovechamiento**

Después del cálculo de la posibilidad de la biomasa residual forestal en la Provincia de Valencia, es necesario aplicar una serie de restricciones teniendo en cuenta las diferentes limitaciones

existentes en el territorio que hacen insostenible su extracción, ya sea por cuestiones medioambientales, técnicas o de viabilidad económica. Estas restricciones se aplican mediante datos georeferenciados a través de un sistema SIG.

Así, se definen las siguientes restricciones consideradas:

a. Pendiente del terreno

La pendiente es una restricción que se aplica en función del riesgo de erosión y de la difícil accesibilidad. Hay diversas fuentes con criterios muy similares (Garañeda y Bengoa 2005, MARM 2007). Sin embargo, debido a las características de los terrenos forestales de la Provincia de Valencia y apoyándose en los valores de referencia ofrecidos por IDAE et al. (2011), se ha determinado los factores de intensidad de aprovechamiento que se especifican en la Tabla 15.

**Tabla 15. Factor de intensidad de aprovechamiento en función de la pendiente. Fuente: elaboración propia.**

<b>Pendiente</b>	<b>Intensidad aprovechamiento</b>
<12,5%	80%
12,5 - 25 %	60%
25 - 30%	20%
>35%	0%

b. Existencia de figuras de protección (Espacios Naturales Protegidos)

Se aplica un filtro que incluye las diferentes figuras de protección existentes en el territorio que por sus características no permitan la extracción de biomasa. Habitualmente este tipo de restricción se aplica de forma general a los Parques Nacionales, sin embargo aunque en la Provincia de Valencia no se encuentra ningún Parque Nacional, se toma en consideración aplicar esta restricción a zonas de especial interés como las microreservas, zonas de anidación, etc.

c. Usos no aprovechables

Se excluyen las siguientes zonas:

1. parques periurbanos
2. mosaico arbolado o desarbolado sobre cultivo o matorral
3. áreas recreativas
4. arbolados fuera del monte

5. monte bajo sin vegetación superior
6. áreas cortafuegos

La metodología de trabajo a seguir para la aplicación de estas restricciones asociadas al territorio es la siguiente: la cantidad de biomasa forestal considerable como recurso energético está georeferenciada a la unidad básica de la tesela. Para tener en cuenta las restricciones que se han de aplicar con el fin de obtener el potencial real de aprovechamiento se han de superponer los distintos filtros de pendiente del terreno, figuras de protección y usos del suelo. Como resultado se generará una base de datos y un mapa que presenta el potencial de aprovechamiento energético de la biomasa residual forestal para todo el territorio de la Provincia de Valencia.

#### **3.1.3.2. Cuantificación de las existencias y posibilidad de biomasa agrícola residual**

Se entiende como Biomasa Residual Agrícola (BRA), aquellos residuos generados a partir del aprovechamiento de los cultivos. En función del tipo de cultivo, estos residuos pueden ser herbáceos o bien leñosos, y pueden generarse de forma anual o cada cierto período de tiempo en función de las necesidades y características de cada uno de los cultivos.

La Comunitat Valenciana cuenta con gran diversidad y tipologías de cultivos agrícolas. Sin embargo, desde un punto de vista de una planificación integral del aprovechamiento biomásico, se ha determinado tener en cuenta exclusivamente cultivos agrícolas leñosos, debido a las siguientes razones:

1. Se considera necesario un aprovechamiento integral de los recursos, por lo que los materiales forestales y agrícolas deben ser leñosos.
2. La mayor parte de la superficie agrícola que linda con terrenos forestales corresponde a cultivos leñosos de secano principalmente (olivo, almendro y vid) o en ocasiones a cítricos.
3. Este tipo de cultivos genera anualmente residuos derivados de sus cuidados culturales, que de forma habitual quedan abandonados en el campo en el momento de las cosechas o de la realización de podas para ser quemados posteriormente in situ. Debido a la prevención de incendios conviene extraer este tipo de residuos lo antes posible y evitar la quema del material in situ.



Actualmente en la Provincia de Valencia no existen superficies relevantes de cultivos energéticos leñosos. Es por este motivo por el que únicamente se consideran residuos derivados de cultivos leñosos como el olivo, el almendro, los cítricos, etc.

Para la estimación de la BRA generada por los cultivos leñosos en le Provincia de Valencia se pueden utilizar diferentes metodologías basadas tanto en la producción anual de cada tipo de cultivo como en la superficie productiva ocupada por cada uno de estos.

La selección de la metodología a utilizar se ha realizado a partir del nivel de detalle de los datos disponibles. En este caso la información ha sido proporcionada por la Consellería d'Agricultura, Pesca i Alimentació de la Generalitat Valenciana. Los datos corresponden al ejercicio de 2008, los más actualizados hasta el momento. El máximo nivel de detalle del que se dispone es la superficie ocupada por cada uno de los cultivos de interés en cada uno de los municipios de la Provincia de Valencia. Por lo tanto, la metodología seleccionada es aquella que calcula la cantidad de residuos generados por superficie productiva, es decir, las toneladas de residuos generadas por hectárea.

Esta metodología se basa en la aplicación de unos coeficientes de generación de residuos sobre la superficie productiva de cada uno de los cultivos de interés definidos (almendro, cítricos, olivo y vid) basados en modelos que integran cuidados culturales tipo para cada una de las especies.

Para la selección de los coeficientes a aplicar se ha realizado una consulta bibliográfica buscando aquellas publicaciones en las que se definen los cultivos que se adaptan más a la realidad que se da en la Provincia de Valencia. Finalmente, se ha obtenido un valor medio de coeficiente para cada cultivo y se han determinado los resultados de ésta como los coeficientes finales para la estimación de la cantidad de residuos generados por los cultivos agrícolas leñosos de la Provincia de Valencia, tal como se muestra en la Tabla 16.

**Tabla 16. Ratio residuos superficie y año de los principales cultivos leñosos de la Provincia de Valencia a la humedad indicada (%H) según los distintos autores.**

	Días y Azevedo (2000)	Di Blasi al.(1997)	et Voivontas et al. (2001)	ASINEL (1992)	Selección
<b>Olivo</b>	0,6 (35)	1,7 (40)	2,8 (35)	1,7 (40)	1,7 (40)
<b>Almendro</b>	1,1(35)	1,7 (40)	6,2 (40)	-	3,0 (40)
<b>Viña</b>	3,9(35)	2,9 (50)	6,2 (45)	3,5 (40)	4,1 (40)
<b>Cítricos</b>	-	-	-	2 (40)	2 (40)

### 3.1.4. Metodología para identificación de las zonas de gestión

A continuación se define la metodología seguida para la identificación de la zonificación del territorio en áreas autosuficientes en cuanto a abastecimiento de biomasa para el aprovechamiento energético teniendo en cuenta los requerimientos biomásicos mínimos de una planta de valorización energética. En este caso se ha considerado una planta de fabricación de pellets de una capacidad de procesamiento anual de en torno a 8.000 t de biomasa.

#### 3.1.4.1. Análisis previo de las condiciones básicas de suministro

Los principales criterios e indicadores a tener en cuenta para la identificación de zonas de gestión homogéneas son los enumerados en la Tabla 17.

Tabla 17. Criterios e indicadores de zonificación

Orden de prioridad	Criterios	Indicadores
1	Especies aprovechables	1. <i>Pinus halepensis</i> 2. <i>Pinus pinaster</i> 3. <i>Pinus nigra</i> 4. <i>Pinus sylvestris</i> 5. <i>Pinus pinea</i> 6. <i>Quercus ilex</i> 7. <i>Quercus faginea</i>
2	Pendiente	Pdte <12,5 % 80% de la biomasa real 12,5 % <Pdte < 25% 60% de la biomasa real Pdte >25 % 20% de la biomasa real Pdte >35 % 0% de la biomasa real
3	Figuras de protección	Presencia de microrreservas
4	Distancia a central de suministro	Radio $\leq$ 15 km
5	Disponibilidad de BRA	A determinar en función de las existencias de BRF de cada unidad de gestión y como complemento. En determinados casos puede ser decisiva para la viabilidad del aprovechamiento.

#### 1. Especies aprovechables

El principal criterio de selección es la superficie ocupada por las especies susceptibles de aprovechamiento, siendo *Pinus halepensis* la especie predominante. Además, toda la

tecnología existente, especialmente para el astillado y también para el molido y extrusión de biocombustibles sólidos está basada en especies de coníferas.

## 2. Pendiente del terreno

La pendiente del terreno es la variable de mayor importancia para los trabajos forestales. Esto se debe a que de ésta depende el grado de mecanización que pueda aplicarse, los rendimientos de trabajo y por tanto la rentabilidad del aprovechamiento. Sin embargo, los indicadores seleccionados para esta variable dependen principalmente de criterios ambientales, protección del suelo (disminuir riesgos de erosión y compactación) y lixiviación de nutrientes. Para los cálculos de la potencialidad de suministro de las zonas a identificar, se han aplicado los factores correctores especificados en la Tabla 15.

## 3. Figuras de protección

Se excluyen como zonas aprovechables aquéllas en las que prevalece la protección y conservación sobre el aprovechamiento biomásico. En aquellas unidades de superficie en las que existen microrreservas se excluirá la superficie correspondiente a esta unidad de protección.

## 4. Distancia a la central de suministro

Este es un criterio de especial importancia tanto desde el punto de vista de la rentabilidad económica del aprovechamiento y la logística de aprovisionamiento como por viabilidad medioambiental por balances de carbono (energía necesaria generalmente de fuentes no renovables para el suministro de biomasa a la planta de transformación).

Para la identificación de las zonas, pero también para la ubicación de las plantas y para el propio sistema de gestión, hay que tener en cuenta que las plantas de transformación energética deben estar cerca de donde se realiza el aprovechamiento, tal como sucede con todas las industrias forestales de transformación primaria, donde el mayor coste logístico lo produce el abastecimiento de la materia prima, siendo absorbido el coste de distribución por el valor añadido de los productos.

En un análisis conjunto entre AIDIMA y la Universidad Politécnica de Madrid y basado en las experiencias de Tolosana et al. (2009) para situaciones medias de las masas forestales del interior de la Provincia de Valencia, se concluye que en aprovechamiento en fustales en montes de difícil acceso el tractor autocargador es el más rentable en los primeros 5 km. Sin embargo, hasta los 15 km de distancia lo más rentable es un camión rígido que transporte la biomasa bruta sin astillar. En cambio, en aprovechamientos de árboles completos en latizales lo más rentable es el transporte de la biomasa bruta en un camión con remolque de 50 m<sup>3</sup> los primeros 15 km, y a partir de ahí el transporte en

forma de astilla en camiones de mayor capacidad. Es por ello que, en tanto y cuanto se de sobre el territorio la cantidad de biomasa forestal y agrícola residual necesaria para abastecer una posible planta de pellets, se considera idóneo un radio de acción aproximado que no supere de 15 kilómetros y se utiliza este radio como apoyo para la delimitación de la zona de gestión.

#### 5. Disponibilidad de BRA

La disponibilidad de BRA lignocelulósica tiene un gran interés desde el punto de vista del aprovechamiento integral de los recursos biomásicos, complementando la BRF. El radio de aprovisionamiento también se ha limitado a los 15 kilómetros para la zona de gestión, por razones de costes (cantidades de acopio y accesibilidad) y, principalmente, por balances de carbono.

#### 6. Estacionalidad del suministro

Los trabajos forestales, tanto de aprovechamientos como de tratamientos selvícolas, se concentran generalmente en los meses desde octubre hasta mayo, siendo éste el periodo del año con el suministro directo de la BRF a la planta. En el caso de la BRA las podas también se concentran en invierno, mientras que los arranques no se ciñen a un periodo determinado. El acopio de materia prima para el trabajo en los meses de junio a septiembre es necesario. Sin embargo, la necesidad de secado al aire de la astilla hace perfectamente viable el almacenaje de materia prima en la planta.

#### **3.1.4.2. Análisis previo para la identificación de zonas de suministro en base al potencial a nivel municipal**

Con el fin de poder realizar un análisis previo a la toma de decisiones finales para la definición de las zonas de gestión y la ubicación de las plantas, se evalúa el potencial de los diferentes municipios y para obtener una visión general de la distribución espacial del potencial real de suministro de BRF (complementada con BRA) en la Provincia de Valencia. Para ello se ha seguido los siguientes pasos:

1. Cantidad de BRF disponible para cada uno de los municipios de la Provincia de Valencia. Distribución en el mapa.

En un primer análisis se calcula la posibilidad potencial total en base a los filtros de especies, fracciones y pendiente establecidos en la metodología para cada una de las teselas en todo el territorio de la Provincia de Valencia. Para poder tener una primera

visión espacial de conjunto y con el fin último de identificar zonas de gestión y ubicación de plantas en municipios centrados en la zona y con buenos accesos, se ha procedido a agrupar las teselas en sus correspondientes municipios.

Aunque en la zonificación la posibilidad total por municipio, su tamaño podría llevar a desvirtuar el análisis, esta primera evaluación da una visión muy clara de la distribución de la potencialidad real de suministro de BRF en el conjunto del territorio de la Provincia de Valencia.

Se estiman plantas de elaboración de biocombustibles sólidos con unas necesidades mínimas aproximadas de 8.000 t/año de astillas para la fabricación de pellets. En función de este criterio y teniendo en cuenta la distribución de la BRF en la Provincia de Valencia, se han seleccionado en primer lugar como municipios de interés aquellos que tienen un potencial de BRF de más de 1.000 t/año.

2. Determinación de las zonas de mayor interés desde un punto de vista del aprovechamiento de la BRF. Agrupación municipal.

Una vez visto este primer análisis, como segundo paso para la definición de zonas de gestión se ha determinado que el potencial anual de BRF a nivel comarcal (es decir, de los municipios de la misma zona) sea mayor de 8.000 t. Esto genera una visión general del apoyo que pueden recibir estos municipios por el suministro de BRF de los otros municipios de su zona.

3. Aportación de la BRA como recurso energético complementario para las zonas seleccionadas.

Como tercer y último criterio para identificar de forma general a nivel municipal las principales zonas de posibilidad real de abastecimiento directo, se ha determinado que el potencial de BRA a nivel municipal sea de más de 3.000 t/año para permitir un apoyo del suministro de BRA a la planta.

De esta forma,

- Municipios de muy alta potencialidad serán aquellos en que cumplan:

BRF > 1.000 t/año  
BRF comarcal > 8.000 t/año  
BRA > 3.000 t/año

- Municipios de alta potencialidad serán aquellos en que:

BRF > 1.000 t/año  
BRF comarcal > 8.000 t/año

- Municipios de media potencialidad serán aquellos en que:

$$\text{BRF} > 1.000 \text{ t/año}$$

#### **3.1.4.3. Identificación de zonas de suministro y propuesta de ubicación unidades de valorización energética**

Una vez realizados los análisis previos de las condiciones básicas del suministro y de la distribución real de potencialidad de suministro a nivel municipal en el conjunto del territorio de la Provincia de Valencia, para la identificación de las zonas de gestión se ha integrado en la toma de decisiones el parámetro decisivo de la aplicación de una radio aproximado de aprovechamiento y suministro a planta de 15 kilómetros.

Así, una vez seleccionados los municipios de mayor potencial se han establecido sobre el mapa radios de acción aproximados de 15 kilómetros que permitan la viabilidad del aprovechamiento de la biomasa desde el punto de vista económico y medioambiental. A partir del análisis de éstos, se ha determinado de modo aproximado el mejor municipio para la localización de las plantas de biomasa en cada una de las zonas teniendo en cuenta criterios de distribución de la biomasa a nivel municipal/comarcal, de comunicación vial entre municipios, de orografía en la zona y, por ende, de racionalidad de los transportes hasta la planta.

#### **3.1.5. Definición de directrices básicas de gestión de biomasa forestal en zonas prioritarias**

Tras la identificación de las zonas y la posible ubicación de las plantas de valorización se trató de establecer una serie de recomendaciones técnicas que propiciaran una gestión integral del aprovechamiento de la biomasa, transformación y uso de bioenergía en base a BRF para cada unidad de gestión.

Para ello, se estableció un grupo de trabajo formado por técnicos del área de biomasa de VAERSA y de AIDIMA a través del cual se llevó a cabo una lluvia de ideas (*brainstorming*) sobre posibles directrices básicas generales para el aprovechamiento de biomasa, que luego se concretó a través de recomendaciones técnicas realizadas por expertos en el sector de la bioenergía de la Comunitat Valenciana (empresas forestales, municipios forestales, técnicos forestales de Conselleria, fabricantes de pellets, técnicos de AIDIMA, etc.) a los que se consultó.

Las directrices básicas se enmarcaron dentro de cada uno de los componentes de la cadena de valor de la biomasa. La estructura del análisis fue la siguiente:

1. Planificación del suministro de BRF y BRA:
  - a) Proyecto de ordenación forestal de la zona
  - b) Planificación del suministro de BRF a la planta
  - c) Inventariación de la BRA y clasificación de recursos
  - d) Planificación de suministro de BRA a la planta
  
2. Aprovechamiento de la BRF y de la BRA
  - a) Análisis previo al aprovechamiento de la BRF en la zona de gestión
  - b) Planificación técnica anual del aprovechamiento de la BRF
  - c) Análisis previo al aprovechamiento de la BRA en la zona de gestión y planificación técnica anual del aprovechamiento de la BRA
  
3. Logística de aprovisionamiento de la materia prima
  - a) Análisis previo a la logística y transporte de la BRF
  - b) Preparación y dimensionamiento de cargaderos en monte
  - c) Transporte de BRF a planta
  - d) Transporte de BRA a planta
  
4. Transformación energética en planta
  - a) Integración de facilidades instaladas en zonas de gestión definidas
  - b) Diseño y ejecución del proyecto de planta industrial de pellet
  - c) Diseño y ejecución del proyecto de planta industrial de astillas para generación térmica/eléctrica
  
5. Distribución y uso de la energía a nivel local/comarcal
  - a) Sustitución de calderas de diésel por calderas de pellets a nivel local/comarcal

- b) Diseño de un sistema de distribución de pellets a nivel local/comarcal y a mercados mayores
- c) Servicio integral de aprovisionamiento energético a infraestructuras locales

Una vez consultados los actores y agrupadas las respuestas, se reenviaron formularios con todas las recomendaciones técnicas para cada apartado a los distintos actores y se les pidió una valoración de cada una de ellas (acuerdo/en desacuerdo, motivos y propuesta alternativa en caso de desacuerdo).

Una vez analizadas las respuestas se elaboró el modelo de directrices de gestión para las zonas identificadas.



## 3.2. Selección de parcelas representativas

Tras los trabajos de planificación, el siguiente objetivo metodológico ha sido el de seleccionar para los posteriores trabajos de aprovechamientos biomásicos parcelas de estudio lo más representativas posibles de la realidad forestal de la provincia de Valencia.

La masa forestal de la Comunitat Valenciana se encuentra definida a través de los parámetros recogidos por el Inventario Forestal Nacional (IFN3 2008). En él se clasifican las distintas formaciones boscosas según estratos forestales. Concretamente existen 11 estratos definidos en la Provincia. Cada una de las teselas forestales se clasifica según un estrato forestal.

Cada uno de estos estratos presenta una homogeneidad en cuanto a tipo de masa (ver Tabla 9), pero una gran variabilidad de parámetros biométricos como la cantidad de biomasa existente en ellos o la posibilidad de biomasa potencial y de parámetros fisiográficos como pendiente media, altitud y orientación, etc. Es por ello que para encontrar parcelas representativas se han de definir valores medios de los principales parámetros biométricos y fisiográficos para cada estrato.

La Figura 23 muestra de forma esquemática la metodología seguida para la selección de las parcelas de estudio.

Todas las teselas de cada estrato se han caracterizado a través de capas georeferenciadas mediante sistemas de información geográfica (SIG) con:

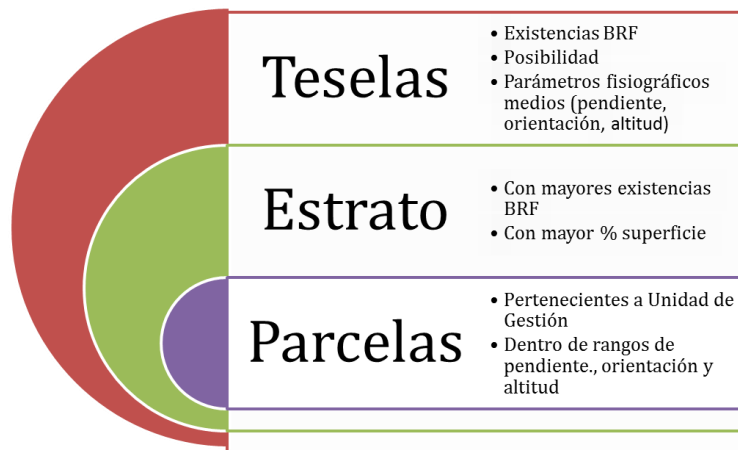
- a) Existencia media de biomasa en cada tesela
- b) Posibilidad media de biomasa en cada tesela
- c) Pendiente media de las teselas
- d) Altitud media
- e) Orientación media

Una vez caracterizados los estratos se ha elegido como más representativo el estrato que cumpla con dos criterios de selección:

- 1º mayor superficie forestal dentro de la Provincia de Valencia y
- 2º el que mayores existencias de biomasa presente.

Una vez elegido el estrato, se han identificado parcelas dentro de una de las unidades de gestión de biomasa propuestas para cumplir con los criterios de autoabastecimiento y gestión integral de biomasa que las definieron.

Por último, de entre todas las parcelas posibles, se han elegido aquellas que cumplan con los rangos representativos de pendiente, altitud y orientación media del estrato más representativo de la Provincia de Valencia.



**Figura 23. Metodología para la selección de parcelas representativas. Fuente: elaboración propia.**

### 3.3. Análisis de sistemas optimizados de aprovechamiento y logística

Según Schneider et al. (2001) el estudio del aprovechamiento de los residuos forestales para su valorización energética comprende seis fases fundamentales:

1. Valoración de la biomasa residual procedente de los aprovechamientos forestales (y de la industria de transformación en su caso).
2. Estudio de las técnicas de recogida, selección y acopio adaptadas al medio forestal.
3. Caracterización de los residuos en sus diferentes fracciones.
4. Evaluación económica, dado que el aprovechamiento energético de los residuos debe compensar el coste económico de su retirada del monte.
5. Balance energético: La extracción de biomasa supone un consumo para energía en el uso de maquinaria (especialmente combustibles fósiles). Debe evaluarse el balance de energía obtenido por la combustión de cada tipo de residuo.
6. Evaluación del impacto ambiental vinculado a la recogida a los restos de corta.

Tomando estas directrices metodológicas como referencia, la presente investigación pretende aplicar estas fases de estudio centradas en la logística interna del aprovechamiento forestal sobre el tipo de masa forestal más representativa en cuanto a área de entorno al 34% (117.700 ha) del territorio forestal de la Comunitat Valenciana: latizal alto de *Pinus halepensis*. Más concretamente, sobre una parcela de 5,65 ha de latizal alto, representativa del tipo de monte clasificado como estrato 2 de la provincia de Valencia según el Inventario Forestal Nacional (IFN3 2008).

Se pretende comparar la rentabilidad económica, el impacto medioambiental, el balance energético y la calidad de biocombustibles obtenidos según dos sistemas de aprovechamiento para la realización de una clara por lo bajo con el fin de realizar una mejora de la masa forestal y el aprovechamiento de biomasa para la obtención de biocombustibles sólidos. Se hace notar que los términos “sistemas optimizados” se refieren al aprovechamiento de la biomasa con fines puramente energéticos, objeto de esta tesis.

Los tratamientos a aplicar son los siguientes:

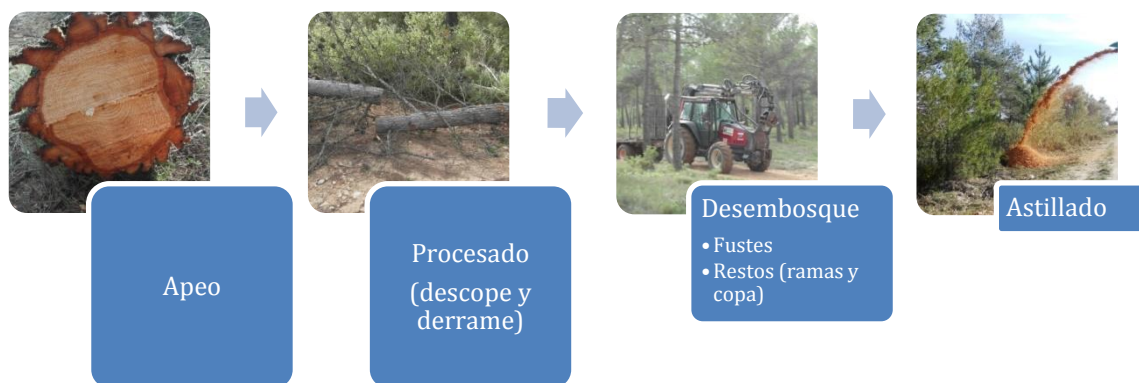
- **Sistema de aprovechamiento integrado de fuste y residuos forestales (Sistema A):** Apeo motor-manual selectivo, descope y derrame con motosierra, reunión y saca de fustes y ramas a zona de acopio mediante autocargador, astillado a pie de pista.

- **Sistema de aprovechamiento de árbol completo (Sistema B):** Apeo motor-manual selectivo de los pies hasta copa de luz con motosierra, reunión y saca a zona de acopio (cargadero) mediante autocargador, astillado a pie de pista.

El **sistema A**, generalmente conocido por **sistema integrado**, suele combinar un aprovechamiento de madera y de biomasa en función de los DAP y calidad de los pies, cuyo fuste, si es mayor de 20cm se destina al aprovechamiento maderero por desenrollo o si es menor o la calidad de los pies es baja, a astilla que bien se destina a la industria del tablero o bien al sector de la bioenergía. Cabe señalar que el destino final del material depende también de la proximidad del cliente, ya que en ocasiones la distancia y por consiguiente los costes de transporte, no se ven cubiertos por el mayor precio que se pueda pagar por la madera, o de manera contraria. Este sistema es fruto de la necesidad de obtener mayor rentabilidad económica a través de diferentes productos.

La Figura 24 muestra de forma esquemática las diferentes fases de apeo, desembosque y astillado con sus correspondientes operaciones.

En el presente caso, ambas fracciones se aprovecharán como bioenergía en forma de astillas. Se sigue llamando integrado porque se pretende obtener astillas de fuste y de restos por separado. Teóricamente, este sistema necesita de un procesado más exhaustivo de cada pie y por tanto una mayor dedicación en tiempo y mayor consumo de combustible por parte de la motosierra. Así mismo, el autocargador, bien durante la reunión o bien ya en cargadero, necesita dedicar un tiempo a la separación del material en distintas pilas para obtener distintas calidades de astilla.



**Figura 24. Secuencia de aprovechamiento mediante el sistema A. Fuente: elaboración propia.**

Al **sistema B**, generalmente conocido como de aprovechamiento de **árbol completo**, se le supone una mayor agilidad en el procesado y la saca revertirá en menores costes variables de los trabajos realizados y por tanto generará mayor rentabilidad a la empresa forestal.

La Figura 25 muestra de forma esquemática las diferentes fases de apeo, desembosque y astillado con sus correspondientes operaciones.

En este sistema, teóricamente los menores costes por menor trabajo de procesado compensarán la diferencia de ingresos producidos por la venta combinada de dos calidades de astilla con fines energéticos.



**Figura 25. Secuencia de aprovechamiento mediante el sistema B. Fuente: elaboración propia.**

### 3.3.1. Diseño experimental

El presente diseño experimental consiste en un estudio de tipo comparativo. Para ello la metodología empleada se ha basado en la metodología desarrollada en el proyecto colaborativo europeo COST Action FP-0902 (Magagnotti y Spinelli 2012) que trata de averiguar el efecto de factores fijos, en este caso dos sistemas operativos para el aprovechamiento de la biomasa que se diferencian en el método de procesado, que bien puede ser:

- Apeo, desramado y descope a la altura de cruz de copa (sistema A)
- Apeo de árbol completo hasta copa de luz (sistema B)

y en la separación de biomasa por autocargador, con

- Separación de fuste por una parte y ramas por otra en sistema A.
- Sin separación en sistema B.

Es decir, se pretende comparar si de cara al uso de la biomasa con fines bioenergéticos es mejor apear directamente el árbol completo para la obtención de astillas o apearlo y procesarlo para obtener dos tipos distintos de astillas (de fuste y ramas).

Se trata de un diseño factorial de un aprovechamiento con dos niveles para los cuales se va a realizar cuatro repeticiones de cada uno. Por tanto, se ensayarán ocho parcelas experimentales cuadrangulares de 0,25 ha, en las cuales, se realizarán dos sistemas de aprovechamiento diferenciados en el apeo y procesado de la biomasa (sistema A y sistema B).

Con este diseño experimental se pretende controlar las variables ruido de manera eficiente y lógica manteniendo un análisis lo más simple posible (ver apdo. 3.3.1.5.) El número de repeticiones por tratamiento se ha calculado según la fórmula de determinación del tamaño de muestra en estudios de aprovechamientos a nivel de ciclo completo (Murphy 2005). Se mantiene constante en número de repeticiones para cada tipo de tratamiento con el fin de mantener un diseño factorial equilibrado donde el número de repeticiones por tratamiento (N),

$$N = t^2 * \frac{\sigma}{(E * \mu / 100)^2}$$

donde,

t = Valor de la t de Student (t= 1,96 para un 95% de intervalo de confianza; t<sup>2</sup> = 3,842)

σ = varianza esperada para el tiempo del ciclo de trabajo

E = nivel de precisión requerido (5%,)

μ= media esperada para el tiempo del ciclo de trabajo

Siguiendo la fórmula de Murphy (2005), el número de repeticiones necesarias obtenidas para cada tratamiento es de cuatro repeticiones, considerando una media esperada de 300 min de trabajo de aprovechamiento para cada parcela y una varianza esperada de en torno a 60.

El mismo equipo de trabajo forestal con la misma maquinaria ha procedido a hacer ambos trabajos para eliminar la posible influencia del dominio de la maquinaria, modo de trabajar y experiencia previa del personal sobre los resultados en la zona de estudio.

#### **3.3.1.1. Definición de variables entrada (inputs)**

Se toman como entradas o inputs elementos característicos de los estudios de tiempo forestales (COST Action FP-0902 2012), concretamente:

- Tiempo consumido

- Energía consumida

Como input indirecto derivado de los anteriores se analizan y evalúan:

- Costes de explotación.

### **3.3.1.2. Definición de variables salida (outputs)**

En cuanto a las salidas u outputs característicos de los estudios de tiempo forestales esenciales para evaluar cualquier metodología de trabajo de campo o tecnología, estos se deben centrar tanto en cantidades como en calidades y son concretamente:

- Cantidad de producto: toneladas de biomasa
- Calidad del producto obtenido (biomasa)
- Calidad medioambiental : impactos medioambientales

Como outputs indirectos derivados de estos anteriores aparecen:

- Energía generada por unidad de biomasa
- Emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por los consumos de la maquinaria
- Emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas debido al efecto de sustitución de la biomasa con respecto a combustibles no renovables
- Precio de venta de las distintas fracciones de biomasa obtenidas (astillas de árbol completo, astillas de fuste y astillas de ramas)

A partir del estudio de la relación entre inputs y outputs se obtendrán los valores de las variables respuesta.

### **3.3.1.3. Definición de variables de procesado**

Como variable de procesado tenemos la variable o factor (ya que adopta valores discretos) “sistema de aprovechamiento” que toma dos niveles, A y B como se ha descrito anteriormente.

#### 3.3.1.4. *Definición de variables respuesta*

Son variables que relacionan los inputs y outputs del trabajo de campo y que servirán para evaluar el cumplimiento o no de las hipótesis nulas planteadas en el trabajo. Se trata de las variables rendimiento (*productivity*), rentabilidad económica, el balance energético y balance de CO<sub>2</sub>.

#### 3.3.1.5. *Control de variables ruido*

Existen numerosas variables influyentes sobre los resultados de las variables respuesta o efectos (*nuisance variables or effects*) que van a tratar de controlarse. Según COST Action FP-0902, estas variables pueden controlarse manteniéndolas sobre las mismas condiciones de estudio constantes (*constant keeping*), manteniendo la aleatoriedad de sus efectos (*randomization*) distribuyéndolos de manera aleatoria o bien mediante su inclusión en las variables de procesado y midiéndolas en las variables respuesta.

En el caso del presente estudio, las variables ruido controladas han sido las siguientes:

- **Homogeneidad de la masa forestal de las parcelas experimentales.** Con el fin de mantener y corroborar la homogeneidad de la masa forestal donde se realizará el estudio de tiempos, se distribuyeron en ella ocho inventarios forestales circulares de 15 m de radio. En base a estos resultados, replantean posteriormente parcelas de base cuadrada de 50m de lado, situadas aleatoriamente sobre la parcela de estudio. Para asegurar la homogeneidad de la masa se plantea en el apartado 3.3.3.3 un análisis estadístico que determine la existencia o no de diferencias significativas entre parcelas.
- **Asignación de tratamiento por parcela.** Para mantener las condiciones lo más constantes posibles en el estudio, la asignación a cada parcela de un sistema u otro de aprovechamiento se realizó de manera totalmente aleatoria (tomando 4 parcelas en que se aplica el sistema de aprovechamiento A y en 4 parcelas en que se aplica el sistema B).
- **Distancia a caminos y vías de acceso.** En la delimitación de las parcelas experimentales, se ha tenido en cuenta la red de caminos de acceso a las parcelas procurando compensar el efecto borde producido por una mayor accesibilidad de unas parcelas respecto a otras. Para ello, se estableció una distancia mínima de 5m a los caminos y se procuró que las parcelas no presentaran más de un lado paralelo a una vía de saca o camino ya creado. En los casos en que esto no fue posible, se asignaron tratamientos distintos a estas parcelas para poder obtener resultados comparables entre sí entre sistemas en estas condiciones.



- **Selección de los árboles a aprear.** Los criterios de selección de los árboles a aprear han sido los mismos para ambos sistemas, tratando de ajustarse a una clara por lo bajo para la mejora de una masa de latizal. La intensidad de corta y el marco de espaciamiento han sido los mismos para cada parcela y derivan del análisis de los datos de inventario, la calidad de estación y los objetivos del aprovechamiento forestal. Para asegurar la homogeneidad en intensidad de tratamiento se plantea en el apartado 3.3.3.3 un análisis estadístico que determine la existencia o no de diferencias significativas entre parcelas.
- **Desenvoltura, habilidad y experiencia de los operarios.** El equipo de operarios que ha trabajado sobre las parcelas ha sido el mismo para ambos sistemas de aprovechamiento tratando así de evitar la inclusión de diferencias en el *modus operandi* del motoserrista, operario de autocargador y de la astilladora.
- **Operatividad de la maquinaria.** Tanto la motosierra, el autocargador y la astilladora han sido los mismos para ambos tratamientos tratando de evitar de nuevo diferencias de funcionamiento, de consumos y número medio de incidencias o reparaciones necesarias por tipo de maquinaria.
- **Época del año y condiciones meteorológicas.** Para tratar de controlar la influencia de las condiciones climatológicas en el estado de la masa y en la operatividad de los trabajos se ha procedido a realizar los aprovechamientos de manera continua en el tiempo y aleatoria entre parcelas con distintos tratamientos a lo largo de la primera quincena del mes de noviembre de 2012.

### **3.3.2. Identificación y replanteo de las parcelas experimentales**

#### **3.3.2.1. Situación geográfica y descripción del medio físico**

La parcela forestal objeto de estudio se localiza en la Comunitat Valenciana, Provincia de Valencia, en el Término Municipal de Enguera, municipio perteneciente a la Comarca de la Canal de Navarrés. La parcela se ubica en el Monte de Utilidad Pública (MUP) V074 "Navalón", tal como se observa en las Figuras 26 y 27.



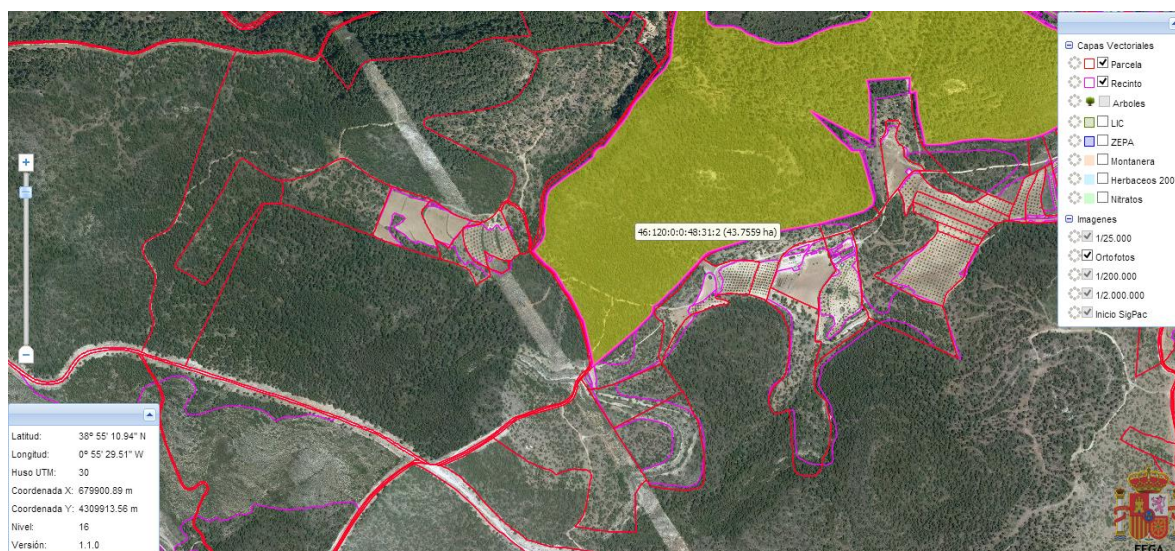


Figura 28. Ubicación del monte "Alto del Santich" en el MUP V 074. Fuente: SigPac (2012).



Figura 29. Ubicación de la parcela sobre la que se realizarán los trabajos de campo (MUP V 074, Navalón). Fuente: SigPac (2012).

El estudio se realiza sobre una masa de latizal alto monoespecífico de *Pinus halepensis* situada a 900m sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) procedente de regeneración artificial por siembra, realizada en 1950 tras un incendio, con un marco de plantación aproximado de 4x4 m donde surgieron muchos pies dobles. La masa tiene una edad de 63 años en el momento del estudio. Esta masa pertenece al estrato 2 de la Provincia de Valencia según el Inventario Forestal Nacional (IFN3 2008).

Información ampliada referente a enclavados, pertenencia, uso, disfrute y costumbres vecinales, geología y climatología de la zona de estudio viene recogida en el Anexo 3.

### 3.3.2.2. *Inventario forestal previo y determinación de la intensidad de corta*

#### a) Trabajo de campo

Se realizan ocho inventarios de área circular, cada uno de ellos de 15 m de radio dando lugar a inventarios de 706,5 m<sup>2</sup> cada uno para obtener datos de inventario de la masa. La intensidad del muestreo se fijó en 10% del total de la masa forestal a estudiar. Para la ubicación de estos inventarios se realizó un muestreo aleatorio simple en el total de la superficie de la parcela.

En cada inventario se miden:

- a) las clases diamétricas de los pies presentes,
- b) así como la altura del fuste hasta copa y altura total de cinco árboles de cada clase diamétrica para obtener la altura dominante.

Como materiales de campo se utilizaron un hipsómetro Vertex, con el que se midieron las alturas y el radio de área inventariada, y una forcípula con la que se midió los DAP de cada uno de los árboles en dos diámetros principales (Norte-Sur, Este-Oeste), tal como se muestra en la Figura 30. Se necesitó de un equipo de inventario formado por tres personas, una ingeniera de montes y dos estudiantes como personal de apoyo.



**Figura 30. Materiales utilizados durante el inventario forestal, hipsómetro Vertex y forcípula.**

Con el inventario se procede a tomar medición de los siguientes parámetros dendrométricos y dasométricos:

- a) Altura y DAP de los pies
- b) Número de pies por clase diamétrica
- c) Estimación de la fracción de cabida cubierta (Fcc)

Las Tablas 18 y 19 muestran los distintos parámetros de caracterización de la masa recogidos. Por otra parte, las Figuras 31 y 32 muestran gráficamente la distribución de los pies por clases diamétricas y las alturas respecto a los diámetros según los inventarios realizados.

**Tabla 18. Caracterización general de la masa.**

Área inventario (m <sup>2</sup> )	706,50
Área total inventariada (m <sup>2</sup> )	5652
Pies/ha	718
Fcc (%)	70

**Tabla 19. Caracterización de la masa en cuanto DAP.**

DAP medio (cm)	20,05
Error típico	0,66
Mediana (cm)	20,51
Desviación estándar	1,86
Varianza de la muestra	3,47
Curtosis	3,08
Coficiente de asimetría	-1,64
Rango	5,78
Mínimo (cm)	16,02
Máximo (cm)	21,80

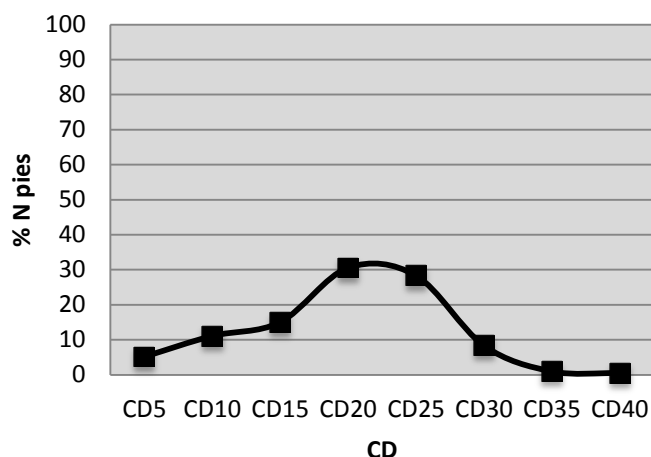


Figura 31. Distribución de número de pies por clase diamétrica (CD).

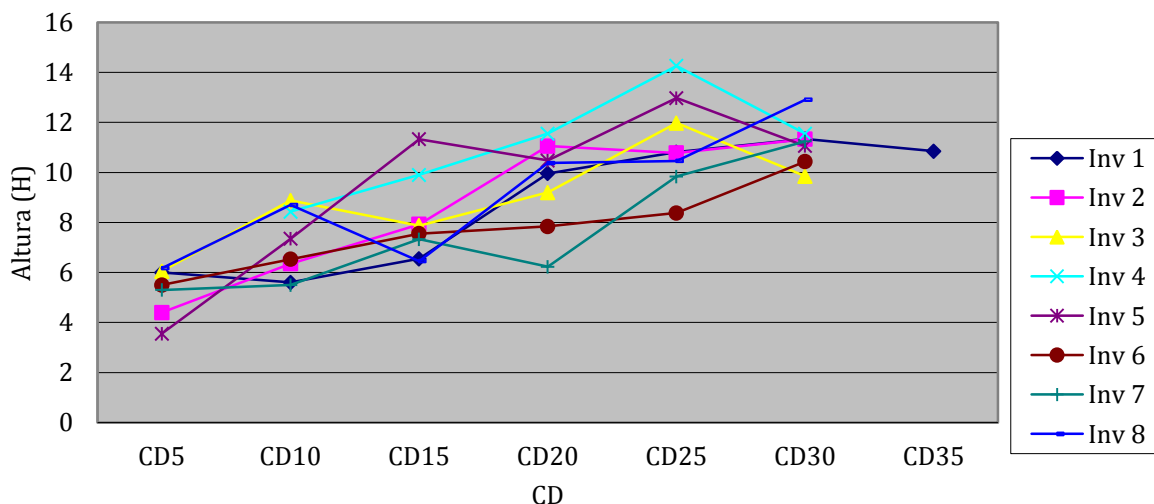


Figura 32. Distribución de alturas por clase diamétrica (CD).

**b) Trabajo de gabinete para la caracterización de la masa**

En gabinete, se procesan los datos de campo para determinar las características dasométricas de la masa:

- Área basimétrica (G)

El área basimétrica es el sumatorio de las áreas basales de todos los pies que componen la masa. Es una variable representativa que da una idea de la saturación de la masa en relación con los recursos la estación (Delgado et al. 2011).

En este caso en concreto se ha calculado a partir de las distribuciones diamétricas de frecuencias.

$$G = f_i * g_i \text{ (m}^2\text{/ha)}$$

donde,

$$g_i = \frac{\pi}{4} * d^2 \text{ (m}^2\text{)}$$

$f_i$  = Frecuencia, número de árboles por clase diamétrica en la superficie inventariada

El resultado de los dos parámetros nos dará el área basimétrica de la superficie ocupada por los inventarios, es decir, de 5620 m<sup>2</sup>, por lo que se extrapola para obtener el área basimétrica por hectárea.

- Densidad de la masa (N, número de pies/ha)

- Altura dominante (H<sub>0</sub>)

Siguiendo las instrucciones de Pardé (1961), se toman los diez valores más altos de altura inventariados dentro de la masa y se procede a calcular su media aritmética. El valor dado será considerado la altura dominante de la masa.

- Índice de Hart-Becking (S)

El índice de Hart-Becking nos da como resultado la relación entre el espaciamiento medio (a) de los árboles de una masa y la altura dominante (H<sub>0</sub>), se expresa en porcentaje (Delgado et al. 2011)

$$S = \frac{a}{H_0} * 100$$

donde,

$$a = \sqrt{\frac{20000}{N\sqrt{3}}}$$

siendo,

N= Número de pies por hectárea

H<sub>0</sub>= Altura dominante de la masa (m)

- Diámetro medio cuadrático ( $D_g$ )

El diámetro cuadrático medio es el diámetro del árbol medio de área basal igual al área media de la masa. Este diámetro tiene una gran importancia para estudiar la evolución de la masa, porque representa al árbol con un acceso medio a los recursos definidos por la ocupación del espacio, siempre que la masa esté en un estado de espesor (Delgado et al. 2011)

$$D_g = \sqrt{\frac{4}{\pi} * \frac{G}{N} * 100}$$

donde,

G= Área basimétrica ( $m^2/ha$ )

N= Número de pies

La información dasométrica obtenida en gabinete se especifica en la Tabla 20.

**Tabla 20. Caracterización dasométrica de la masa**

Área basimétrica (G, $m^2/ha$ )	25
Densidad de la masa (pies/ha)	718
Altura dominante ( $H_0$ , m)	14,2
Volumen ( $m^3/ha$ )	106,4
Índice de Hart-Becking (S)	28,2
Diámetro medio cuadrático ( $D_g$ , cm)	28
Volumen unitario ( $m^3/pie$ )	0,14

**c) Estimación de las toneladas de biomasa existente y del volumen maderable**

- Cuantificación de biomasa

Con el fin de determinar la biomasa existente en la masa forestal se procede a la estimación de toneladas de biomasa seca, fórmula desarrollada por Montero et al. (2005). Este modelo relaciona la biomasa seca total de alguna de las fracciones del árbol (kg) en función del DAP (cm) (Montero et al. 2005) y permite determinar el valor modular de la biomasa en pie el momento de estudio.

$$b = CF \cdot A \cdot d^b$$

En dicha fórmula el valor independiente es el diámetro normal,

donde,

$$A = e^a$$



d = DAP (cm)  
 CF= factor de corrección  
 a y b = parámetros de la ecuación

La fórmula proviene de una transformación logarítmica, esta transformación logarítmica introduce un sesgo en los cálculos (Baskerville 1972). Para la eliminación de este sesgo el resultado se multiplica por un factor de corrección (CF), calculado a partir del error estándar de la estimación (SEE). Este valor de corrección es calculado según la siguiente expresión (Sprugel 1983):

$$CF = e^{\frac{SEE^2}{2}}$$

Para el cálculo de la biomasa proveniente de *Pinus halepensis*. se adoptan los valores que se muestran en la Tabla 21.

**Tabla 21. Valor de los parámetros de la función (a y b), del error estándar de la estimación (SEE) para cada fracción de biomasa del *Pinus halepensis*. Fuente: Montero et al. (2005).**

Valores	Total aérea	Fuste	Ramas > 7cm	7cm >ramas>2cm	Ramas<2cm	Raiz
E	2,71	2,71	2,71	2,71	2,71	2,71
A	-2,09	-2,51	-9,55	-4,72	-2,74	-3,68
B	2,20	2,13	3,61	2,33	2,03	2,29
SEE	0,15	0,23	0,92	0,41	0,22	0,49
CF	1,01	1,02	1,53	1,08	1,02	1,13

De la totalidad de las fracciones de biomasa no se calcula la fracción raíz, puesto que no se pretende aprovechar, ni la biomasa total aérea, ya que se realizará el cálculo de forma más minuciosa tomando los datos del fuste y de las ramas.

Una vez conocidos los valores se aplica la fórmula anteriormente descrita, tomando la clase diamétrica como variable independiente, dando así valores unitarios para clases diamétricas 5, 10, 15, 20, 25, 30 y 35 (cm).

Al obtenerse el valor unitario de la biomasa por clase diamétrica, éste se multiplicará por el número de pies de cada una de las clases. Una vez obtenido ese valor, se extrapolará para conocer finalmente la biomasa en kilogramos de

materia seca disponible por hectárea (Kg/ha) en la masa forestal de estudio (ver Tabla 22).

Este parámetro sirve de manera tan sólo informativa al objeto del estudio.

**Tabla 22. Cuantificación de la biomasa aérea existente en la masa de estudio.**

CD (cm)	N pies	FUSTE		RAMAS >7 cm		2cm <RAMAS< 7cm		TOTAL BIOMASA
		Kg/pie	Kg/ha	Kg/pie	Kg/ha	Kg/pie	Kg/ha	Kg/ha
5	21	2,6	95,7	0,0	1,4	0,4	4,9	102,0
10	45	11,3	901,6	0,4	35,5	2,1	53,0	990,1
15	61	26,9	2.905,8	1,9	208,2	5,4	185,1	3.299,1
20	124	49,8	10.920,3	5,5	1.196,1	10,5	736,7	12.853,1
25	115	80,2	16.312,4	12,2	2.483,2	17,7	1.150,3	19.945,9
30	34	118,3	7.119,3	23,6	1.418,1	27,1	520,5	9.058,0
35	4	164,5	1.164,2	41,1	291,1	38,8	87,8	1.543,1
<b>TOTAL</b>	<b>404</b>		<b>39.419,3</b>		<b>5.633,6</b>		<b>2.738,4</b>	<b>47.791,3</b>

La masa forestal en que se realizarán los aprovechamientos cuenta con una biomasa aérea aproximada de 48 t/ha de bosque.

- Determinación del volumen maderable

En el caso del cálculo del volumen se siguen las “Supertarifas aplicables para obtener los valores de los cuatro parámetros dendrométricos característicos por especie, forma, cubicación y parámetro” disponibles en el Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3 2008) para la especie *Pinus halepensis* en la Provincia de Valencia, que da como resultado el volumen tanto con corteza como sin corteza en dm<sup>3</sup>.

Dentro del cálculo del volumen distinguimos entre volumen con corteza (VCC) y volumen sin corteza (VSC), cada cálculo dispone de sus propios parámetros y fórmula, además, se distinguen tres modelos distintos para cada volumen, según la calidad del árbol.

a) Volumen con corteza (VCC)

La fórmula a seguir para el cálculo del VCC (dm<sup>3</sup>) es la siguiente:

$$VCC = p * Dn * Ht$$

donde:

$p, q, r$  = Parámetros de la ecuación

$D_n$  = Diámetro normal (mm)

$H_t$  = Altura total (m)

Se toman valores unitarios para las clases diamétricas 5,10, 15, 20, 25, 30 y 35 cm, tomando su altura total la altura media de cada clase diamétrica, dicha altura media ha sido calculada previamente a partir de los datos tomados en el inventario de la masa.

Los valores de los parámetros de la ecuación varían según la forma de cubicación, según Figura 33.

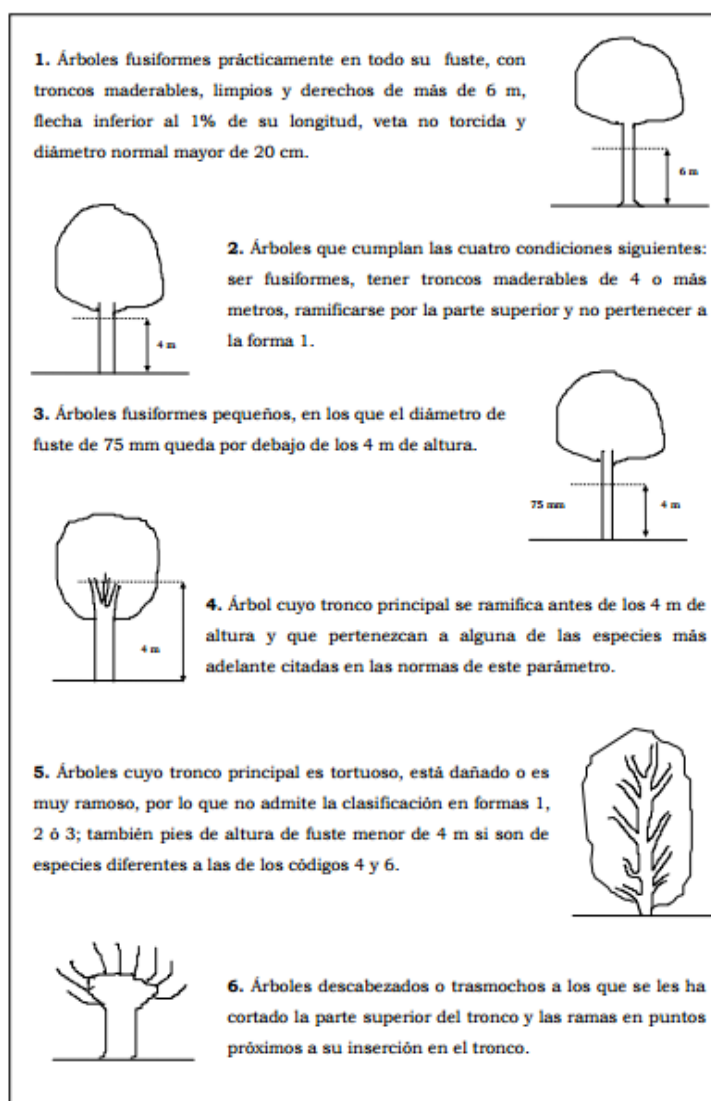


Figura 33. Definición de las forma de cubicación. Fuente: IFN3 (2008).

Para el caso del *Pinus halepensis*, las formas de cubicación posibles en la Provincia de Valencia son la 2, la 3 y la 5. En Anexo 4 se presentan los valores que adoptan los distintos parámetros de la función según estas formas de cubicación.

Se elige la forma de cubicación 2, ya que su definición es la que más se ajusta a las características de la masa y se cuantifica el volumen con corteza según muestra la Tabla 23.

Tabla 23. Cuantificación del volumen con corteza (VCC) en la masa de estudio.

CD (cm)	H (m)	VCC (dm <sup>3</sup> ) pie	N	VCC (m <sup>3</sup> ) total	VCC (m <sup>3</sup> /ha)
5	5,28	6,06	21	0,13	0,23
10	7,17	28,36	45	1,28	2,26
15	8,11	67,27	61	4,10	7,26
20	9,58	131,38	124	16,29	28,82
25	11,18	224,85	115	25,86	45,75
30	11,21	319,05	34	10,85	19,19
35	10,85	418,24	4	1,67	2,96
<b>TOTAL</b>		<b>1195,22</b>	<b>404</b>	<b>60,18</b>	<b>106,47</b>

## b) Volumen sin corteza (VSC)

A partir del cálculo del VCC se procede a calcular el VSC de la masa. Para el cálculo del VSC (dm<sup>3</sup>) se dispone de la siguiente fórmula:

$$VSC = a + b * VCC + c * VCC^2$$

dónde,

a, b y c = Parámetros de la ecuación

Siguiendo el procedimiento del cálculo del VCC, se tomarán valores unitarios para las clases diamétricas 5, 10, 15, 20, 25, 30 y 35 cm, tomando el resultado de su VCC como dato para esta nueva ecuación.

Los valores que adoptan los parámetros de la ecuación, de nuevo según la forma de cubicación se pueden encontrar en el Anexo 4.

Se elige la forma de cubicación 2, ya que su definición es la que más se ajusta a las características de la masa y se cuantifica el volumen sin corteza según muestra la Tabla 24.

**Tabla 24. Cuantificación del volumen sin corteza (VSC) en la masa de estudio.**

CD (cm)	H (m)	VSC (dm <sup>3</sup> ) pie	N	VSC (m <sup>3</sup> ) total	VSC (m <sup>3</sup> /ha)
5	5,28	4,30	21	0,09	0,16
10	7,17	15,28	45	0,69	1,22
15	8,11	45,67	61	2,79	4,93
20	9,58	96,01	124	11,90	21,06
25	11,18	169,97	115	19,55	34,58
30	11,21	245,20	34	8,34	14,75
35	10,85	325,17	4	1,30	2,30
<b>TOTAL</b>		<b>901,59</b>	<b>404</b>	<b>44,65</b>	<b>79,00</b>

**d) Método y criterios tomados para la determinación la intensidad de corta**

Para la determinación de la intensidad de corta, se ha procedido a la estimación de la calidad de estación para con ella poder aproximar las densidades de arbolado a las esperadas según las tablas de producción para la especie *Pinus halepensis*. El objetivo es realizar cortas fuertes por lo bajo debido a la densidad excesiva de la masa, dada su edad y a su estado selvícola mejorable. Cabe recordar que en la masa de estudio no se han producido aprovechamientos ni tratamientos selvícolas desde su siembra.

- Calidad de estación

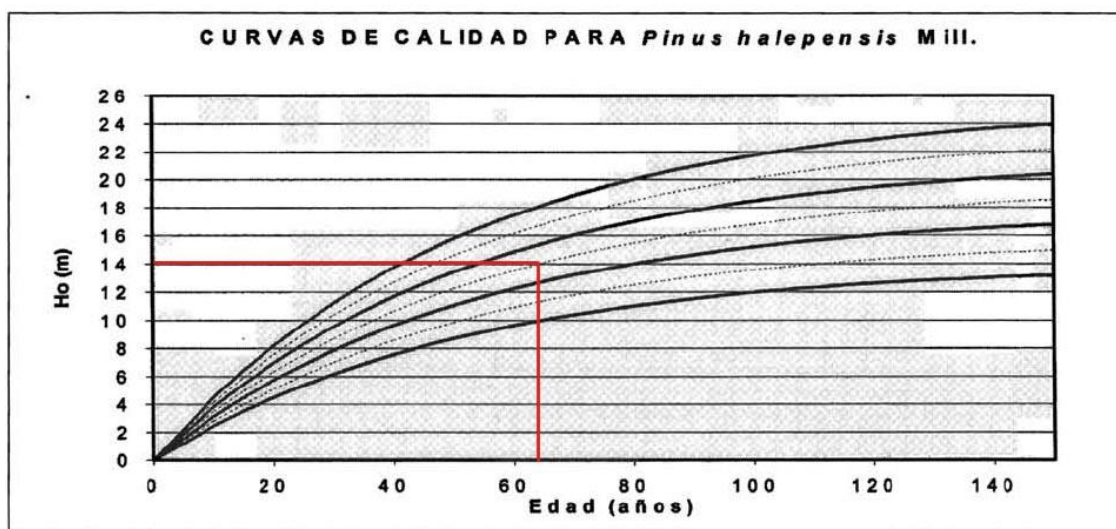
La relación altura-edad define la calidad de estación para cada especie forestal. Las calidades indican una escala cualitativa, posibilitando la comparación cuantitativa entre diferentes áreas de habitación de la misma especie (González Molina 2005).

Para el presente trabajo se tomarán las curvas de calidad realizadas por Montero et al. (2000) para *Pinus halepensis*, a partir de parcelas de tamaño variable situadas en diferentes regiones de España, entre ellas Valencia. Los estudios realizados para la obtención de estas curvas de calidad se realizaron a partir de 72 parcelas instaladas en 1965 pertenecientes al Departamento de Silvicultura del CIFOR-INIA, y fueron inventariadas en 1965-70-75-80-88 y 1999 (Montero et al. 2000).

A partir de los datos de alturas dominantes ( $H_0$ ) se construyen la curvas de calidad de estación aplicando el modelo de Richards (1959), ajustando las calidades a calidad 20, calidad 17, calidad 14 y calidad 11, dichas calidades

indican que a los 80 años las correspondientes alturas dominantes alcanzan la altura de 20, 17, 14 y 11 (Montero et al. 2000).

Conocida la altura dominante y la edad de la masa a estudiar (63 años), se estima la calidad de estación aproximada a partir de las curvas de calidad dadas (Figura 34).



**Figura 34. Curva de calidad de la masa de estudio. Fuente: elaboración propia a partir de Montero et al. (2000).**

Según la Figura 34, para una altura dominante ( $H_0$ ) de 14,20 m, teniendo en cuenta una edad aproximada de la masa de 63 años, la curva de calidad que más se ajusta es la correspondiente a la calidad de estación 17.

#### - Tablas de producción

Las tablas de producción sirven como guías teóricas orientativas a la hora de realizar el aprovechamiento, aunque cabe recordar que en campo los valores de masa extraída pueden cambiar debido a las necesidades selvícolas observadas por el técnico encargado del replanteo de las parcelas.

Se buscan tablas de referencia para la calidad resultante de masas de *Pinus halepensis* que puedan proporcionar una mejora del estado de la masa, sin olvidar el fin último de aprovechamiento biomásico sostenible.

**Tabla 25. Tabla de producción para *Pinus halepensis*, de calidad 17. Fuente: Montero et al. (2000).**

REGIMEN MODERADO DE CLARAS. CALIDAD 17																	
Edad (años)	MASA PRINCIPAL ANTES DE LA CLARA						MASA EXTRAIDA				MASA PRINCIPAL DESPUÉS DE LA CLARA				MASA TOTAL		
	H <sub>0</sub> (m)	N (pies/ha)	H <sub>g</sub> (m)	D <sub>g</sub> (cm)	G (m <sup>2</sup> /ha)	V (m <sup>3</sup> /ha)	N <sub>e</sub> (pies/ha)	D <sub>ge</sub> (cm)	G <sub>e</sub> (m <sup>2</sup> /ha)	V <sub>acum.</sub> (m <sup>3</sup> /ha)	N' (pies/ha)	D <sub>g</sub> ' (cm)	G' (m <sup>2</sup> /ha)	V' (m <sup>3</sup> /ha)	V <sub>T</sub> (m <sup>3</sup> /ha)	Im (m <sup>3</sup> /ha)	Ic (m <sup>3</sup> /ha)
20	6,9	1264	5,8	11,1	12,1	38,6	6	3,0	0,0	0,0	1258	11,1	12,1	38,6	38,6	1,9	-
30	9,5	1258	8,1	14,1	19,7	81,8	396	7,7	1,8	8,3	862	16,3	17,9	72,7	81,0	2,7	4,3
40	11,7	862	10,0	18,8	23,9	114,4	286	11,3	2,9	23,2	576	21,5	21,0	98,6	121,8	3,0	4,2
50	13,4	576	11,6	23,6	25,2	132,9	60	14,3	1,0	28,7	516	24,5	24,3	127,2	155,8	3,1	3,4
60	14,8	516	12,9	26,2	27,8	158,2	41	16,4	0,9	34,0	475	26,8	26,9	152,7	186,6	3,1	3,1
70	16,0	475	14,0	28,2	29,8	179,9	11	18,1	0,3	35,9	464	28,4	29,5	178,0	213,8	3,1	2,7
80	17,0	464	14,9	29,6	31,9	202,1	52	19,6	1,6	46,3	412	30,6	30,4	191,3	237,6	3,0	2,4
90	17,8	412	15,6	31,6	32,3	211,1	36	20,9	1,2	55,0	376	32,4	31,0	202,2	257,2	2,9	2,0
100	18,5	376	16,2	33,2	32,5	218,4	26	22,0	1,0	62,2	349	33,9	31,5	211,0	273,1	2,7	1,6
110	19,0	349	16,7	34,5	32,7	224,3	20	22,9	0,8	68,1	330	35,1	31,9	218,1	286,2	2,6	1,3
120	19,5	330	17,1	35,6	32,9	229,0	-	-	-	-	-	-	-	-	297,1	2,5	1,1

Tomando como referencia la tabla de producción “*Cortas fuertes por lo bajo en masas de Pinus halepensis de calidad 17*” propuesta por Montero et al. (2000) (Tabla 25), la gestión selvícola de la masa comenzaría a la edad de 20 años, siendo 120 años la edad de final de turno. Al tener la masa de estudio una edad de 63 años, se propone el mismo turno de 120, acumulando en la corta que se va a realizar las cortas selvícolas no realizadas a la edad actual.

Para ello, se pretende igualar el número de pies por hectárea en las parcelas de estudio al correspondiente a las tablas de producción tomadas como referencia, siendo el número de pies presentes casi el doble de lo que dictamina la gestión selvícola. Para ello se realiza una primera corta del 35% de los pies, siendo el número de pies de la masa remanente de 467 pies/ha, valor aproximado al de 475 pies/ha que se da en la tabla de producción de referencia. La intensidad en la corta respecto al área basimétrica inicial es del 26%.

### 3.3.2.3. Preparación de materiales y equipos

Para el replanteo de parcelas de aprovechamiento dentro de la masa de estudio y el marcaje de los árboles a apaar, se requirió de un equipo de una ingeniera de montes y dos estudiantes como personal de apoyo, con los siguientes materiales:

- a) Hipsómetro Vertex



- b) Cintas para delimitación de las parcelas
- c) Hacha y spray para marcado de árboles a apear
- d) Cinta métrica
- e) Cámara fotográfica
- f) Tablilla para la recogida de datos

Para el aprovechamiento de las parcelas se requirió de un equipo de operarios, formado por un motosierrista, un operario de autocargador y un operario de astilladora de la misma empresa forestal (Moixent Forestal S.L.). El capataz de la obra estuvo también dirigiendo los trabajos durante las primeras parcelas aprovechadas. Este equipo se mantuvo constante durante la duración de todo el aprovechamiento. Para el registro de tiempos y consumos, intervino un equipo de técnicos formado por dos ingenieros de montes y dos estudiantes que trabajaron en parejas alternadamente durante la toma de datos. Cuando los técnicos no pudieron estar presentes, los operarios facilitaron los tiempos de trabajo.

Como equipos para el aprovechamiento se utilizó la siguiente maquinaria:

- a) Motosierra STIHL modelo MS-261, de 2,8 CV de potencia (ver Figura 35)
- b) Autocargador VALTRA-HITRAF modelo A83, de 88 CV de potencia (ver Figura 36)
- c) Astilladora semimóvil STARK, modelo, SH4585, de 385CV de potencia (ver Figura 37)



**Figura 35. Motosierra STIHL MS-261.**



**Figura 36. Autocargador VALTRA-HITRAF A83.**



**Figura 37. Astilladora STARK SH4585.**

Para la toma de datos se utilizaron:

- a) Cronómetro
- b) Recipiente graduado en litros
- c) Higrómetro FS-3
- d) Bolsas para almacenaje de astillas

Como equipos de protección, los operarios llevaban el correspondiente equipo de protección individual completo (EPI), formado por casco de seguridad (con pantalla de protección y cascos para los oídos), guantes anticorte, chalecos reflectantes, botas de seguridad y pantalones anticorte.

#### **3.3.2.4. Delimitación y replanteo de parcelas experimentales**

Una vez estudiadas las características de la masa, los valores modulares de biomasa y volumen y el porcentaje de masa a extraer, se procede al replanteo de las parcelas experimentales donde se realizarán los trabajos de aprovechamiento, y a la determinación del tipo de aprovechamiento a realizar en cada una de ellas.

Así pues, se han ubicado por muestreo aleatorio simple sobre la masa, ocho parcelas cuadradas de 50m de lado, 2.500 m<sup>2</sup> de superficie cada una, superficie mínima necesaria de acuerdo con Brünig et al. (1980), dando una superficie total de aprovechamiento de dos hectáreas. La selección del tipo de aprovechamientos a realizar en cada parcela (sistema A o sistema B) es de tipo aleatoria.

Se ha pretendido reducir el efecto que la proximidad a las vías de saca o caminos pueda tener sobre los tiempos de aprovechamiento estableciendo una distancia mínima de 5m a los caminos y procurando que las parcelas no presentaran más de un lado paralelo a una vía de saca o camino ya creado.

Los criterios de selección de los árboles se mantuvieron constantes para todas las parcelas experimentales, ajustándose a una clara por lo bajo para la mejora de una masa de latizal. Tanto la intensidad de corta y el marco de espaciamiento han sido los mismos para cada parcela y derivan del análisis de los datos de inventario, la calidad de estación y los objetivos del aprovechamiento forestal.

Una vez replanteadas las parcelas se procedió al inventario de las mismas, el inventario se realiza con el objetivo de saber el número de pies exactos susceptibles de ser aprovechados, además nos proveerá de un conocimiento preciso de la biomasa y el volumen disponible a extraer.

En este segundo inventario se han realizado mediciones de DAP de todos los árboles existentes en cada una de las parcelas, se tomará la altura media por clase diamétrica calculada en el primer inventario como altura correspondiente a cada clase diamétrica.

Así mismo, durante el replanteo, se realizó una recogida de datos de variables de proceso determinadas por las características del medio físico que se expondrán en el próximo apartado.

Se delimitan sobre la masa, ocho parcelas cuadradas de 50m de lado, 2.500 m<sup>2</sup> dando una superficie total de aprovechamiento de dos hectáreas, una hectárea para cada tipo de sistema (ver Figura 38).



**Figura 38. Detalle de perímetro de una parcela en uno de sus ángulos.**

Su ubicación se ha realizado por muestreo aleatorio simple. La selección del tipo de aprovechamientos a realizar en cada parcela (sistema A o sistema B) es también tipo aleatoria.

La Figura 39 muestra la asignación de los tratamientos que fueron desarrollados en cada una de las parcelas de estudio.



**Figura 39. Delimitación y asignación de tratamientos por parcela (en rojo, parcelas con sistema A, integrado, en azul, sistema B, árbol completo).**

Para replantar cada una de estas parcelas se toman mediciones de diámetro normal (DAP) de todos los árboles existentes. Se asigna la altura media calculada en el primer inventario como altura correspondiente a cada clase diamétrica.

Así mismo, se realiza una selección de los árboles a aprear en cada una de las parcelas dejando un marco real de espaciamiento aproximado de 4,63 m. Debido a las características de la masa, procedente de una siembra de 2-3 semillas por hoyo, muchos pies eran dobles, es decir, surgían del mismo hoyo de siembra, por lo que se marcaron los pies sobrantes de menor

calidad (ver Figura 40). Igualmente, se procedió a cortar los árboles claramente dominados, muertos y enfermos como recomienda González Molina (2005), y aquéllos que no respetaban el espaciamiento establecido.



**Figura 40. Selección y marcado de árboles a aprear. A la izquierda: ejemplo de marcaje para la eliminación de pies dobles. A la derecha: ejemplo de marcaje para eliminación de árbol dominado.**

### ***3.3.3. Planificación y organización para el desarrollo de los aprovechamientos***

#### ***3.3.3.1. Condiciones de trabajo***

- **Organización de los trabajos**

Los trabajos se han organizado de la siguiente manera: un equipo de dos operarios, motoserriista y operario de autocargador, empiezan el aprovechamiento de las parcelas. El orden de aprovechamiento es aleatorio, procurando alternar sistema A

y B de manera sucesiva. Cuando el motoserrista termina con el apeo y procesado de los árboles señalados previamente por el equipo de investigadores, pasa a la siguiente parcela y el autocargador sigue sus pasos.



**Figura 41. Apeo manual con motosierra.**



**Figura 42. Sistema de integrado (sistema A).**



**Figura 43. Sistema de árbol completo (sistema B).**

El autocargador recoge con la pinza los fustes y ramas en el caso del sistema A y los árboles completos en el caso del sistema B (Figuras 42 y 43). Una vez repleta la capacidad de carga de su caja, ha de desplazarse hasta cargadero (a una distancia media de 778 m) siguiendo las vías y caminos de acceso (Ver Figuras 44 y 45).



**Figura 44. Carga del autocargador a la entrada de una parcela apeada.**



**Figura 45. Cargadero junto a pista forestal.**

Una vez en cargadero, el autocargador descarga la biomasa en una o dos pilas por parcela dependiendo si se trata de aprovechamiento mediante el sistema B que consistirá en una sola pila, o sistema A, que consistirá en una pila de fustes y otra de ramerío (ver Figuras 46 y 47).



**Figura 46. Acopio de ramas y fuste por separado procedentes del aprovechamiento mediante el sistema A.**



**Figura 47. Acopio de árbol completo en cargadero procedente del sistema B.**

Una vez descargado, el autocargador se dirige de nuevo a la zona de aprovechamiento y continúa la reunión y saca hasta haber recogido la totalidad de los árboles apeados. Tras ello, el autocargador se desplaza hasta la siguiente parcela.





**Figura 48. Transporte vacío del autocargador tras desembosque.**

El astillado se sucede de manera continua tras haber finalizado todos los aprovechamientos para evitar gastos de desplazamiento cada vez que se finalizaban los trabajos en una parcela experimental. Este se realiza en cargadero mediante una astilladora conectada a un camión (Figura 49). La astilladora se alimenta por una pinza que recoge cada uno de los restos de las pilas separadamente.



**Figura 49. Astillado en cargadero.**

La biomasa resultante en forma de astillas se agrupará en tres fracciones como muestra la Figura 50:

1. aquella procedente de fustes del aprovechamiento por el sistema A,
2. aquella procedente de las ramas,

3. biomasa procedente del aprovechamiento de árbol completo.



**Figura 50. Pilas de astillas según procedencia (de izquierda a derecha, astillas de fuste, astillas de rama y astillas de árbol completo).**

El equipo de trabajo consta de tres personas con dedicación completa (motoserrista, operario de autocargador y de astilladora) y capataz, que supervisa aleatoriamente la evolución de los trabajos. Todos ellos provistos del equipo de protección individual (EPI) y se hacen cumplir los protocolos de seguridad en el trabajo respetando distancias mínimas (ver Figura 51).



**Figura 51. Señalización de los trabajos en las pistas circundantes a la zona de aprovechamiento.**

- **Ejecución de los trabajos**

El orden de ejecución de los trabajos aprovechamiento de las parcelas ha sido el siguiente:

1. P8 (sistema B)
2. P7 (sistema A)
3. P3 (sistema A)
4. P4 (sistema B)
5. P5 (sistema B)
6. P6 (sistema A)
7. P2 (sistema B)
8. P1 (sistema A)

Los trabajos de apeo y desembosque duraron 5 días consecutivos de trabajo, iniciándose el 21 de noviembre y finalizando el día 26 de 2012. El astillado se realizó manera de continua tras dos semanas después de haber finalizado los aprovechamientos.

- **Condiciones del medio físico**

Se han tomado datos respecto a las condiciones climáticas durante los días de aprovechamiento para controlar la variación en los tiempos que estas pudieran ocasionar. Durante los días de aprovechamiento, las condiciones meteorológicas han sido constantes, de 6°C, salvo un día en que hubo lloviznas intermitentes.

Igualmente, se ha realizado una descripción del terreno, atendiendo a la clasificación del terreno realizada por Forestry Commission (1974) basada en *Swedish Terrain Classification System* (Skogsarbeten 1969) al ser una de las clasificaciones de las más ampliamente utilizadas en Escandinavia, Irlanda y Reino Unido (Forestry Commission 1995) para permitir la comparación de condiciones de trabajo forestales entre países. La descripción del terreno corresponde a un terreno 2.2.1, es decir, un suelo de condiciones buenas (suelos firmes minerales), con una rugosidad por presencia de obstáculos (piedras) moderada (en torno al 10-20% de

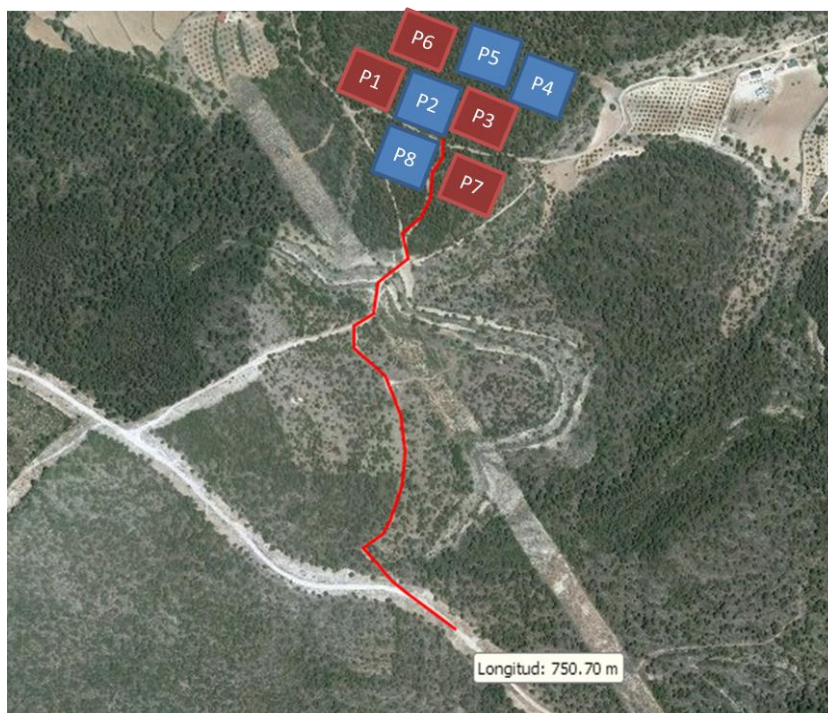
presencia sobre el total de la superficie) y una pendiente suave comprendida entre el 0-10%.

Concretamente las parcelas se sitúan en un área de pendiente media del 5%, con una pendiente máxima que alcanza el 15% en zonas puntuales.

La distancia natural media de desembosque y transporte a cargadero es de aproximadamente 778 m. La Tabla 26 muestra la distancia a cargadero y la pendiente para cada una de las parcelas. La Figura 52 muestra la situación del cargadero respecto a las parcelas de aprovechamiento.

**Tabla 26. Distancia de desembosque a cargadero de cada una de las parcelas experimentales.**

<b>Parcela</b>	<b>Distancia a cargadero (m)</b>	<b>Pendiente media (%)</b>
P1	850	10
P2	750	5
P3	750	5
P4	850	7
P5	825	5
P6	800	3
P7	700	3
P8	700	3



**Figura 52. Distancia natural media de desembosque hasta cargadero.**

La extracción se da en sentido ascendente, ya que el cargadero se encuentra a 20 m sobre la altitud en que se sitúan las parcelas.

### 3.3.3.2. *Toma de datos*

En este apartado se explica la metodología llevada a cabo para registrar los datos de campo en cuanto a tiempo, consumo, cantidad de biomasa y daños. En los trabajos de campo se toman los siguientes datos que se introducen directamente en la hoja de cálculo del ordenador portátil.

Cabe señalar que los resultados que se presentan en el correspondiente apartado de resultados (apartado 4.3.1. *Registros*) no incluyen análisis de los datos. Este análisis se llevará a cabo en el apartado 4.3.3. *Resultados comparativos* una vez realizadas las debidas consideraciones sobre homogeneidad de las parcelas e intensidad de aprovechamiento que permita comparaciones entre los sistemas.

#### **a) Durante los aprovechamientos: estudio de tiempos y consumos**

- Registro de tiempo

La medición de los trabajos de campo se ha hecho a nivel de cada una de las parcelas experimentales, contabilizando de manera continua el tiempo para su total aprovechamiento, es decir, la suma del tiempo consumido para el apeo, procesado (tan solo en sistema A), reunión y saca, separación del material (sistema A) y astillado. Se contabilizan las veces que se rellenan el depósito de gasolina y de aceite en cada parcela y se estima el consumo total por parcela.

En el desembosque, se cronometra el tiempo total que el autocargador necesita para finalizar una parcela, contabilizando número de ciclos (veces en que el autocargador completa un ciclo de carga y descarga), tiempo de carga en la parcela, tiempo de desplazamiento a cargadero, tiempo de descarga y tiempo de desplazamiento descargado hasta la parcela. El consumo del autocargador viene dado por las horas de trabajo conforme a la experiencia en consumo por hora del operario.

En la fase de astillado, se registra el tiempo que tarda la astilladora en ser alimentada y astillar la biomasa de cada pila.

El tiempo ha sido medido en unidades del Sistema Internacional (SI) horas, minutos y segundos. Se toman registros sobre los retrasos debidos a la maquinaria, a los operarios y retrasos operativos porque el coste dependerá del tiempo total en bruto de trabajo, por lo que es importante saber qué porcentaje de tiempo ocupan. Para la

comparación de sistemas se utiliza el tiempo en neto sin considerar retrasos, es decir, las horas productivas de maquinas sin considerar retrasos (PMH<sub>0</sub>).

Se han registrado los retrasos debidos a las interrupciones generadas por los operarios (descansos), retrasos “mecánicos” debidos a reparaciones de la maquinaria o imprevistos, retrasos “operacionales” debidos a la espera del comienzo de unas acciones respecto a otras, etc. Sin embargo, para el cómputo del total de tiempo necesario para que se diera el aprovechamiento de una parcela, tan sólo se contabilizaron los retrasos debidos para el afilado de la motosierra y las recargas de combustible que son intrínsecos al mismo aprovechamiento.

- Registro de consumos de combustibles

Para la medición del consumo de combustible durante el aprovechamiento de cada parcela se recogieron los siguientes datos de cada equipo:

- a) Modelo, año de fabricación y potencia
- b) Litros de combustible consumidos
- c) Información relativa a las emisiones del equipo (si disponibles)

La estimación de consumo de combustible se hizo de manera directa para el caso de la motosierra, donde se contabilizaron el número de recargas de aceite y gasóleo por parcela conocidas las capacidades de los depósitos. Para el autocargador y la astilladora los consumos se basan en el consumo por hora determinado por el operario en base a su experiencia y tiempo empleado. Para el caso de la astilladora, se estima el consumo realizado por la astilladora y el camión que la alimenta, asignando este consumo a la astilladora.

#### **b) Tras los aprovechamientos: cantidad de biomasa, calidad e impactos**

En este apartado se consideran tan sólo los outputs directos medidos en campo tras los aprovechamientos, tal como son la cantidad de biomasa y los daños generados con su aprovechamiento. El resto de outputs elaborados a partir de estas mediciones y su relación con los inputs (rendimientos, productividad, balance energético y emisiones) se tratan en el apartado 3.3.4. *Análisis de los aprovechamientos*.

- Registro de cantidad de biomasa extraída

La cantidad de biomasa obtenida se mide tras el astillado en campo y transporte a planta por parte de la empresa que realiza el aprovechamiento. Este astillado se realizó dos semanas después del aprovechamiento debido a la ocupación de la astilladora en el momento de finalización del desembosque en cargadero.

Las toneladas de biomasa en verde se midieron con pesadas por separado del peso del camión de transporte para fracción de biomasa (biomasa procedente de aprovechamiento de árbol completo, de ramas y del acopio de fuste) y se midieron sus humedades en campo mediante humímetro en dicho momento.

- Registro de daños

El alcance de la valoración de la calidad ambiental se ciñe en esta tesis a la valoración de impactos sobre la masa remanente, sotobosque y suelo.

Para el registro de estos daños se ha elaborado una tabla de recogida de datos. En el caso de la valoración de la masa remanente dañada, se recogen los datos sobre el nº de árboles dañados por clase diamétrica dentro de cada parcela, zona dañada (corteza, el tronco y/o ramas), así como su grado de severidad (leve, moderado o grave).

Para el caso del daño sufrido por el sotobosque se considera de manera visual el porcentaje de matorrales y herbáceas eliminado debido al aprovechamiento, respecto a la superficie que ocupaban previamente.

Por último, para el caso del daño sufrido por el suelo, se ha registrado el porcentaje de superficie de rodadura de la maquinaria sobre el total de la superficie de la parcela.

### ***3.3.3.3. Análisis de posibles desviaciones sobre la planificación y organización***

Para obtener resultados fiables y comparables en cuanto a los aprovechamientos es necesario constatar una homogeneidad dasométrica entre las parcelas e intensidad de los trabajos de aprovechamiento realizados. Por ello, en la fase de inventario y tras la fase de ejecución de estos, se midieron las siguientes variables por parcela:

- a) DAP medio de los pies (cm)
- b) Volumen medio de los pies (m<sup>3</sup>)
- c) Distribución del número de pies por clase diamétrica
- d) Distribución del volumen (m<sup>3</sup>) por clase diamétrica

Con el fin de comprobar la doble homogeneidad ya señalada se realizó un análisis descriptivo en las parcelas, seguido análisis de inferencia estadística mediante pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas (cuando los datos no cumplan los criterios de homocedasticidad y normalidad requeridos), que detectaran la posible existencia de diferencias significativas entre parcelas y no incurrir en errores de muestreo que invalidaran los resultados de los posteriores estudios de tiempo, biomasa y consumos.

Para el análisis descriptivo de las parcelas se midieron la media, la media geométrica, el error típico, la mediana, desviación estándar, varianza de la muestra, coeficiente de curtosis y asimetría, rangos, nivel de confianza al 95%, número de observaciones y percentiles.

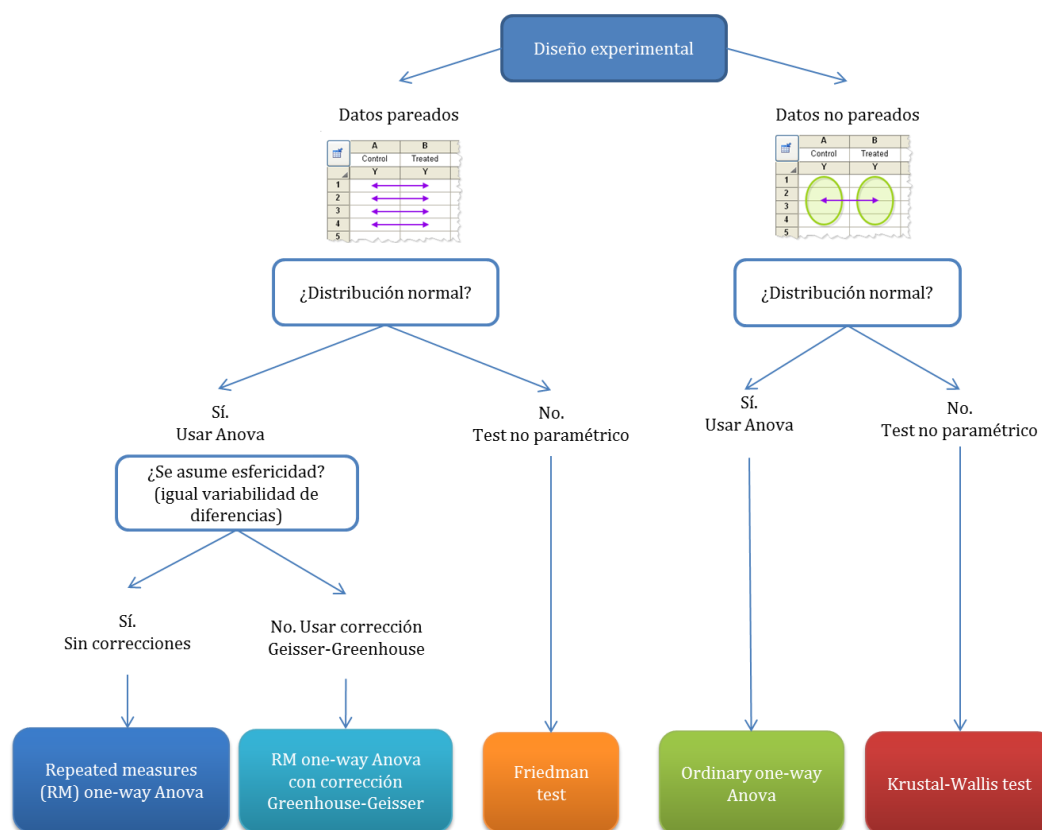
En cuanto a tests inferenciales, primeramente se estudió la normalidad de la distribución de los datos y posteriormente se utilizaron el análisis de la varianza (ANOVA) entre todas las parcelas y el test de comparación múltiple de Dunn y de Tukey para examinar las diferencias entre pares de parcelas. El software utilizado ha sido GraphPad Prism 6.

En el caso de existir diferencias significativas en homogeneidad o intensidad de los aprovechamientos en una o varias parcelas, para proceder a la toma de decisiones respecto a la eliminación de estas, se seguirán los siguientes criterios:

- a) diferencias significativas n<sup>º</sup> pies y volumen por clase diamétrica (a y b) se anteponen a los resultados obtenidos respecto a DAP y volúmenes medios en las parcelas (c y d), ya que se considera más relevante la semejanza en distribución en las parcelas que los valores medios.
- b) Para que una parcela se excluya de los posteriores análisis, ha de ser significativamente distinta (en cuanto a homogeneidad de la masa o intensidad de tratamiento recibido) tanto en DAP medio como en volumen medio.

La Figura 53 presenta el árbol de decisión tomado para la elección del análisis estadístico pertinente según la variable estudiada.





**Figura 53. Árbol de decisión de análisis estadístico de la homogeneidad de las parcelas.**  
Fuente: elaboración propia.

### 3.3.4. Análisis de los aprovechamientos

El análisis de los aprovechamientos depende del estudio de tiempos, el estudio de cantidades y calidades de la biomasa obtenida y el estudio de la calidad medioambiental tras los aprovechamientos.

Una vez conocidos los resultados de estas variables, se puede conocer el valor que tomarán otras variables derivadas tales como el precio de venta de la biomasa según su calidad, la energía generada por unidad de biomasa y las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas a partir de los distintos sistemas de aprovechamiento. Por último, con todo ello, se pueden conocer las siguientes variables respuesta del estudio para cada tipo de sistema de aprovechamiento:

- a) Productividad, rendimiento y consumos
- b) Impacto medioambiental
- c) Rentabilidad económica
- d) Balance energético

e) Balance de CO<sub>2</sub>

El análisis de estas variables tiene por objetivo poder evaluar qué sistema es más conveniente para el aprovechamiento biomásico de este tipo de masas forestales, como las más representativas en los montes de la Provincia de Valencia.

En los siguientes apartados se tratará de qué manera se van a estudiar estas variables respuesta y sus variables independientes implícitas.

Cabe señalar que en el caso del estudio de los resultados de las variables obtenidas directamente en campo (rendimiento e impacto ambiental), se ha realizado un estudio detallado por parcela y sistema (A y B). Para el caso de las variables derivadas (rentabilidad económica y balances), se ha tomado un valor medio para cada sistema.

### **3.3.4.1. Análisis de rendimientos**

El análisis de rendimientos de cada sistema de aprovechamiento se refiere a la cantidad de tiempo dedicada por cada unidad de producto obtenida, es decir, cantidad de biomasa por unidad de tiempo. También se estudiará la producción de cada parcela y sistema en toneladas de biomasa por hectárea.

En el presente trabajo de investigación la cantidad de biomasa ha sido calculada en verde a 45% de humedad y el tiempo empleado se tendrá en cuenta en horas, tanto por fase de aprovechamiento como por el conjunto del sistema sin tener en cuenta posibles solapes de fases de aprovechamiento.

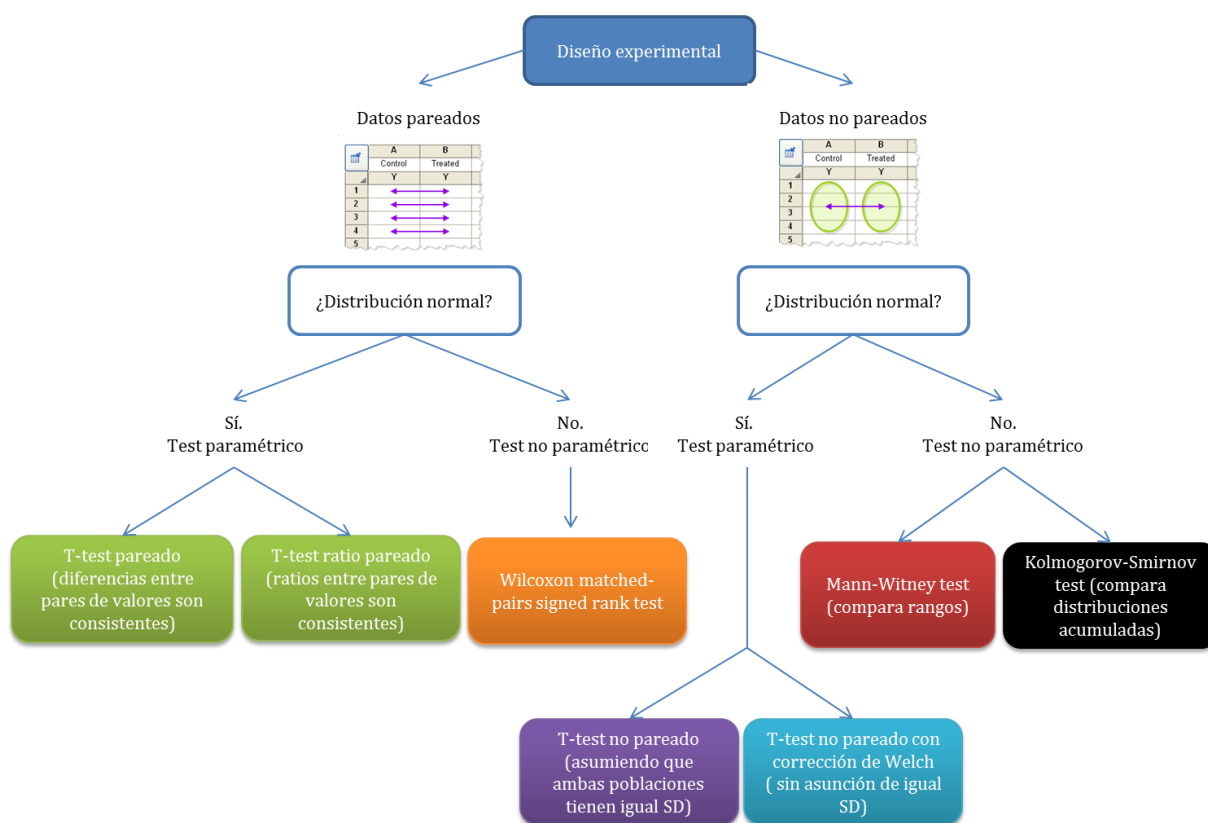
Por tanto, se obtiene un rendimiento de apeo bruto y neto (sin tener en cuenta retrasos ni parones en el apeo debido a recargas de combustible, afilado, etc.) por parcela y por sistema (tomando la media del conjunto de las parcelas de cada sistema), un rendimiento de desembosque bruto y neto por parte del autocargador por parcela y por sistema y un rendimiento de astillado genérico para el sistema de aprovechamiento A y otro para el sistema B.

Por tanto, se estudian:

- a) Cantidad de biomasa – Producción (t/ha)
- b) Rendimiento del apeo (motosierra) (t/h)
- c) Rendimiento del desembosque (autocargador) (t/h)
- d) Rendimiento del astillado (astilladora semimóvil) (t/h)

Se realizó un análisis estadístico de los aprovechamientos de manera descriptiva para cada parcela y de modo inferencial para comparar ambos tratamientos aplicados sobre los dos grupos de parcelas.

Para el estudio de la estadística inferencial, primeramente se comprueba la normalidad de la distribución de los datos. En el caso en que los datos se distribuyan normalmente, se procede al uso de test paramétricos, como el T-test, ya que se comparan grupos, sistema A y sistema B con tres repeticiones (resultados de las tres parcelas por grupo). Se quiere corroborar la existencia de diferencias significativas o no entre los grupos (sistemas). En caso de no darse una distribución normal, se hará uso de tests no paramétricos como la prueba W de Mann-Whitney (Wilcoxon) y el test de Kolmogorov-Smirnov. Esta secuencia de decisiones se puede ver representada gráficamente en la Figura 54).



**Figura 54. Árbol de decisión de análisis estadístico para la comparación de sistemas de aprovechamiento. Fuente: elaboración propia.**

### **3.3.4.2. Análisis de consumos**

Siguiendo la misma metodología descrita en el apartado anterior se procede a evaluar los consumos de los equipos empleados:

- a) Consumos de la motosierra (l/t)
- b) Consumo del autocargador (l/t)
- c) Consumo de la astilladora (l/t)
- d) Consumo total de combustible por sistema (l/t)

### **3.3.4.3. Análisis de la calidad de la biomasa**

La metodología seguida para el análisis de calidad de las astillas se detalla en el capítulo 3.4. *Desarrollo de biocombustibles sólidos*

### **3.3.4.4. Análisis del impacto medioambiental generado**

Se ha realizado una comparación de los daños provocados sobre la masa remanente y sobre el suelo tanto en uno como en otro sistema. Para ello se comparará cuantitativa y cualitativamente el número de árboles dañados, la severidad de los daños y los porcentajes de vegetación arbustiva eliminada así como el porcentaje de rodadura sobre el suelo.

La metodología desarrollada para llevar a cabo esta evaluación es la siguiente:

#### **a) Evaluación del impacto sobre vegetación remanente (pies dañados y % de sotobosque dañado o eliminado)**

Tras los aprovechamientos se procede a cuantificar los daños a través de su observación y registro en una tablilla donde se anota el número de árboles dañados, su clase diamétrica, la parte donde han sido dañados (corteza, tronco o ramas) y la intensidad del daño (leve, moderada o grave).

Así mismo, se establece un sistema de pesos para cuantificar el impacto de manera que este responda tanto a su intensidad como a la zona en que se ha visto afectado el árbol, ya que su supervivencia también depende de la fracción dañada. En cuanto a la intensidad, esta toma el valor 1 para daños leves, 2 para daños moderados y 3 para daños graves. En cuanto a la

zona o fracción del árbol afectada, se considera un peso de 1 para daños sobre la corteza, 2 para daños sobre ramas y 3 para daños sobre tronco. Para cada árbol afectado se realiza este registro y se contabiliza y ponderan sus daños dentro de cada parcela, lo que otorga un índice de impacto a la parcela.

Tras ello, se analiza si existen diferencias significativas entre impactos debido al sistema de aprovechamiento utilizado.

En cuanto a la evaluación de los daños sufridos por el sotobosque, se registra en la misma tablilla el porcentaje de sotobosque dañado o eliminado sobre la superficie que el sotobosque ocupaba previamente a la realización de los aprovechamientos y se evalúa si existen diferencias significativas debido al tipo de sistema de aprovechamiento utilizado en cada parcela.

#### **b) Evaluación del impacto sobre el suelo**

La evaluación del impacto sobre el suelo se ha realizado de manera visual, registrando el porcentaje de superficie afectada por rodadura y/o compactación del total de la superficie de cada parcela. De igual manera, se analiza la posible influencia del tipo de aprovechamiento en las parcelas de estudio.

#### **3.3.4.5. Análisis de rentabilidad económica y financiera**

Para el análisis de la rentabilidad económica y financiera, primeramente se realiza un análisis de costes de operación y un análisis de costes de los recursos propios invertidos, para tras ello, calcular unos beneficios que dependen de la calidad de la astilla obtenida y de su precio de venta en el mercado.

El análisis de esta rentabilidad se estudia globalmente para el aprovechamiento mediante el sistema A y el sistema B a partir de los tiempos medios de aprovechamiento de las parcelas. En el sistema A, los beneficios se estiman a partir de la suma de beneficios obtenida de los distintos precios de las dos fracciones de biomasa (astillas procedentes de ramas y de fustes).

Siguiendo la metodología desarrollada por Miyata (1980), los datos considerados necesarios y que se han recopilado para el análisis de costes son los siguientes:

1. Coste de maquinaria:
  - a. Coste de inversión o compra (P, €)
  - b. Vida de servicio (n, años)
  - c. Porcentaje de su valor a recuperar tras venta (sv, %)
  - d. Porcentaje de reparaciones y mantenimiento (rm, %)
  - e. Interés del capital (i, %)

- f. Seguros e impuestos sobre maquinaria (at, %)
  - g. Uso anual (horas de trabajo/año)
2. Coste de combustibles:
- a. Consumo de combustible (l/h)
  - b. Precio del combustible (Pc, €/l)
  - c. Coste del lubricantes (lo, % del coste de combustible)
3. Costes laborales:
- a. Coste de los operarios (€/h)
  - b. Número de operarios

El precio de venta de las astillas que se recoge es el indicado por la empresa forestal que ha realizado los trabajos.

A partir de estos datos se han obtenido:

1. Tasa de retorno (S, €) =  $(P \cdot sv\%)$
2. Depreciación anual (Amm, €/año) =  $(P-S)/n$
3. Inversión media anual (AYI, €) =  $[(P-S) \cdot (n+1)/2n] + S$
4. Costes fijos
  - a. Tasa de interés anual Int, (€/i%/AYI)
  - b. Seguro e impuestos % of AYI
  - c. Costes fijos anuales CF, €/año (Amm+Int+At)
  - d. Costes fijos horarios CFH (€/h)
5. Costes variables
  - a. Coste de combustible (Comb, €)
  - b. Coste de lubricantes (L, €)
  - c. Costes de reparación y mantenimiento (RM, €)
  - d. Costes de personal (Pers, €)
  - e. Costes variables horarios (Vn, €/h) =  $(Comb+L+RM+Pers)$

Y por último, los costes totales de aprovechamiento se han obtenido de la suma de los costes de operación (costes fijos más costes variables) más el beneficio industrial y los costes indirectos.

Los ingresos corresponden al precio de venta de las toneladas de astillas. El precio de venta corresponde al precio que pagaría un gestor de biomasa o usuario final a la empresa forestal que realiza el aprovechamiento.

Este precio de venta corresponde a los precios de mercado según la calidad de la astilla y diferenciando entre precios de venta en cargadero y precios de venta de las astillas transportadas hasta la planta. También se diferencia entre precios de venta de las astillas en verde (al 40-45% de humedad) y precios de venta de astilla seca (al 20% de humedad).

La rentabilidad económica se refiere a los ingresos adquiridos por cada tonelada de astilla y se calculará de la siguiente manera,

$$Re = \frac{(\text{Ingresos} - \text{Costes variables})}{Tn \text{ de biomasa}} \text{ (€/t)}$$

Mientras que la rentabilidad financiera tiene en cuenta los beneficios netos por tonelada de astilla, calculándose de la siguiente manera:

$$Rf = \frac{(\text{Ingresos} - \text{Costes totales})}{Tn \text{ de biomasa}} \text{ (€/t)}$$

#### **3.3.4.6. Análisis de emisiones de gases de efecto invernadero**

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) son estimadas como potencial de calentamiento global en Kg CO<sub>2</sub> equivalentes por tonelada de astillas. De acuerdo con el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC 2006), el horizonte de tiempo para estimar el potencial de calentamiento global se sitúa en 100 años, donde los factores de emisión corresponden a fuentes móviles en el sector forestal (IPCC 2006).

La utilización de la bioenergía contenida en las astillas se supone neutra en cuanto a emisiones de CO<sub>2</sub> ya que el CO<sub>2</sub> emitido durante la combustión de las mismas es el mismo que el que la biomasa fijó durante su crecimiento en los árboles (CE 2007, PAS 2008). Este concepto es básico para el cálculo de los beneficios en cuanto a efectos sobre el calentamiento global cuando se compara el uso de la biomasa frente al uso de otros combustibles en plantas de combustión térmicas. Sin embargo, el sistema de aprovechamiento para la obtención de biocombustibles sólidos no puede ser considerado como CO<sub>2</sub> neutro (Schlamadinger et al.

1997, Valente et al. 2011) ya que hasta el momento se requieren energías fósiles que muevan la maquinaria forestal necesaria para cubrir cada eslabón de la cadena monte-industria.

El alcance del presente análisis de emisiones de GEI va desde el apeo al transporte de las astillas a la planta de combustión. Para el cálculo de estas emisiones se ha utilizado la siguiente fórmula (Valente et al. 2011):

$$\text{Emisiones GEI (kg CO}_2\text{ e)} = \text{Combustibles consumidos (TJ)} \times \text{factor de emisión de gases producidos (kg/TJ)}$$

donde,

$$\text{Combustible consumido (TJ)} = \text{combustible (l)} \times \text{densidad (kg/l)} \times \text{Poder calorífico neto (TJ/Gg)} / 10^6$$

En el caso de los sistemas de aprovechamiento utilizados, el combustible es gasolina, para el apeo, y gasoil para el resto de operaciones de desembosque, astillado y transporte. La Tabla 27 muestra los valores asumidos para el cálculo de las emisiones. Los litros de combustible corresponden a los litros medios consumidos por cada sistema de aprovechamiento.

**Tabla 27. Factores de emisión y densidad de combustibles fósiles. Fuente: IPCC (2006).**

	Factores de emisión (kg CO <sub>2</sub> e/ TJ)			Densidad (Kg/l)	Poder calorífico neto (TJ/Gg)
	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	NH <sub>2</sub>		
Gasoil	74100	3,0	0,6	0,8	43,1
Gasolina	69300	3,0	0,6	0,7	46,9

Se han comparado las emisiones de ambos sistemas de aprovechamiento.

### 3.3.4.7. Análisis de balances energéticos

Para el análisis del balance energético se ha tenido en cuenta las entradas (*inputs*) y salidas (*outputs*) de energía durante el proceso de aprovechamiento, tomando como input la energía consumida para movilizar la maquinaria (poder calorífico de litros de combustible consumidos) y como output la energía contenida en la propia biomasa (poder calorífico). Lo que se pretende conocer es si se invierte más energía de la que se extrae o en caso contrario, si se obtiene más energía de la biomasa que la energía que se necesita para llevar a cabo su aprovechamiento. Cabe señalar que queda fuera del alcance de esta investigación el



conocimiento de la energía necesaria para la fabricación de la maquinaria necesaria para el aprovechamiento, para la obtención de los combustibles fósiles y de la energía requerida por parte de los operarios para desarrollar sus trabajos.

El uso de la energía se estimará en kWh/t de astillas. La fórmula utilizada para el cálculo del ratio input-output corresponde a la señalada por Ayres (1989) y Hohle (2010) para el cálculo de la energía generada por el uso de residuos de aprovechamientos forestales.

$$IE = Fc \times Ec / OE$$

donde,

IE, ratio de input en porcentaje (%)

Fc, consumo de combustibles de la maquinaria forestal empleada (l/t)

Ec, energía contenida por litro de combustible (kWh/l)

OE, ratio de output, es decir, cantidad de energía liberada al producirse la combustión de biomasa en una planta de combustión (kWh/t).

Para la realización de los cálculos se toman los siguientes valores de referencia:

Ec gasolina= 9,1 kWh/l

Ec gasoil= 10,01 kWh/l

OE de una planta de combustión térmica de mediana escala = 700 kWh/t (dato estimado a partir de datos anuales procedentes de plantas en funcionamiento en España)

Como resultado se obtendrán las unidades de bioenergía (biomasa) producidas por cada unidad de energía introducida basada en combustibles fósiles derivadas del consumo realizado por la maquinaria). Se compararán los balances energéticos de ambos sistemas de aprovechamiento tomando como datos de entrada los consumos medios para cada sistema de aprovechamiento. Cuando IE es mayor del 100% la energía de entrada es mayor que la energía obtenida por el aprovechamiento de la biomasa, y por tanto, no sería eficiente su aprovechamiento con fines energéticos.

## **3.4. Desarrollo biocombustibles sólidos de alto valor añadido**

### **3.4.1. Astillas**

#### **3.4.1.1. Material de partida**

Con el fin de determinar la calidad de la astilla recogida en campo, de las pilas de astillas generadas a través de los sistemas de aprovechamiento aplicados, en cargadero, se tomaron sacos de 5 kg de astillas de fuste, otros 5 kg de astillas de ramero y otro saco de 5 kg de astillas procedentes del astillado de árbol completo.

Posteriormente en el laboratorio de biomasa de AIDIMA se procedió a evaluar las muestras de astillas según análisis morfológicos, físicos y energéticos.

#### **3.4.1.2. Equipos**

Los equipos utilizados para llevar a cabo los ensayos de calidad de las astillas fueron los siguientes:

- Equipo de vibración mecánico para tamices CISA modelo R0200N (ver Figura 55).
- Estufa de secado MEMMERT modelo UFE 700 (ver Figura 56).
- Balanza de precisión SARTORIUS modelo ED1245 (ver Figura 57).
- Horno-mufla CARBOLITE modelo AAF1100 (ver Figura 58).
- Molino de partículas IKA-WERKE, modelo MF10 (1kW) (ver Figura 59).
- Bomba calorimétrica PARR modelo 1351 (ver Figura 60).

#### **3.4.1.3. Ensayos de laboratorio**

Para el análisis de la calidad de las astillas obtenidas en los aprovechamientos, se sigue la metodología determinada por la norma europea EN 14961. *Biocombustibles sólidos*.

*Especificaciones y clases de combustibles. Parte 4. Astillas de madera para uso no industrial.* En ella se detallan los análisis necesarios para la caracterización de las astillas y los rangos de valores que diferenciarán calidades o tipologías.

Las características a analizar son las siguientes: clasificación del material, humedad, cenizas, y poder calorífico. Se realizaron tres determinaciones en cada ensayo para cada fracción de procedencia (fuste, ramas y árbol completo).

En la Tabla 28 se indica la normativa seguida para la evaluación de cada una de las características.

**Tabla 28. Normativa de aplicación.**

<b>Especificaciones</b>	<b>Normativa</b>
Origen y fuente del material	EN 14961-1
Tamaño de partícula	EN-15149-1
Humedad	EN 14774
Cenizas	EN 14775
Poder calorífico	EN 14918

Por otra parte, la clasificación de las calidades se realiza conforme las especificaciones de astillas de madera para uso no industrial (EN 14961, ver Anexo 5). En ellas se muestran las clases de calidad de las astillas, de mayor a menor calidad, A1, A2, B1 y B2, en función de los valores adoptados por los parámetros especificados anteriormente. Los principales parámetros definitorios de una calidad u otra son la cantidad de humedad de las astillas, su contenido en cenizas y poder calorífico.

### **a) Características morfológicas**

#### **a1) Origen y fuente**

**Procedimiento:** EN 14961-1. *Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 1. Requisitos generales.*

Las clases de propiedad A1 y A2 representan maderas vírgenes y residuos de madera no tratada químicamente. A1 representa combustibles con bajo contenido de cenizas lo que indica nada o poca corteza y contenido bajo de humedad, mientras que la clase A2 tiene algo más de ceniza, nitrógeno y cloro. La clase B1 incluye los cultivos forestales de rotación corta, la madera de los jardines y las plantaciones, etc., y los productos y residuos industriales sin tratar químicamente

y finalmente la clase B2 también incluye los subproductos y residuos industriales tratados químicamente y madera usada (EN 14961-4:2011).

Se procede a la clasificación de las astillas conforme a su origen según la norma citada.

#### a2) Tamaño de partícula

**Procedimiento:** EN-15149-1. *Biocombustibles sólidos. Determinación de la distribución del tamaño de partícula*

#### **Materiales:**

- Muestra contenida en recipiente de 4l
- Serie de tamices de 3,15 mm, 8,0 mm, 16 mm, 31,5 mm y 45 mm
- Bandejas colectoras
- Equipo de vibración mecánico para tamices CISA modelo RO200N (ver Figura 55).
- Balanza de precisión SARTORIUS modelo ED 1245, con una precisión de 0,1 g.



**Figura 55. Equipo de vibración mecánico para tamices CISA.**

**Preparación de la muestra:** La muestra de ensayo debe tener un contenido en humedad inferior al 20% para evitar que las partículas se unan o que se pierda humedad durante el proceso de cribado.

**Procedimiento operatorio:**

- 1.- Se monta el equipo de cribado mecánico con los tamices en orden decreciente de abertura de malla finalizando en una bandeja colectora
- 2.- Se pesa la muestra aproximando a 0,1g, se esparce sobre el tamiz superior en una capa homogénea y se da comienzo al cribado y se mantiene durante 15 min.
- 3.- Se pesa el material neto en cada tamiz y en la bandeja colectora con una precisión de 0,1g. En el caso de que una partícula quede adherida al tamiz se debe quitar y añadir a la fracción que quedó sobre ese tamiz.

**Cálculo:**

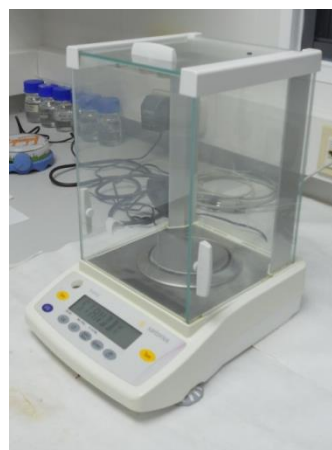
El resultado se expresa como un porcentaje del total de las fracciones. En el procedimiento llevado a cabo se registrará por cada tamiz el porcentaje de la fracción retenida en peso acumulado en % y se determinará la mediana de la distribución del tamaño de las partículas ( $d_{50}$ ), de manera que el 50% de la masa se encuentra por encima y el 50% de la masa por debajo.

**b) Características físicas: contenido en humedad**

**Procedimiento:** EN 14774. *Biocombustibles sólidos. Métodos para la determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa.*

**Materiales:**

- Muestra > 300 g
- Estufa de secado MEMMERT, modelo UFE 700 (4kW) (ver Figura 56).
- Bandejas, de material no corrosible (inoxidable) y resistente al calor y de una dimensión tal que puedan albergar la porción de ensayo en la proporción de aproximadamente 1 g de muestra por cm<sup>2</sup>.
- Balanza de precisión SARTORIUS modelo ED 1245, con una precisión de 0,1 g (ver Figura 57).



**Figura 56. Estufa de secado MEMMERT y Figura 57. Balanza SARTORIUS.**

**Procedimiento operatorio:**

- 1.- Se pesa una bandeja vacía y limpia con una aproximación de 0,1 g, se transfiere la muestra del recipiente a la bandeja, distribuyéndola de manera uniforme, ocupando alrededor de 1 cm<sup>2</sup> de superficie cada gramo de muestra.
- 2.- Se pesa la bandeja con la muestra. Se coloca la bandeja cargada a temperatura controlada de 105±2 °C. Se calienta la bandeja hasta que alcanza una masa constante.
- 3.- La bandeja cargada con la muestra debe ser pesada de nuevo con una aproximación de 0,1 g cuando aún están calientes, en un intervalo de entre 10 y 15 segundos para evitar absorción de humedad. El tiempo de secado requerido dependerá del tamaño de la partícula de la muestra, la velocidad a la que se produce el intercambio total de aire en el horno, el espesor de la capa de la muestra, etc.

**Cálculo:**

El contenido de humedad,  $M_{ar}$ , del biocombustible, tal y como se recibe, en base húmeda, expresado como un porcentaje de masa, debe calcularse usando la siguiente ecuación:

$$M_{ar} = \frac{(m_2 - m_3) - (m_4 - m_5)}{(m_2 - m_1)} \times 100$$

donde,

- $M_{ar}$  Contenido de humedad en %
- $m_1$  Masa recipiente vacío
- $m_2$  Masa recipiente y la muestra antes secado

- m<sub>3</sub> Masa recipiente y la muestra después secado
- m<sub>4</sub> Masa recipiente referencia
- m<sub>5</sub> Masa recipiente referencia después secado

### c) Característica química: contenido en cenizas

El contenido de ceniza se refiere, en base seca, según la normativa, a la masa de residuo inorgánico que queda después de la combustión de un combustible bajo condiciones especificadas, expresada como un porcentaje de la masa de la materia seca en el combustible.

**Procedimiento:** EN 14775. *Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del contenido en cenizas*

#### Materiales:

- Muestra >300g.
- Plato de material inerte, como porcelana, sílice o platino y de una dimensión tal que el total de la muestra cubra la superficie del plato en una proporción igual o inferior a 0,1 g/cm<sup>2</sup>.
- Horno-mufla CARBOLITE, modelo AAF1100 (7kW) capaz de proporcionar una zona de temperatura uniforme a los niveles requeridos por el procedimiento, alcanzando dichos niveles en el tiempo especificado. El horno utilizado posee un ventilador de extracción (550 ± 10) °C (ver Figura 58).
- Molino de partículas IKA-WERKE, modelo MF10 (1kW) (ver Figura 59).
- Balanza de precisión SARTORIUS modelo ED 1245, con una precisión de 0,1 g.



**Figura 58. Mufla CARBOLITE.**



**Figura 59. Molino de partículas IKA-WERKE.**

**Principio del método:** El contenido de ceniza se determina mediante cálculo a partir de la masa del residuo que queda después de que la muestra se calienta en aire bajo condiciones rígidamente controladas de tiempo, peso de la muestra y especificaciones e los equipos a una temperatura controlada ( $550 \pm 10$ ) °C.

**Preparación de la muestra:** La muestra de ensayo es la muestra para el análisis general con un tamaño nominal superior de 1 mm o menos, para ello pasamos los pellets por un molino de partículas. La determinación del contenido de cenizas se hace directamente sobre la muestra para el análisis general preparada, incluyendo simultáneamente la determinación del contenido de humedad en la muestra para el análisis general.

**Procedimiento operatorio:**

- 1.-Generalidades: se deben llevar a cabo un mínimo de dos determinaciones sobre la muestra de ensayo.
- 2.-Procedimiento de trituración: Se toma una porción de ensayo. Los pellets se pasan por un molino de partículas.
- 3.-Procedimiento de pesado inicial: Se coloca un mínimo de 1 g de muestra triturada en el fondo del plato y se esparce en una capa uniforme sobre la superficie del fondo. Se pesa el plato con la muestra con una aproximación de 0,1 mg. y se registra la masa.
- 4.-Procedimiento de calentamiento: Se coloca el plato en un horno frío. Se calienta la muestra en el horno según se explica a continuación:
  - Se eleva la temperatura del horno de manera uniforme hasta 250 °C durante un periodo de 30 minutos a 50 minutos (es decir, con una subida de 4,5 °C/min a 7,5 °C). Se mantiene esta temperatura durante 60 minutos para permitir que se evaporen los volátiles antes de la ignición.



-Se sigue elevando la temperatura en el horno de manera uniforme hasta  $(550\pm 10)$  °C durante un periodo de 30 minutos y se mantiene esta temperatura durante al menos 120 minutos.

**Cálculo:**

El contenido de ceniza en base seca,  $A_d$ , de la muestra expresado en porcentaje en masa en base seca se debe calcular usando la siguiente fórmula:

$$A_d = [(m_3 - m_1) / (m_2 - m_1)] \times 100 \times [100 / (100 - M_{ad})]$$

donde,

$m_1$  Masa (g) del recipiente vacío

$m_2$  Masa (g) del recipiente y la muestra

$m_3$  Masa (g) recipiente y la ceniza

$M_{ad}$  Contenido de humedad de la muestra en porcentaje en base húmeda, usada para la determinación.

El resultado se debe registrar como la media de determinaciones con una aproximación del 0,1%.

**d) Característica energética: 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, CEN 2005, Moglia et al. 2007).

**Procedimiento:** EN 14918. *Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del poder calorífico.*

**Materiales:**

- Muestra > 1g.
- Bomba calorimétrica PARR, modelo 1351 (ver Figura 60).
- Molino de partículas IKA-WERKE, modelo MF10 (1kW).

- Balanza de precisión SARTORIUS modelo ED 1245, con una precisión de 0,1 g.



**Figura 60. Bomba calorimétrica PARR.**

**Principio del método:** Se ha empleado el ensayo de bomba calorimétrica para la determinación del poder calorífico bruto a volumen constante. Se utiliza el material procedente de monte sin secar la muestra antes del ensayo. A su vez, se determina la humedad de las astillas según son recibidas para realizar posteriores correcciones.

Según la norma, los distintos poderes caloríficos a calcular se definen de la siguiente manera:

- Poder calorífico bruto (PCB) a volumen constante: valor absoluto de la energía específica de combustión, liberada por unidad de masa de biocombustible sólido quemada en presencia de oxígeno en una bomba calorimétrica con arreglo a las condiciones especificadas. Anteriormente conocido como poder calorífico superior.
- Poder calorífico neto (PCN): valor absoluto de la energía específica de combustión, en julios, liberada por unidad de masa de biocombustible sólido quemada en presencia de oxígeno bajo condiciones de volumen o presión constante y de modo que todo el agua de los productos de reacción permanece como vapor de agua (en un hipotético estado de a 0,1 Mpa), siendo el resto de productos como para el poder calorífico bruto, todo a la temperatura de referencia. Anteriormente conocido como poder calorífico neto.

La diferencia fundamental se debe al estado físico del agua en los productos de reacción. El poder calorífico del combustible usado más comúnmente para fines prácticos es el poder calorífico neto a presión constante para el combustible con un contenido de humedad especificado. Este se calcula a partir del poder calorífico bruto a volumen constante para la muestra seca conociendo el porcentaje de hidrogeno (H) nitrógeno (N) y oxigeno (O) de la

muestra sin humedad. Se tienen en cuenta los valores según la norma, UNE EN 14918, que determina valores medios representativos para los distintos materiales.

Se calcularán, por corrección, los poderes caloríficos para el combustible seco (en base seca) conociendo el porcentaje de humedad según las fórmulas establecidas en la norma.

#### **Procedimiento operatorio:**

Se deben llevar a cabo un mínimo de dos determinaciones sobre la muestra de ensayo. Las muestras de material a ensayar se acondicionan a  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  y a una humedad relativa de  $50\% \pm 5\%$ , según la norma UNE-EN 13238:02, bien por un periodo de tiempo fijo, bien hasta peso constante.

En este ensayo, una muestra de material previamente molida, pesada con una precisión de  $\pm 0,001\text{g}$ , se quema bajo condiciones normalizadas, a volumen constante, en una atmósfera de oxígeno, en un calorímetro de bomba, calibrado por combustión de ácido benzoico certificado.

El calor de combustión determinado bajo estas condiciones se calcula sobre la base del incremento de temperatura observado, teniendo en cuenta la pérdida de calor y el calor latente de vaporización del agua. El método de preparación de muestra es el del crisol (crisol de cuarzo, de diámetros de 20 mm).

#### **Cálculo:**

El poder calorífico superior se calcula a partir de la elevación de la temperatura en el agua del vaso calorimétrico y de la capacidad calorífica efectiva media del sistema. Se tienen en cuenta el calor desprendido en la combustión del hilo de ignición y las correcciones termoquímicas. Tras la ignición de la muestra y su combustión final, y aplicando las correcciones apropiadas, se obtiene el poder calorífico bruto de dicha muestra. El poder de combustión superior, en este caso, se define como el calor liberado por la combustión completa de la unidad de masa del material, y se expresa en MJ/Kg.

Durante el ensayo se considerarán y determinarán:

- Valor del equivalente de agua (MJ/K)
- Poder Calorífico bruto material de ayuda (KJ/Kg)
- Masa de agua introducida en el vaso calorimétrico (Kg)
- Temperatura inicial del periodo principal  $T_i$  ( $^{\circ}\text{C}$ )
- Temperatura máxima alcanzada en el periodo principal  $T_m$  ( $^{\circ}\text{C}$ )
- Poder calorífico bruto de la muestra ensayada (MJ/Kg)

A partir de estos datos, el poder calorífico neto (PCN) se puede calcular en base seca y libre de cenizas según la siguiente ecuación (EN 14918):

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

donde,

$q_{p,net,d}$  es el poder calorífico neto de la materia seca a presión constante (MJ/kg)

$q_{V,gr,d}$  es el poder calorífico bruto de materia seca (MJ/kg)

$w(H)_d$  es el contenido en hidrógeno, en porcentaje de masa, del biocombustible (seco) libre de humedad (incluyendo el hidrógeno del agua de hidratación de la materia mineral así como el hidrógeno 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 nitrógeno, en porcentaje en masa, del biocombustible libre de humedad.

El poder calorífico neto (a presión constante) según se recibe (biocombustible húmedo) se puede calcular a partir del poder calorífico neto en base seca según la ecuación (EN 14918):

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

donde,

$q_{p,net,ar}$  es el poder calorífico neto según se recibe a presión constante (kJ/kg)

$q_{p,net,d}$  es el poder calorífico neto 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).

El resultado se debe registrar como la media de determinaciones con una aproximación del 0,1%.

### **3.4.2. Pellets**

Las principales ventajas de los pellets en comparación con biocombustibles no procesados como las astillas son su alta densidad energética, que se traduce en menores costes de transporte y almacenamiento, la mayor uniformidad de su calidad, por ejemplo un contenido en humedad constante, más alta fluidez de masa traducida en alimentación automática de las calderas y las menores partículas de biocombustible, que implica una alimentación más regular, lo que conlleva menores emisiones y mejores posibilidades de combustión con menores cargas, resultando en mayores tiempos de utilización de las calderas (Werther et al. 2000, Nilsson et al. 2008).

El objetivo de la investigación en este apartado es la elaboración propia de pellets en la planta piloto de biomasa de AIDIMA, diseñada específicamente para este trabajo de investigación doctoral y que actualmente sirve para la realización de ensayos de calidad e investigación sobre pellets.

#### **3.4.2.1. Proceso de fabricación de pellets**

La Figura 61 muestra de forma esquemática las diferentes fases productivas que han conformado el proceso de fabricación de los pellets elaborados a partir de la biomasa extraída de las diferentes fracciones de astilla derivadas de los sistemas de aprovechamiento ensayados.



**Figura 61. Fases de producción de los pellets. Fuente: elaboración propia.**

Si bien ya se utilizaban las prensas de pelletizado para la fabricación de alimentos para el ganado, no fue hasta el 1961 cuando comenzó su densificación con fines energéticos. Ese año, la sociedad Sprout-Waldon Co, fabricante de prensas, creó una instalación completa para granular la corteza de roble en Tenesse (EE.UU.). En 1967, el laboratorio de investigaciones forestales vinculado a la Universidad Estatal de Oregón, procedió a unos 200 ensayos de granulación de corteza y de madera (Ortiz et al. 2003).

Ya en 1977, GUNNEMAN creó la BIO SOLAR RESEARCH y registró una patente de granulación a la que se le dió el nombre de WOODDEX. Desde 1977, algunas instalaciones explotan esta patente de pelletizadora en Estados Unidos y Canadá mientras que otras firmas han prefirieron realizar sus propias investigaciones y lanzar sus productos al mercado. En general, estas instalaciones de fabricación de pellets pueden producir hasta varios cientos de toneladas al día, según la potencia de la prensa y poseen altas productividades de 5-20 t/h (Ortiz et al. 2003).

En el caso de los equipos para la fabricación de pellets instalados en AIDIMA, cabe señalar que su finalidad es la investigación y realización de ensayos por lo que sus dimensiones son

reducidas a las propias de los equipos de laboratorio. A continuación, se detalla paso a paso el proceso de fabricación de pellets.

#### **a) Astillado**

La primera fase que se ha llevado a cabo para la fabricación de pellets es el astillado de la biomasa. Este se emplea para reducir el volumen de la biomasa, de manera que se consigue aumentar la densidad del residuo facilitando su secado natural, y economizando su transporte.

Las astilladoras pueden ser de disco o de tambor. Se diferencian básicamente en el órgano de corte, donde las astilladoras de disco tienen las cuchillas montadas de manera radial sobre un disco giratorio, y en las de tambor se disponen tangencialmente en un cilindro rotatorio o rotor que actúan contra una cuchilla de presión.

La velocidad de astillado es similar de un tipo de astilladora a la otra, pero en cambio los requerimientos en potencia son muy diferentes, siendo muy superiores en las astilladoras de disco. Según Tolosana (2009) las máquinas para aprovechamiento a escala industrial, con mayor capacidad y rendimiento, son de tambor, que además producen astilla de mejor calidad que las de disco, debido a la dirección del corte respecto al eje de las fibras. Como consecuencia, la astilla producida es más homogénea dimensionalmente, lo que favorece la calidad de los pellets.

Las astilladoras pueden ser a su vez semifijas o móviles. Es necesario que la astilladora disponga de un sistema de criba que permita la separación de materiales metálicos, materiales rodantes como piñas o piedras, e incluso de materiales ligeros aspirables como son las acículas de los pinos, ya que en el caso de los dos primeros pueden dañar las cuchillas de la astilladora o bien alguna de las máquinas empleadas posteriormente en la línea de pelletizado. En el caso de los materiales ligeros, su fundamento se debe a que aumentan considerablemente el contenido en cloro, azufre y cenizas los cuales disminuyen la calidad de la astilla, y como consecuencia del producto final (Tolosana 2009).

En el laboratorio diseñado en la planta piloto de AIDIMA no se optó por la instalación de una astilladora ya que normalmente se dispone de la biomasa en forma de astilla. No obstante, para la reducción del tamaño de éstas, como también fustes, trozas o leñas, se eligió una trituradora de martillos (ver Figura 65).

#### **b) Almacenaje**

Es conocido que el tiempo de almacenamiento del material de partida juega un papel importante sobre la durabilidad y la resistencia de los pellets (Arshadi et al. 2008, Finell et al. 2008, Samuelsson et al. 2009, Nielsen et al. 2010,)

En la planta piloto de AIDIMA se instalaron diez contenedores de plástico marca PLASTIPLÓN con paredes y fondo ranurados de dimensiones 1,2 x 1,2 x 1,1m con una capacidad de 680 l, separados del suelo al ser instalados sobre paletas de madera (ver Figura 62). Los contenedores

fueron situados en un lugar cubierto pero aireado, con el fin de facilitar la ventilación y secado al aire de las astillas hasta su utilización para la elaboración de pellets.



**Figura 62. Contenedores con de astillas en planta piloto de AIDIMA.**

#### **c) Secado**

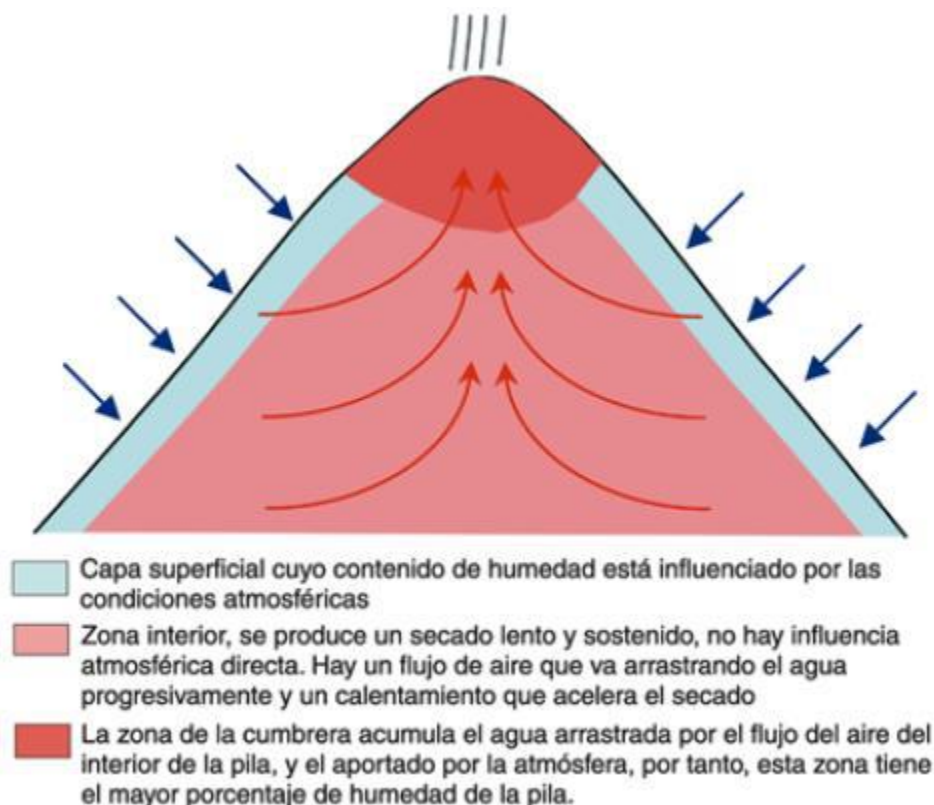
Esta fase consiste en producir una disminución del grado de humedad de la biomasa, que permita aumentar la capacidad calorífica, así como su facilidad de utilización. El proceso de secado puede ser natural o forzado, reduciendo el valor de la humedad del 100% en base seca, a un 10-15%. Material por encima del 15% de humedad es difícil de pelletizar (Pellet@las 2009b).

Existen varios tipos de secado. Este puede ser secado natural o forzado. El secado natural aprovecha las condiciones ambientales favorables para facilitar la pérdida de humedad de la biomasa, y puede realizarse directamente en monte o bien una vez convertidos los residuos en astillas. (Routa y Sikanen 2014).

Durante el secado se produce la liberación de calor de las pilas de astillas, sobre todo en las partes centrales, donde, durante las primeras semanas, la temperatura se eleva rápidamente, la cual se estabiliza, pasando al final a disminuir de manera progresiva. Este factor, denominado “efecto chimenea”, depende de la temperatura ambiente, las precipitaciones, el tamaño y la compactación de la pila, y del contenido y distribución de corteza y elementos finos (Ortiz et al. 2003).

La dinámica de secado de este sistema, genera tres zonas diferenciadas en las pilas, cada una de ellas con un grado diferente de humedad, tal y como puede observarse en la Figura 63.





**Figura 63. Dinámica de secado en las pilas de astilla. Fuente: Ortiz et al. (2003).**

Este tipo de secado conlleva riesgos de que se produzcan fenómenos de autoignición, los cuales se ven favorecidos por la presencia de grandes cantidades de corteza, por la formación de costras de hielo sobre la superficie o por la acumulación de materiales finos.

El tipo de secado forzado consiste en la disminución del grado de humedad de la materia prima, mediante el empleo de diferentes equipos, en función del tamaño del residuo. De esta manera existen dos tipos de equipos (Ortiz et al. 2003):

- Tipo neumático: este equipo de secado se emplea cuando las partículas son finas, o cuando se requiere una ligera deshidratación. El sistema se basa en el arrastre de los residuos, utilizando un flujo térmico que extrae la humedad durante el recorrido.
- Tipo *trommel*: este equipo se emplea para partículas gruesas y muy húmedas. Es un sistema rotatorio, que al igual que el anterior, está formado por un flujo de calor, un canal de secado y un sistema de succión, que permiten extraer la humedad de los residuos sólidos, pero en este caso el canal de circulación es un cilindro.

En el caso de la planta piloto de AIDIMA se ha optado por un secado natural en los módulos contenedores descritos en el apartado de almacenaje (ver Figura 62). Estos contenedores

modulares permiten el volteo de las astillas cada cierto tiempo (2-3 semanas) para evitar el efecto chimenea y permitir un aireado más homogéneo de las astillas.

En ocasiones, cuando se ha estimado que el material estaba demasiado seco para pelletizar o cuando se ha determinado una humedad de las astillas no uniforme, se procedió a acondicionar las astillas con el fin de obtener astillas con humedad óptima para iniciar su refinado y proceso de pelletizado.

#### d) Acondicionado de las astillas

Las astillas fueron almacenadas unos tres meses en época de verano. El proceso de secado natural por oreo resultó ser muy efectivo. Aún así, las astillas se han dispuesto en una cámara climática marca ACS50 modelo UC 50 (20kW) a 20°C y 90% de humedad hasta que alcanzaron el 15% de humedad, calculada a partir de las condiciones de temperatura y humedad relativa en cámara prescritas por Kollman (1959) (ver Figura 64). Una vez alcanzada esta humedad se ha procedido a la siguiente fase de triturado y refinado.



**Figura 64. Cámara de climatización ACS50.**

#### e) Triturado y refinado

Tras el secado y acondicionado es necesario realizar un triturado debido a la heterogeneidad que suele presentar el material astillado (Pellet@las 2009b). Para ello, se eligió una trituradora de martillos marca OLIGOTECHNOLOGY que ha permitido obtener un serrín de tamaño máximo de 5 mm a partir de fustes y/o leñas y que ha permitido una primera reducción granulométrica (ver Figura 65).



**Figura 65. Trituradora de martillos OLIGOTECHNOLOGY.**

El material de ensayo triturado con el molino de martillos se trasladó a un molino refinador vertical de marca MECAFA con el que se han obtenido partículas de un tamaño máximo de 3mm en el proceso de refinado (ver Figura 66). Este es el tamaño final que fue elegido para el material de ensayo, ya que es precisamente el tamaño recomendado por el fabricante de la pelletizadora que ha sido utilizada en la siguiente fase.



**Figura 66. Molino refinador MECAFA.**

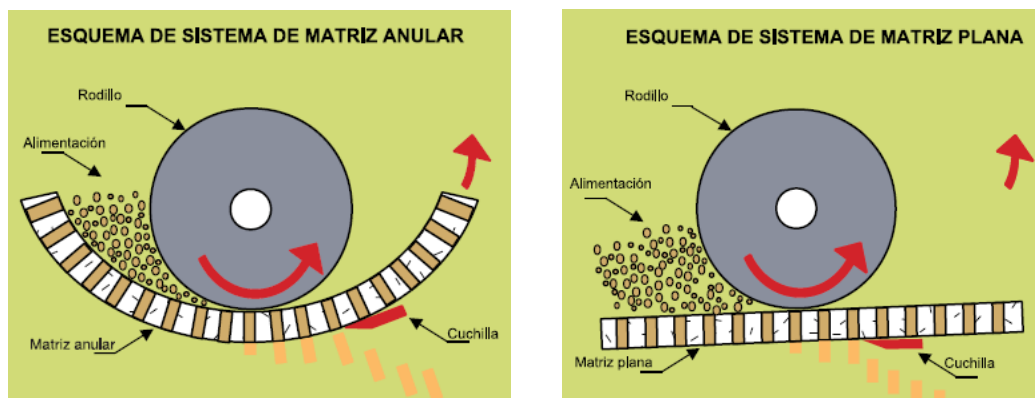
#### **f) Pelletizado**

En el fase de compactado o pelletizado el material entra en la pelletizadora por la parte superior, depositándose en la matriz y ejerciéndose sobre éste una presión, que oscila entre 1.500 y 1.600 Kg/cm<sup>2</sup>, produciendo su compresión, alcanzándose unas temperaturas en la matriz cercanas a 150°C, que, junto con la humedad del material, producen la plastificación de la lignina, que pasa a realizar la función de aglomerante natural de las partículas. Una vez los pellets han pasado por la matriz, estos son cortados o rotos en una longitud estipulada previamente (Pellet@las 2009b).

Durante el proceso de pelletizado el contenido en humedad del material se reduce aproximadamente al 50%. Este contenido en humedad es un parámetro importante durante la pelletización porque facilita la transmisión de calor y la fricción (Back 1987).

Tal como se puede observar en la Figura 67, de forma general, existen dos tipos de pelletizadoras en el mercado:

- Pelletizadoras de matriz anular: estas pelletizadoras constan de matrices anulares o de anillo, existiendo dos tipos, uno en la que la matriz gira a elevadas velocidades sobre los rodillos fijos, y el otro en el que la matriz es fija y son los rodillos los que poseen movimiento giratorio y se mueven sobre la matriz.
- Pelletizadoras de matriz plana: en este tipo de pelletizadoras, son los rodillos los que poseen movimiento, mientras la matriz es fija y su forma es de disco horizontal.



**Figura 67. Esquemas de los diferentes sistemas de matriz en pelletizadoras. Fuente: Ortiz et al. (2003).**

El nivel de presión necesario depende, entre otras cosas, del tipo de material a pelletizar. En general, un incremento de contenido de especies frondosas conllevará un incremento en la demanda de presión ejercida. Si existe una demanda de presión mayor a la ejercida se pueden bloquear los agujeros de la matriz, interrumpiendo de esta manera el proceso de pelletizado (Pellet@las 2009b).

A parte del secado de las partículas previas al pelletizado, la densificación (compactación) es el paso que requiere más energía, por ello, una reducción en el consumo de energía favorece el abaratamiento de los costes de las fábricas de pellets. Por ejemplo, el consumo de energía por parte de la pelletizadora puede ser reducido a la mitad al incrementar la temperatura desde 100°C a 200°C. Sin embargo, hay que tener muchos factores en cuenta ya que altas temperaturas de pelletizado inician el proceso de autoxidación de los extractivos en los pellets y causan emisiones de componentes volátiles orgánicos durante el almacenado de los pellets (Arshadi y Gref 2005).

Para la planta piloto de AIDIMA se eligió una prensa de marca KAHL de matriz plana orientada a laboratorios experimentales con una producción de 50 kg/hora. Las partículas de aserrín obtenidas del molino refinador fueron conducidas de forma manual a la pelletizadora (ver Figura 68). Debido a que la pelletización se va calentando gradualmente hasta alcanzar una temperatura óptima (90°-105°) y constante, se decidió desechar los pellets generados hasta que la pelletizadora alcanzó temperaturas superiores a 90 °C.



**Figura 68. Pelletizadora KAHL.**

### **g) Enfriado**

Tras la fase de pelletizado, en esta fase del proceso productivo tiene lugar el refrigerado de los pellets que salen de la pelletizadora con una temperatura próxima a los 90°C.

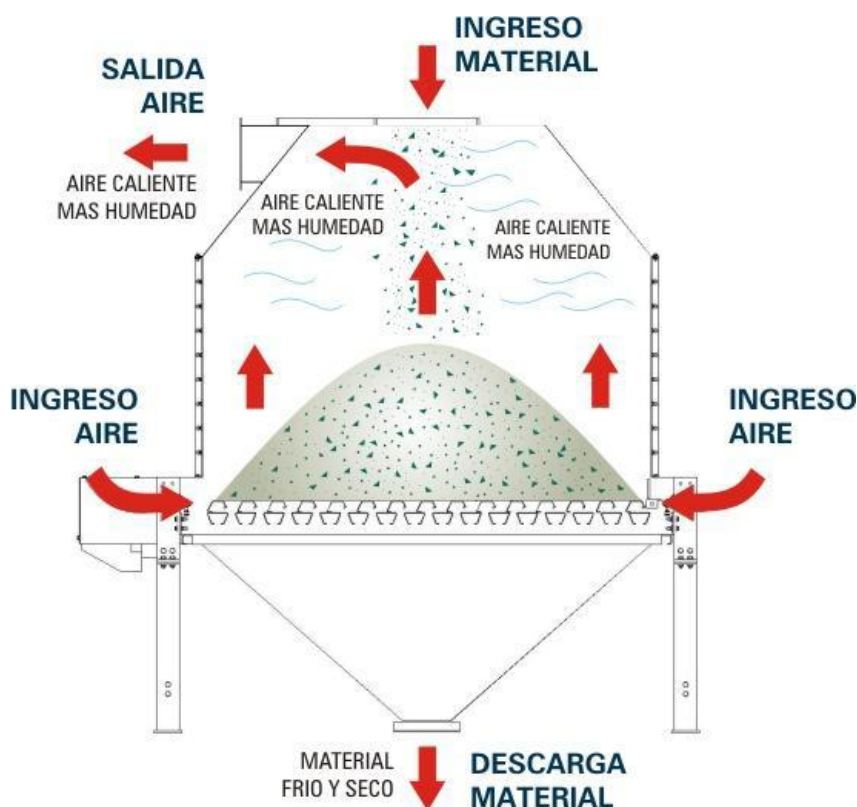
El sistema de enfriado emplea un flujo de aire que circula a contracorriente, en el que los pellets, conforme avanzan en el equipo, se encuentran con una temperatura cada vez menor. De esta manera se consigue disminuir la temperatura de los pellets de una manera progresiva y lenta, evitando de esta forma que se produzcan fisuras en su superficie (INTI 2008).

El proceso de enfriado incrementa la durabilidad de los pellets y reduce la formación de finos durante el transporte y manejo de los mismos (Pellet@las 2009b). Los pellets que no se enfrían adecuadamente pueden tener una durabilidad reducida, principalmente debido a stress que se produce entre la capa exterior enfriada y la parte interna aún caliente, lo que induce a roturas (Kaliyan et al. 2009). Además, durante el enfriado los componentes solubles recrystalizan y crean uniones entre partículas y la viscosidad de algunos componentes podría aumentar ayudando así a mantener la integridad estructural de los pellets (Thomas et al. 1997).

Existen en el mercado dos tipos de enfriadores: los enfriadores verticales y los horizontales:

- **Enfriadores verticales:** en este tipo de enfriadores funcionan en base al principio de contra-flujo, entrando el producto en dirección opuesta a un flujo de aire que ingresa desde el fondo del equipo (ver Figura 69). El producto, que ingresa gradualmente seco se encuentra dentro del equipo con una corriente de aire ascendente, la cual arrastra el calor y las partículas de humedad fuera del equipo, dejando así el material en condiciones óptimas para su almacenamiento.
- **Enfriadores horizontales:** en este enfriador los pellets son transportados, en una malla metálica perforada, por la correa de transmisión. Son los más adecuados para reducir el volumen de piezas defectuosas y producción de finos debidos al golpeteo. A pesar de la ventaja de la reducción del volumen de piezas defectuosas, el espacio requerido para la

instalación de un enfriador horizontal es superior al solicitado para un enfriador vertical. La producción de finos no es una desventaja, ya que en la línea de producción se incluye un sistema de filtrado de finos, el tamizado, donde estos finos son incorporados de nuevo al sistema para su reutilización en la producción de pellets.



**Figura 69. Esquema enfriador vertical. Fuente: Innova Ingeniería (2011).**

El enfriador elegido para la planta pilotot de AIDIMA es un enfriador vertical MECAFA con una capacidad de 800l (ver Figura 71). Sin embargo, debido a retrasos en su instalación, para el caso de la presente tesis doctoral no pudo estar a punto y el enfriado de los pellets tuvo que darse al natural, sobre un tamiz de calibre de 3 mm para que pueda circular el aire. (ver Figura 70). Aún así, el proceso de enfriado natural se realizó de la forma más cuidadosa y lenta posible, con el fin de evitar excesivo stress por gradiente de tempratura en los pellets, evitando en lo posible posibles roturas de los mismos.



**Figura 70. Tamiz de 3mm de malla.**



**Figura 71. Enfriador MECAFA.**

### **3.4.2.2. *Diseño del experimento***

A partir de las muestras de astillas de *Pinus halepensis* tomadas en campo, junto con astillas de *Pinus pinaster* obtenidas en el mismo monte en Enguera (Valencia), se han estudiado los factores influyentes en la calidad de los pellets obtenidos y su dependencia de las diversas variables contempladas.



El objetivo del diseño experimental ha sido el de evaluar la influencia de las siguientes variables sobre las características de los pellets producidos en la planta piloto:

- a) La especie *Pinus halepensis* o *Pinus pinaster*.
- b) La presencia o no de corteza.
- c) La fracción de biomasa utilizada, es decir, si procede de ramas o de fuste, y en este último caso de fustes con un DAP de 20 cm o de 15 cm.

Para ello, primeramente se prepararon las muestras de astillas, se elaboraron los pellets y se sometieron a los ensayos pertinentes para determinar su calidad conforme a la normativa europea vigente.

Una vez obtenidos los resultados fueron analizados y se estudió estadísticamente la variabilidad explicada por las variables estudiadas (especie, corteza y fracción) así como las posibles relaciones entre los factores de estudio (características de ensayo: humedad, cenizas, densidad a granel, contenido de finos, etc.)

Por último, se elaboraron mezclas de pellets a partir de astillas de una misma especie pero de distintas fracciones con el fin de ver qué contenido en porcentaje se puede añadir a cada tipo de material manteniendo la calidad de los pellets. En este apartado se detalla el diseño experimental así como la preparación de los pellets, ensayos y análisis a realizar.

### **3.4.2.3. Material de partida**

Para la obtención de resultados representativos de los pellets elaborados a partir de biomasa de la Provincia de Valencia, se tomaron muestras de astillas de las dos especies de coníferas más abundantes, *Pinus halepensis* (procedente de la misma masa de las parcelas de estudio) y *Pinus pinaster* (procedente de un rodal cercano).

Se marcaron y aparearon seis árboles de CD15 y 6 árboles de CD20 de cada especie. Se desramaron todos ellos y se descortezaron tres árboles de CD15 y tres árboles de la CD20. Posteriormente se realizaron cinco pilas de material por especie:

- a) Pila de fustes CD15 con corteza (CC15)
- b) Pila de fustes CD15 sin corteza (SC15)
- c) Pila de fustes CD20 con corteza (CC20)
- d) Pila de fustes CD20 sin corteza (SC20)
- e) Pila de la totalidad de las ramas de ambas CD

La astilladora astilló cada pila y se llenaron sacos (big bags) obteniendo en total 10 grupos diferentes de astillas:

- 1) Fuste de *Pinus halepensis* con corteza y clase diamétrica de 15 (PH CC 15)
- 2) Fuste de *Pinus halepensis* sin corteza y clase diamétrica de 15 (PH SC 15)
- 3) Fuste de *Pinus pinaster* con corteza y clase diamétrica de 15 (PP CC 15)
- 4) Fuste de *Pinus pinaster* sin corteza y clase diamétrica de 15 (PP SC 15)
- 5) Fuste de *Pinus halepensis* con corteza y clase diamétrica de 20 (PH CC 20)
- 6) Fuste de *Pinus halepensis* sin corteza y clase diamétrica de 20 (PH SC 20)
- 7) Fuste de *Pinus pinaster* con corteza y clase diamétrica de 20 (PP CC 20)
- 8) Fuste de *Pinus pinaster* sin corteza y clase diamétrica de 20 (PP SC 20)
- 9) Ramas de *Pinus halepensis* (con corteza, de ambas cd) (PH RAMAS)
- 10) Ramas de *Pinus pinaster* (con corteza, de ambas cd) (PP RAMAS)

Estos *big bags* se etiquetaron y trasladaron a la planta piloto de biomasa en AIDIMA para proceder a la elaboración de pellets a partir de muestras de cada grupo.

La Figura 72 muestra de forma esquemática el diseño experimental de la fabricación y análisis de la calidad de los pellets.

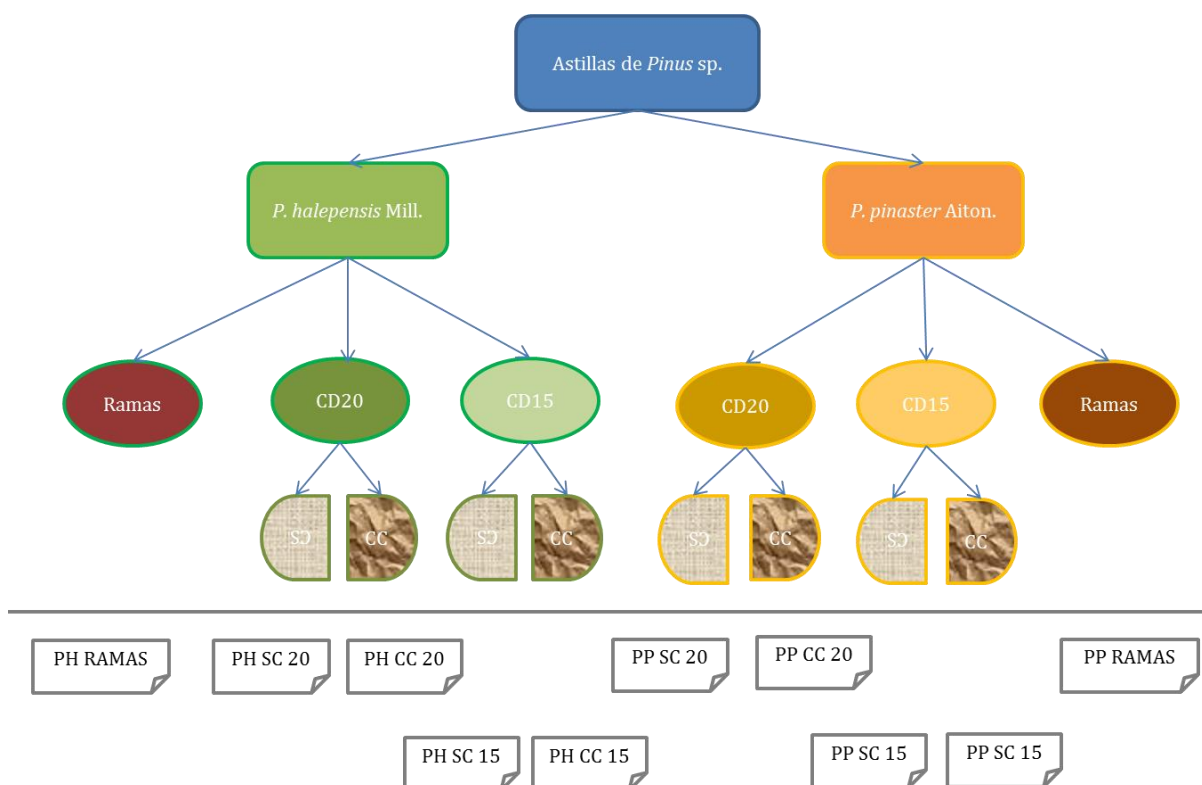


Figura 72. Diseño de las muestras de astillas y su etiquetaje. Fuente: elaboración propia.

#### 3.4.2.4. Equipos

Para el desarrollo de esta tesis doctoral se diseñó una planta piloto de fabricación de pellets y un laboratorio para los ensayos de calidad de los pellets producidos a nivel experimental. Tras un análisis general técnico y de mercado sobre equipos necesarios para la fabricación de pellets de distintos fabricantes se eligieron los siguientes equipos para el proceso de preparación de las astillas y elaboración de los pellets:

- Contenedores astillas PLASTIPON (ver Figura 62)
- Cámara climática ACS50 modelo UC 50 (ver Figura 64)
- Humímetro HUMIMETER modelo BM1
- Trituradora de martillos OLIGOTECHNOLOGY modelo ETCR110 (ver Figura 65)
- Molino refinador MECAFA modelo MH10BIO (7,5kW) (ver Figura 66)
- Pelletizadora KAHL modelo Press 14-175 (4kW) (ver Figura 68)
- Enfriadora MECAFA modelo ENFC800 (ver Figura 71)

Por otra parte, los equipos utilizados para llevar a cabo los ensayos de calidad de los pellets fueron los siguientes:

- Equipo de vibración mecánico para tamices CISA modelo RO200N (ver Figura 55)
- Estufa de secado MEMMERT modelo UFE 700 (ver Figura 56)
- Balanza de precisión SARTORIUS modelo ED1245 (ver Figura 57)
- Horno-mufla CARBOLITE modelo AAF1100 (ver Figura 58)
- Molino de partículas IKA-WERKE, modelo MF10 (1kW) (ver Figura 59)
- Bomba calorimétrica PARR modelo 1351 (ver Figura 60)
- Durabilímetro PELLET DURABILITY TESTER BIOENERGY TUMBLER modelo N 100 (ver Figura 74)
- Balanza PCE modelo E WS 300 (ver Figura 75)

#### 3.4.2.5. *Ensayos de laboratorio*

Con el fin de determinar calidad los pellets elaborados en la presente tesis, se procedió a evaluar las muestras obtenidas según los anteriores parámetros agrupándolos en tres grandes grupos de análisis: análisis físico-mecánicos, análisis químicos y análisis energéticos.

Para el análisis de la calidad de las astillas obtenidas en los aprovechamientos, se sigue la metodología determinada por la norma UNE-EN 14961-2. *Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: Pellets de madera para uso no industrial*. En ella se detallan los análisis necesarios para la caracterización de pellets y los rangos de valores que diferenciarán calidades o tipologías.

Las características a analizar son las siguientes: humedad, cenizas, densidad a granel, durabilidad, contenido en finos, porcentaje de corteza, contenido en cloro y azufre y poder calorífico. Se realizaron tres determinaciones en cada ensayo para muestra de astilla.

En la Tabla 29 se indica la normativa seguida para la evaluación de cada una de las anteriores.

**Tabla 29. Normativa de aplicación.**

<b>Especificaciones</b>	<b>Normativa</b>
Origen y fuente	EN 14961-1
Dimensiones	EN 16127
Humedad	EN 14774

---

<b>Especificaciones</b>	<b>Normativa</b>
Densidad a granel	EN 15103
Durabilidad mecánica	EN 15210-1
Cantidad de finos	EN 15149-2
Cenizas	EN 14775
Cloro y azufre	EN 15289
Poder calorífico	EN 14918

Además se ha realizado un test no contemplado en la normativa para conocer con más precisión los parámetros que afectan a los pellets, el contenido en corteza.

La clasificación de las calidades se realiza conforme a las especificaciones de pellets de madera para uso no industrial (EN 14961) teniendo en cuenta los valores obtenidos por las muestras de biomasa para los análisis mencionados.

## **a) Características morfológicas**

### **a1) Origen y fuente**

Se clasifica el origen y fuente siguiendo la norma EN 14961-1. Las definiciones sobre cada clase de propiedad se pueden encontrar mencionadas en el apartado 3.4.1.3. *Ensayos de laboratorio a1) Origen y fuente.*

### **a2) Dimensiones**

**Procedimiento:** EN 16127. *Biocombustibles sólidos. Determinación del diámetro y la largaria de los pellets*

#### **Materiales:**

- Muestra > 300 g (ver Figura 73)
- Pie de rey con resolución mínima de 0,1mm.
- Balanza de precisión SARTORIUS modelo ED 1245, con una precisión de 0,1 g.



**Figura 73. Muestra de los pellets elaborados para la investigación.**

**Procedimiento operatorio:**

La longitud del pellet se mide siempre a lo largo del eje del cilindro mientras que el diámetro se mide de manera perpendicular al eje del mismo.

La longitud total de cada pellet de la porción de ensayo se mide mediante el uso del calibre. Para la determinación del diámetro, se seleccionan un mínimo de 10 pellets al azar de la porción de ensayo.

**Cálculo:**

Se determina la media de las longitudes y diámetros de los pellets de la porción de ensayo.

**a3) Porcentaje de corteza**

También se han realizado ensayos que no se encuentran en la norma para un mejor control de los resultados. Este es el caso del cálculo de porcentaje en corteza de las astillas para fabricar pellets de las fracciones de fuste de *Pinus halepensis* y *Pinus pinaster*.

**Materiales:**

- Muestra  $\geq$  1 kg de astillas por cada especie y clase diamétrica.
- Balanza precisión PCE WS 300, con una exactitud suficiente para permitir pesar la muestra y el recipiente con una aproximación de 1 g (ver Figura 75).

**Principio del método:** Se pesa la porción de ensayo. El porcentaje de corteza se calcula a partir de la diferencia de pesos de la porción de ensayo con corteza y sin corteza.

Procedimiento operatorio:

- 1.- Se pesa la porción de ensayo.
- 2.- Se procede a retirar todos los trozos de corteza.
- 3.- Se pesa de nuevo la porción de ensayo sin corteza.
- 4.- Se pesa la corteza por separado.

### **Cálculo:**

El porcentaje de corteza se calcula del siguiente modo:

$$\% \text{ Corteza} = (\text{Masa corteza} / \text{Masa muestra}) \times 100$$

## **b) Características físicas**

### **b1) Contenido en humedad**

La metodología a seguir es la misma que la descrita en el apartado 3.4.1.3. *Ensayos de laboratorio. b) Contenido en humedad*

**Procedimiento:** EN 14774. Biocombustibles sólidos. Métodos para la determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa.

### **b2) Densidad a granel**

La densidad a granel ("*bulk density*") es un parámetro importante para los suministros de combustible en base al volumen. Junto con el poder calorífico determina la densidad energética y permite estimar las necesidades de espacio de almacenamiento y transporte.

**Procedimiento:** EN 15103. *Determinación de la densidad a granel*

**Materiales:**

- Muestra de pellets > 1g
- Recipiente pequeño de forma cilíndrica fabricado de un material resistente a los golpes y de superficie lisa. Resistente a la deformación para prevenir cualquier variación en la forma y el volumen. Su capacidad es de 5l (0,005m<sup>3</sup>)
- Balanza de precisión SARTORIUS modelo ED 1245, con una precisión de 0,1 g (ver Figura 57).

**Principio del método:** La porción de ensayo se mete en un recipiente normalizado de un tamaño y forma dados y se pesa. La densidad a granel se calcula a partir del peso neto por volumen normalizado.

**Procedimiento de medida:**

- 1.- Se pesa el recipiente vacío, limpio y seco.
- 2.- Se llena el recipiente vertiendo el material de la muestra desde una altura de 200-300mm por encima del borde superior hasta que forme un cono de la máxima altura posible.
- 3.- Se sacude el material hasta que se asienta y se vuelve a rellenar hasta que alcanza la marca de 5 l graduada.
- 4.- Se pesa el recipiente con la muestra.
- 5.- Se replica el procedimiento
- 6.- Se determina el contenido en humedad de la muestra según se recibe según las Normas 14774-1 y 14774-2 inmediatamente después de la determinación de la densidad a granel

**Cálculo:**

El cálculo de la densidad a granel ( $BD_{ar}$ ) se realiza conforme a la siguiente ecuación:

$$BD_{ar} (a M_{ar}) = (m_2 - m_1) / V$$

donde,

- $m_1$  es la masa, en kilogramos, del recipiente vacío;
- $m_2$  es la masa, en kilogramos, del recipiente y la muestra;
- $V$  volumen del recipiente en m<sup>3</sup>.



El resultado de cada medición se aproxima a  $0,1\text{kg}/\text{m}^3$ .

### c) Características mecánicas

#### c1) Durabilidad mecánica

La durabilidad es la medida de la resistencia de los combustibles densificados a los golpes y/o abrasión como consecuencia de los procesos de manejo y transporte.

**Procedimiento:** EN 15210-1. *Determinación de la durabilidad mecánica de pellets y briquetas. Parte 1: Pellets.*

#### Materiales:

- Muestra de pellets  $\geq 2,5$  kg.
- Aparato de ensayo de pellets (durabilímetro). En este caso de la marca Pellet Durability Tester Bioenergy TUMBLER Series (ver Figura 74).
- Balanza PCE WS 300 con una capacidad de pesada de 2 kg y capaz de medir la masa con una aproximación 1g de precisión (ver Figura 75).
- Tamiz de 3 mm de diámetro y adecuado para el cribado manual según la Norma ISO 3310-2.



Figura 74. Durabilímetro



Figura 75. Balanza PCE

**Principio del método:** La muestra de ensayo se somete a golpes controlados mediante la colisión de los pellets entre ellos mismos y contra las paredes de una cámara de ensayo rotatoria definida. La durabilidad se calcula a partir de la masa de la muestra que queda después de la separación de las partículas finas erosionadas y rotas.

**Preparación de la muestra:** Se toma una muestra de tamaño mínimo de 2'5 kg. Mediante un cribado manual se separan las partículas que pasan por el tamiz de 3 mm.

#### **Procedimiento operatorio:**

- 1.- Generalidades: se deben llevar a cabo un mínimo de dos determinaciones en la muestra de ensayo
- 2.- Procedimiento de volteo: Se toma una porción de ensayo de (500±10) g. Se coloca la muestra de ensayo de los pellets tamizados, pesada con una aproximación de 0,1 g en el dispositivo de la caja rotatoria. Se deja dar vueltas durante 10 minutos. Después de ese tiempo, la muestra se saca y se pasa manualmente por un tamiz.
- 3.- Procedimiento de cribado: El cribado se debe realizar de modo que se separen los finos, pero evitando la formación de nuevos finos. Esto generalmente se consigue cuando una porción de muestra de 0,5 kg. se agita entre cinco y diez movimientos circulares sobre el tamiz.

El cribado se tiene que realizar completamente. Se debe pesar la muestra que queda en el tamiz. Se debe calcular el porcentaje de pellets completos (partículas que quedan en el tamiz). La durabilidad de los pellets se define de acuerdo con el próximo punto.

#### **Cálculo:**

La durabilidad mecánica de los pellets se debe calcular utilizando la siguiente ecuación:

$$D_U = (m_A / m_E) \times 100$$

donde,

- $D_U$  es la durabilidad mecánica, en porcentaje;
- $m_E$  es la masa de los pellets pre-cribados antes del tratamiento de volteo, en gramos;
- $m_A$  es la masa de los pellets cribados después del tratamiento de volteo, en gramos.

El resultado se debe calcular con dos decimales y el resultado medio se debe redondear al 0,1% más próximo.

### **c2) Cantidad de finos**

**Procedimiento** EN 15149-2 *Biocombustibles sólidos. Métodos para la determinación de la distribución del tamaño de partícula. Parte 2: Método del tamiz vibrante con apertura de malla inferior o igual a 3,15 mm.*

#### **Materiales:**

- Muestra de pellets  $\geq 50$  g.
- Equipo de vibración mecánico para tamices marca CISA modelo R0200N(0,45 kW).
- Tamiz de malla  $\leq 3,15$  mm.
- Bandejas colectoras.
- Balanza precisión PCE WS 300 con una capacidad de pesada de 2 kg y capaz de medir la masa con una aproximación 1g de precisión.

**Principio del método:** Se somete una muestra a un cribado a través de tamices vibrantes, clasificando las partículas en clases de tamaño decreciente por medios mecánicos.

**Preparación de la muestra:** Se toma una muestra igual o mayor de 50 g con una humedad inferior al 20% en base húmeda muestreada según el proyecto de norma prEN 14778.

#### **Procedimiento operatorio:**

- 1.- Se monta y opera el dispositivo de vibración mecánico con el tamaño de tamiz adecuado con los tamaños de abertura de malla decreciente y acabando en un recogedor.
- 2.-Se pesa la muestra aproximando a 0,1g.
- 3.-Se esparce la muestra en el tamiz superior y se empieza la operación de cribado. La operación debe continuar hasta que los cambios de masa entre dos tamices secuenciales no superen un máximo de 0,3% de la masa total durante 1 minuto de operación.

4.-Se pesa el material contenido en cada tamiz (en este caso el de 3,5mm) y en el recogedor con una exactitud de 0,01g.

**Cálculo:** A partir de este dato se calcula el porcentaje de finos sobre la muestra de origen que tiene el material.

$$F = m_A / m_E \times 100$$

donde,

$M_A$  Masa (g) de los finos después del ensayo.

$M_E$  Masa total (g) de muestra antes del ensayo.

#### d) Características químicas

##### d1) Contenido en cenizas

La metodología a seguir es la misma que la descrita en el apartado 3.4.1.3. *Ensayos de laboratorio c) contenido en cenizas*, pero en este caso en lugar de astillas se ensayan los pellets elaborados (ver Figura 76).

**Procedimiento:** EN 14775. *Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del contenido en cenizas* (ver Figura 76).



**Figura 76. Muestra y molienda de la muestra sobre crisol de ensayo.**

## d2) Contenido en cloro y azufre

El azufre y el cloro están presentes en los biocombustibles en concentraciones variables. Durante el proceso de combustión se convierten por lo general en óxidos de azufre y cloruros. La presencia de estos elementos y sus productos de reacción pueden contribuir significativamente a la corrosión y a las emisiones perjudiciales para el medio ambiente. Según Alakangas (2005) el cloro puede producir corrosiones en calderas y calderas de vapor a más de 480<sup>o</sup> de temperatura, temperaturas que no se suelen alcanzar en calderas pequeñas.

**Procedimiento:** UNE-EN 15289. *Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido total de azufre y cloro.*

### **Materiales:**

- Muestra de pellets > 1g.
- Bomba calorimétrica PARR, modelo 1351.
- Balanza de precisión PCE WS 300 de 0,001g.
- Equipamiento general de laboratorio (matraces aforados, probetas, etc).

**Principio del método:** Se ha empleado el ensayo de bomba calorimétrica (método A según EN 15289, combustión en una bomba cerrada). En él, las muestras en forma de pellets se queman mediante el mismo método utilizado para la determinación del poder calorífico.

**Procedimiento operatorio:** Se calibra la bomba calorimétrica con una solución de ácido benzoico certificado. Se quema una muestra de pellets bajo condiciones normalizadas, a volumen constante, en una atmósfera de oxígeno. Después de la combustión se libera lentamente la presión antes de abrir la bomba. Se transfiere la disolución absorbente a un matraz aforado. Los resultados se deben expresar como media de determinaciones por duplicado.

### **Cálculo:**

-Cloro

$$w_{Cl, d} = \frac{(c - c_0)}{m} * 100 * \frac{100}{(100 - Mad)}$$

donde,

$c$ , es la concentración de cloruro en la disolución mg/l.

$c_0$ , es la concentración de cloruro en el ensayo en blanco en mg/l.

$V$ , es el volumen de la disolución en l.

$m$ , es la masa de la porción de ensayo utilizada en mg.

$M_{ad}$ , es el contenido en humedad de la muestra de ensayo en %m/m.

-Azufre:

$$w_{S, d} = \frac{(c - c_0) * V}{m} * 0,3338 * 100 * \frac{100}{(100 - Mad)}$$

donde,

$c$ , es la concentración de sulfato en la disolución mg/l.

$c_0$ , es la concentración de sulfato en el ensayo en blanco en mg/l.

$V$ , es el volumen de la disolución en l.

$0,3338$ , es la relación estequiométrica de las masas molares relativas de azufre y de sulfato.

$m$ , es la masa de la porción de ensayo utilizada en mg.

$M_{ad}$ , es el contenido en humedad de la muestra de ensayo en %m/m.

### e) Característica energética: poder calorífico

La metodología a seguir es la misma que la descrita en el apartado 3.4.1.3. *Ensayos de laboratorio d) poder calorífico*. Sin embargo, en este caso en lugar de sobre astillas se determina sobre los pellets elaborados.

**Procedimiento:** EN 14918. *Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del poder calorífico*.

### 3.4.2.6. Análisis de las variables

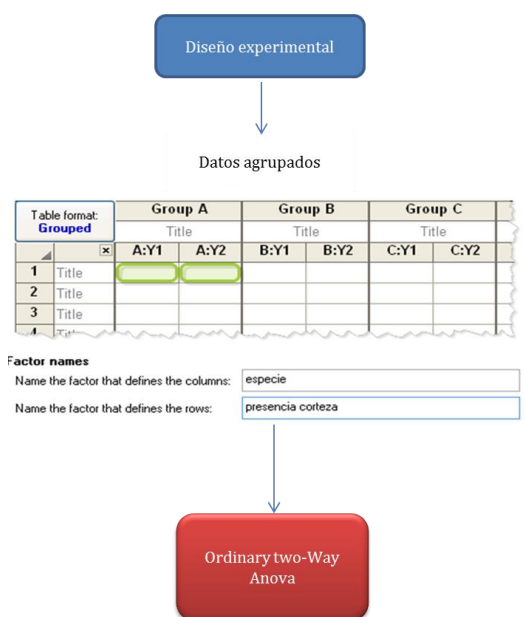
En primer lugar se estudia cómo los factores tipo de especie, la fracción del árbol (clase diamétrica o ramas) y la presencia o no de corteza influyen sobre los resultados obtenidos para cada variable de ensayo (contenido en humedad, cenizas, densidad a granel, durabilidad, cantidad de finos, cloro, azufre, poder calorífico y porcentaje de corteza).

Para ello se realiza un análisis estadístico, *Ordinary Two-way ANOVA*, non repeated measures, a través del software GraphPad Prism que determina como una respuesta, en este caso, los valores resultado para cada variable de ensayo, puede venir afectada por dos factores de estudio. La variabilidad se divide en cuatro componentes, la variabilidad debida a la interacción de los factores, la variabilidad debida a un factor estudiado (columnas), la variabilidad debida al otro factor estudiado (filas), y la variabilidad residual.

Se estudian dos a dos los factores especie frente a presencia o no de corteza (análisis “especie” vs. “presencia de corteza”, y la especie frente a la fracción de árbol (clase diamétrica y ramas; “especie” vs. “fracción”). De existir diferencias debidas a unos u otros factores, se estudiarán en más detalle.

Para el caso de la variable de ensayo porcentaje de corteza, al tener sólo cuatro valores resultados se realiza un t-test entre los dos valores correspondientes al *Pinus halepensis* y los dos correspondientes al *Pinus pinaster* pero para realizar un análisis complementario de “especie” vs. “fracción” se realiza un *Two-way ANOVA*.

La Figura 77 muestra la elección del análisis estadístico pertinente según la variable estudiada.



**Figura 77. Tipo de análisis estadístico para estudiar la variabilidad de los resultados.  
Fuente: elaboración propia.**

Por otra parte en vista de los resultados estadísticos obtenidos y en base a relaciones observadas por otros autores, se evalúa mediante análisis de regresión la posible relación entre las siguientes variables:

- Porcentaje de corteza y contenido en cenizas
- Durabilidad mecánica y porcentaje de corteza.
- Durabilidad mecánica y cantidad de finos.
- Cantidad de finos y porcentaje de corteza.

#### **3.4.2.7. Innovación: Posibles mezclas**

##### **a) Diseño del experimento**

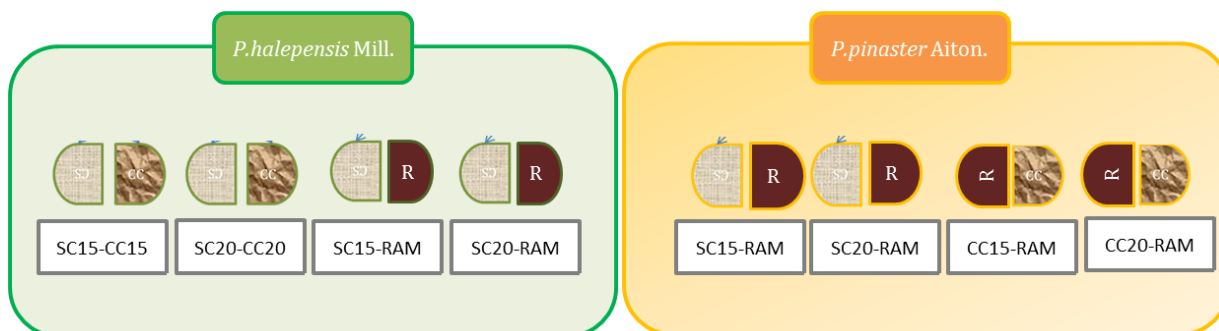
Con el fin de analizar y evaluar la calidad de diferentes mezclas de fracciones de las principales especies de coníferas presentes en la Provincia de Valencia, se ha diseñado un experimento por el que se plantea combinar distintas fracciones de las muestras de astillas para obtener pellets y observar su posible viabilidad a partir de los resultados, principalmente para el análisis de cenizas, considerado como un factor principal limitante de los pellets de alto valor añadido para su uso doméstico.

Como inicio de una investigación futura más amplia se parte de la combinación de distintas fracciones dentro de una misma especie de pino.

Se toma para cada especie de pino, la fracción más restrictiva en cuanto a cenizas según los resultados obtenidos. En este caso, en la Figura 78, se puede observar que las muestras que superan el límite de 0,7% de su peso en contenido en ceniza son las fracciones de cualquier clase diamétrica con corteza para el caso de *Pinus halepensis* y las ramas de ambas especies, *Pinus halepensis* y *Pinus pinaster*.

Así pues las mezclas planteadas vienen reflejadas en la Figura 78.





**Figura 78. Mezclas de astillas para elaboración de pellets. Fuente: elaboración propia.**

### b) Cálculo de porcentajes

Para el cálculo del porcentaje de material que se tendría que añadir de cada componente de la mezcla, se calcula el porcentaje sobre 1 kg de pellets, tomando como cenizas el porcentaje obtenido resultado de los ensayos para cada fracción de componente. La cantidad de material de cada fracción se halla despejando el siguiente sistema de ecuaciones:

$$CC+SC=1$$

$$\%cenizas\ CC * CC + \%cenizas\ SC * SC = 0,7$$

donde,

CC, es la cantidad (kg) de astillas de biomasa con corteza (bien sea de las muestras de astillas con corteza o de ramas).

SC, es la cantidad (kg) de astillas de biomasa sin corteza, o con corteza en el caso que esta fracción posea menos corteza que su complementaria (caso de astillas de *Pinus pinaster* con corteza frente a ramas).

De este modo se obtienen unas cantidades que se traducirán a porcentajes para ver las mezclas que se han de realizar para la elaboración de los pellets. Las cantidades se redondean por aproximación al porcentaje superior más cercano en escala de cinco unidades.

**c) Preparación pellets de material mezclado**

Para la preparación de los pellets se sigue todo el procedimiento detallado en el apartado 3.4.2.1. *Proceso de fabricación de pellets* con la salvedad de que se toma como material de partida dos fracciones de biomasa diferentes para cada muestra en los porcentajes resultados del anterior cálculo. Se preparan dos muestras para cada mezcla con el fin de tener replicabilidad en los resultados de los ensayos.

**d) Ensayos**

Una vez elaborados los pellets se ensaya su humedad y su contenido en cenizas según normativa (EN 14775) para conocer de manera empírica la cantidad de cenizas que contiene cada mezcla.

# CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

## 4.1. Planificación

### 4.1.1. Existencias de biomasa

#### 4.1.1.1. Estimación de existencias totales de biomasa forestal (BF)

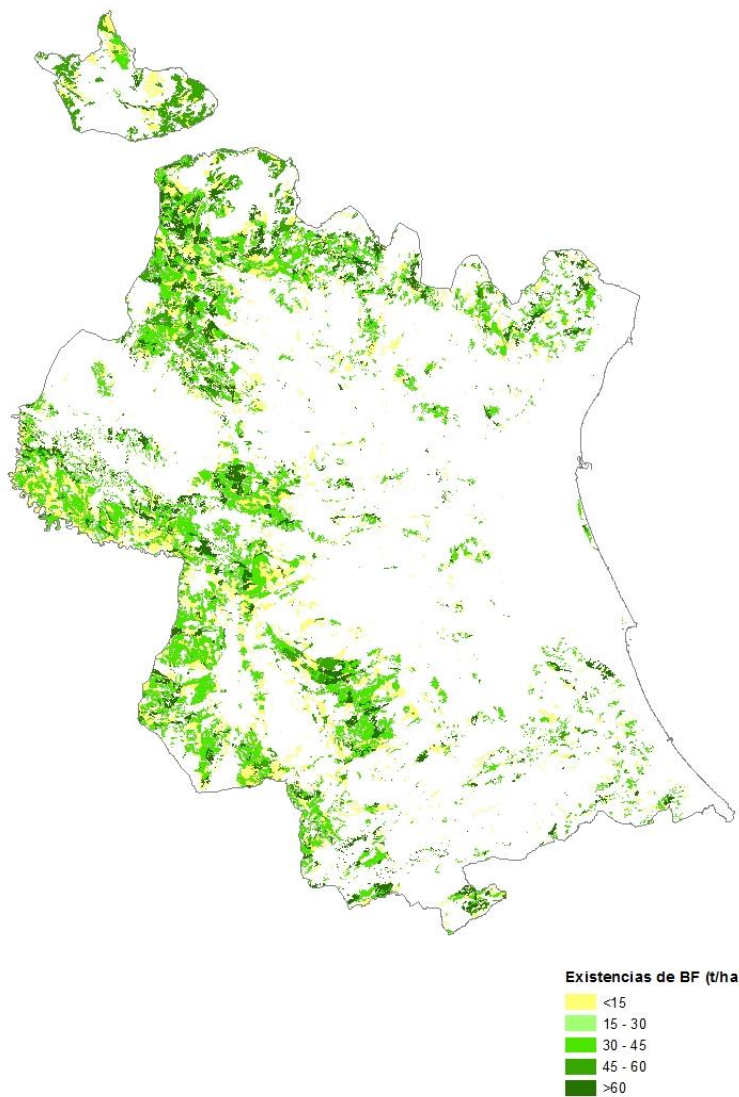
Las existencias totales de biomasa arbórea (BF) en la Provincia de Valencia son el resultado de la suma de toda la biomasa total de cada especie para todas las teselas de la Provincia de Valencia (13.668 teselas) y se expresan en toneladas de biomasa seca. En la Tabla 30 se muestran los resultados obtenidos, entorno a nueve millones de toneladas de biomasa procedente de pies mayores y casi 1 millón de toneladas procedente de pies menores, lo que suman un total de casi diez millones de toneladas. Esto supone una media de 28,26 t/ha.

**Tabla 30. Estimación de existencias totales de biomasa forestal (BF).**

	Existencias BF		
	Pies mayores	Pies menores	Total
t	9.161.226,98	756.110,25	<b>9.917.337,23</b>
t/ha	26,10	2,15	<b>28,26</b>

En un estudio realizado sobre la Provincia de Cadiz (2012), los resultados indican unas existencias en biomasa de 5.810.844 t, lo que se traduce en unas 37t/ha para esta provincia, resultados algo mayores que los obtenidos. Las diferencias se deben a las condiciones climáticas, edafológicas y orográficas de cada región.

La Figura 79 muestra la distribución en la concentración de existencias totales de biomasa forestal en la Provincia de Valencia. Como se puede observar las mayores concentraciones se dan en las zonas forestales montañosas del interior de la Provincia de Valencia.



**Figura 79. Existencias de biomasa forestal (BF) en la Provincia de Valencia (t/ha).**

#### **4.1.1.2. Estimación de biomasa residual forestal (BRF)**

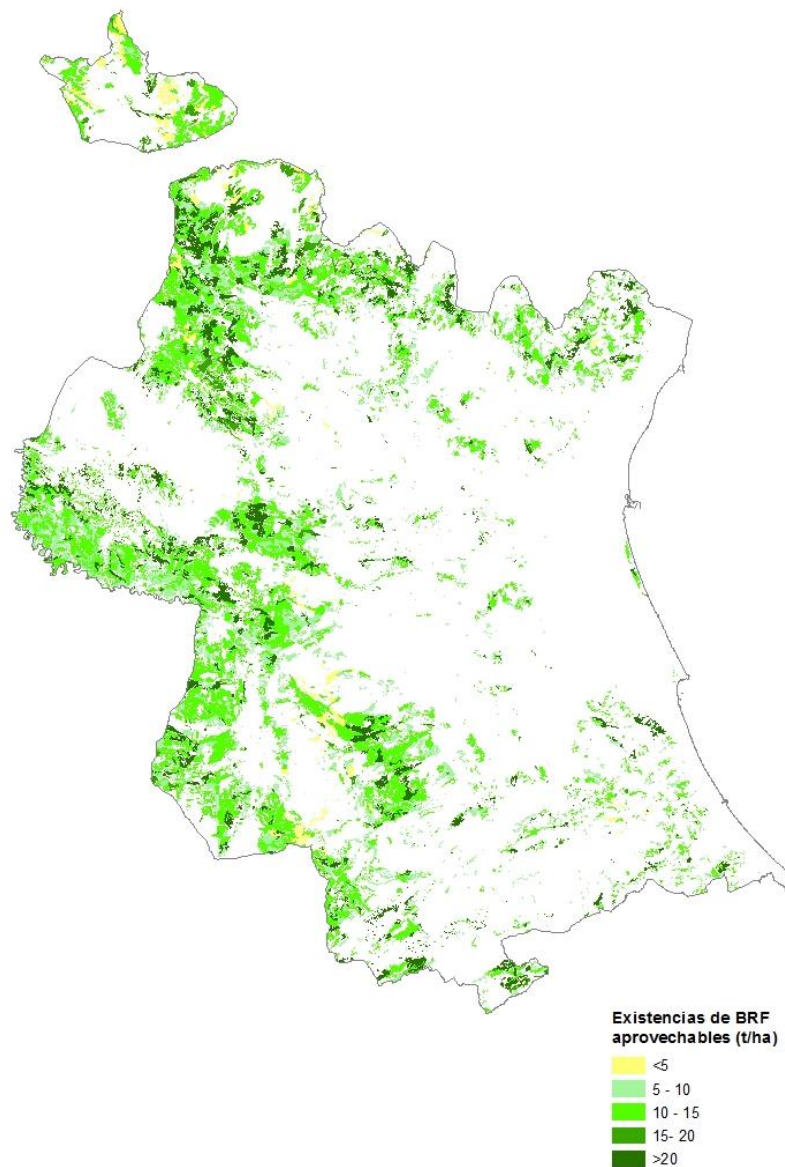
En cuanto a BRF, se contabilizan como BRF procedente de pies mayores todas las masas de latizal con un DAP menor de 23 cm y las ramas de los fustales, lo que da un total de en torno a 3 millones de toneladas. La BRF procedente de pies menores genera entorno a 300.000 t, sumando entre ambas un total de 3,5 millones de toneladas, unas 10 t/ha de media sobre el territorio forestal (ver Tabla 31).

**Tabla 31. Estimación de existencias de biomasa residual forestal (BRF).**

	Existencias de BRF		
	Pies mayores	Pies menores	Total
t	3.185.780,80	288.205,98	<b>3.473.986,77</b>
t/ha	9,08	0,82	<b>9,90</b>

Comparando la BF con la BRF se puede observar que según los resultados la BRF supone un 35% de la totalidad de la biomasa arbórea existente en la Provincia de Valencia.

Los resultados obtenidos por MMAMRMM (2010) indican unas existencias de 2.224.853 t anhidras para la Provincia de Valencia lo que supone casi 1 millón de toneladas menos que las estimadas en el presente estudio. Esto se debe a diferencias en las consideraciones tomadas en la metodología seguida para la estimación. El caso de MMAMRMM (2010) sólo se consideran aprovechables aquellas teselas con fracción de cabida cubierta total (arbórea y de matorral conjuntas) mayor del 75% (por consideraciones de rentabilidad y procesos erosivos) mientras que en el presente caso se consideran todas las teselas con fracción de cabida cubierta mayor de 20%, lo que hace que la cantidad de BRF calculada sea mayor en la presente investigación.



**Figura 80. Existencias de biomasa forestal residual (BRF) en la Provincia de Valencia (t/ha).**

La Figura 80 muestra la distribución de la concentración de la BFR en la Provincia de Valencia. De nuevo, se puede observar una mayor concentración de biomasa en el interior de la Provincia y en las cadenas montañosas, con la salvedad de que existen menores cantidades de BRF respecto a BF (ver Figura 79) y zonas homogéneas de mayor extensión debido a los criterios y restricciones principalmente de pendiente tomadas para el cálculo de BRF.

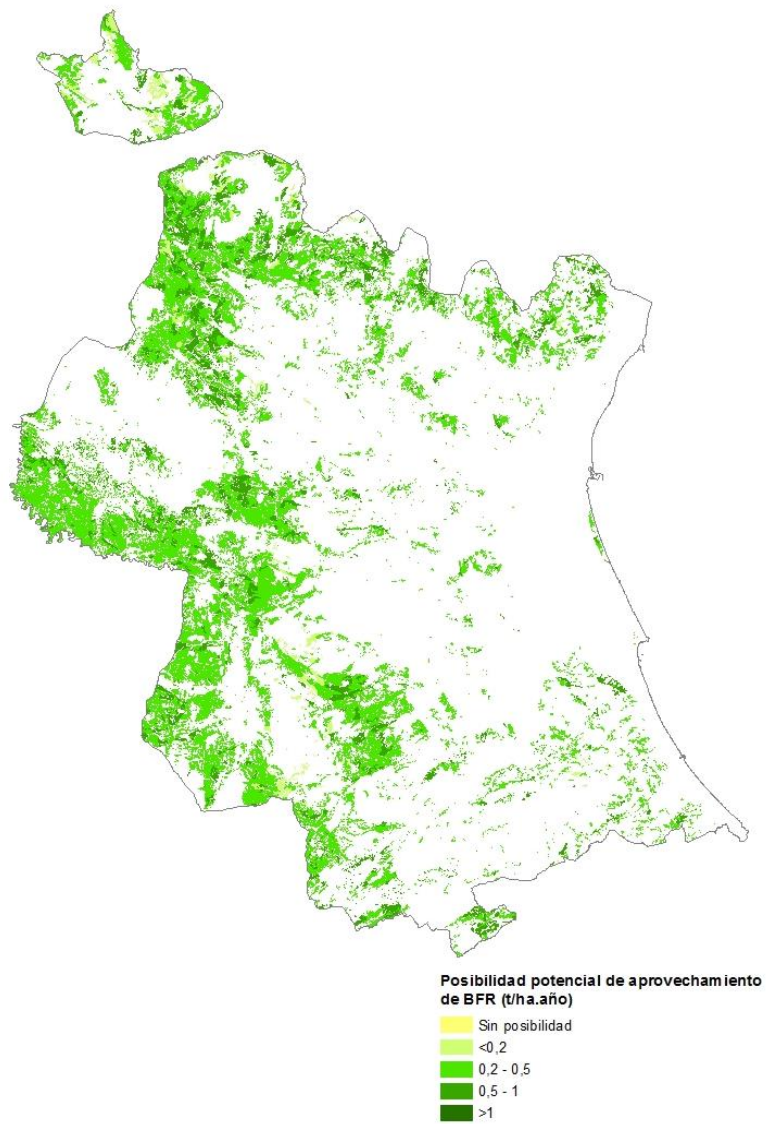
## 4.1.2. Potencial de biomasa forestal y agrícola residual

### 4.1.2.1. Posibilidad anual de biomasa residual forestal (BRF)

De la fracción de BRF, anualmente se podrían aprovechar potencialmente en torno a 120.000 toneladas en toda la Provincia de Valencia (aproximadamente 0,5 t/ha.año). No obstante, teniendo en cuenta las restricciones técnicas y ecológicas descritas en el Apartado 3.1.3.1., la posibilidad de BRF se sitúa entorno a 70.000 t/año, lo que se traduce de media en 0,3 t/ha.año. Esto supone un aprovechamiento en torno al 60% de la posibilidad anual potencial. Las Figuras 81 y 82 muestran la posibilidad potencial y real obtenida para cada una de las teselas forestales de la Provincia de Valencia.

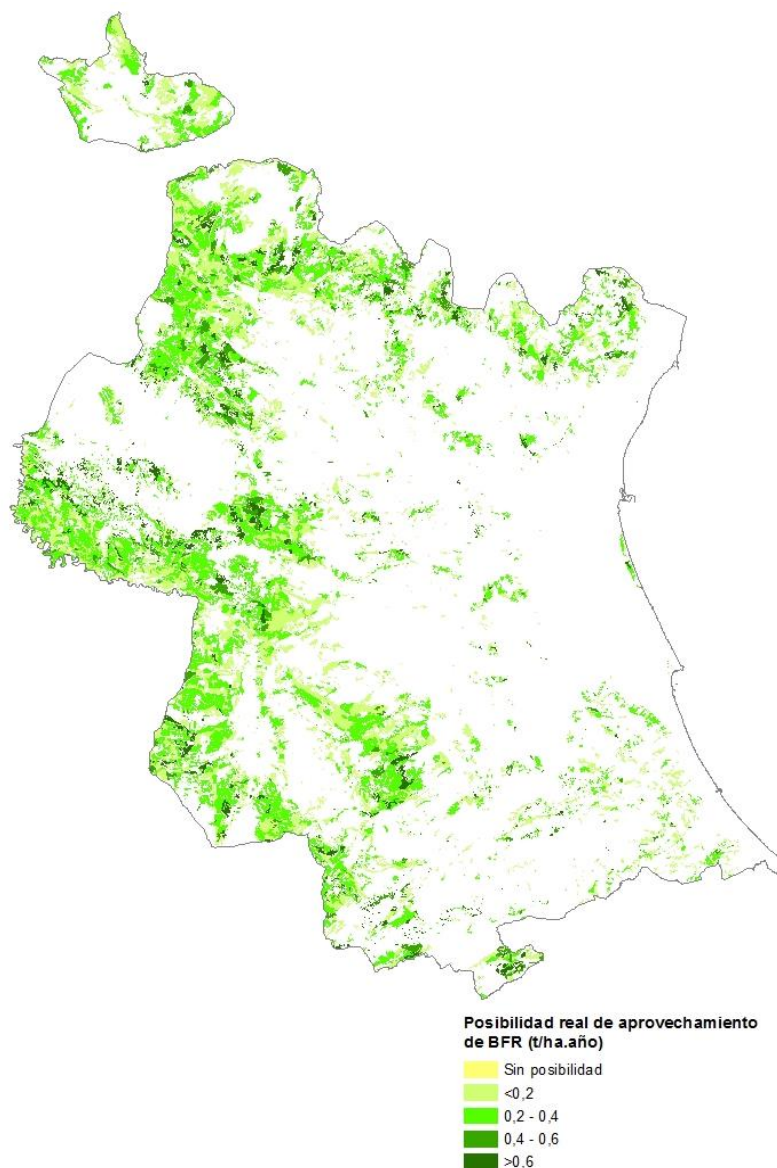
**Tabla 32. Posibilidad de aprovechamiento potencial y real de biomasa residual forestal**

	Posibilidad de BRF			Real
	Potencial		Total	
	Pies mayores	Pies menores	Total	Total
t/año	97.671,55	21.359,79	<b>119.031,34</b>	<b>69.377,06</b>
t/ha.año	0,39	0,08	<b>0,47</b>	<b>0,28</b>



**Figura 81. Posibilidad potencial de biomasa forestal residual (BRF) en la Provincia de Valencia (t/ha.año).**





**Figura 82. Posibilidad real de aprovechamiento de biomasa forestal residual (BRF) en la Provincia de Valencia (t/ha.año).**

El PATFOR (2012) obtiene para la Provincia de Valencia una media de 0,2 t/ha.año de posibilidad de biocombustibles, valor que se aproxima mucho al obtenido en el presente estudio. Por otra parte, en un estudio realizado por Delgado y Giraldo (1995) en la Comunidad de Castilla y León, obtienen una cantidad de biomasa residual potencial para toda la Comunidad de 705.600 t/año, lo que se traduce en unas 0,45 t/ha.año. Este valor por ha es muy similar al obtenido para la Provincia de Valencia (0,47 t/ha.año).

IDAE (2011a) estima en 273.457 t/año la cantidad de BRF real que se podría aprovechar en toda la Comunitat Valenciana teniendo en cuenta restricciones técnicas y ecológicas. Cabe señalar que se trata en este caso de toneladas a un 45% de humedad, lo que teniendo en cuenta condiciones anhidras, se reduciría esta cantidad a 150.402 t/año para toda la

Comunidad. No se especifica la cantidad de biomasa tan sólo para la Provincia de Valencia. Sin embargo, en MMAMRMM (2010) se obtiene una BRF arbórea real de 76.302 t/año para la Provincia de Valencia, que expresada en superficie aprovechable se traduce a 0,37 t/ha.año. Aunque la diferencia no es muy elevada, esta se debe a que tanto IDAE (2011a) como MMAMRMM (2010) utilizan variables de itinerarios selvícolas y coeficientes de cortas anuales para el cálculo de la BFR procedente de trabajos selvícolas y aprovechamientos que agrupa distintas comunidades autónomas. En el caso del presente estudio no se tuvieron en cuenta trabajos selvícolas ficticios si no tan sólo la cantidad de biomasa residual forestal que se encuentra en el monte en pie con un turno de corta, sin aplicar tratamientos selvícolas y por tanto no se prevee el nuevo crecimiento de ramas con el tiempo y nueva corta como se hace a través de los itinerarios, hecho que aumenta las cantidades de biomasa estimadas.

Rigola y Bartrolí (2005) calculan en 246.000 t/año la biomasa residual forestal real para toda la Comunidad de Cataluña, lo que se traduce en 0,28 t/ha.año. Pese a la diferencia de Comunidades, el valor coincide exactamente con el obtenido en el presente estudio y podría señalar un valor medio para los bosques mediterráneos del este peninsular.

Por otra parte, CIRCE (2006) obtuvo unas 140.000 t/año de biomasa potencial para la Provincia de Huesca, traducida en 72.836 t/año para el caso de BRF real. En este caso, el porcentaje de utilización real de la biomasa es del 52%, valor algo menor al de 58% de aprovechamiento en la Provincia de Valencia.

#### 4.1.2.2. Existencias y posibilidad de biomasa residual agrícola

En cuanto a las existencias y posibilidad de BRA ambas coinciden al asumir podas anuales de cada especie mediante la inclusión del ratio de residuos generado anualmente por ha de cultivo. La Tabla 33 muestra que la media los residuos aprovechables anualmente son de 2,66 t/ha y de 642.000 t/año (teniendo en cuenta un contenido en humedad del 40%) sobre todo el territorio de cultivos leñosos de la Provincia de Valencia.

**Tabla 33. Posibilidad de aprovechamiento potencial y real de BRA.**

Superficie de cultivo			BRA (40%H)	
Secano	Regadío	ha totales	t/año	t/ha.año
116.044	125.415	241.459	<b>641.996</b>	<b>2,66</b>

IDAE (2011a) obtiene 2.223.407 t/año de biomasa procedente de cultivos leñosos a un 45% de humedad para toda la Comunitat Valenciana.

Rigola y Bartrolí (2005) calculan en 600.000 t/año la cantidad de BRA a 50% de humedad para toda Cataluña que se traduce en 1,72 t/ha.año, valor medio algo inferior al obtenido para la Provincia de Valencia.

CIRCE (2006) obtiene para la Provincia de Huesca un BRA de 61.547 t/año a 35% de humedad, lo que dista mucho del dato obtenido para la Provincia de Valencia.

Estas diferencias existentes entre el presente estudio y publicaciones de otros autores se pueden explicar debidas a los distintos coeficientes seleccionados para los cálculos a parte de las diferencias fundamentales en condiciones climáticas, edafológicas y orográficas que caracterizan cada región y por tanto las especies, extensión de cada una, marcos de plantación y productividad de cada cultivo leñoso.

#### 4.1.3. Zonas de gestión: distritos bioenergéticos

La Figura 83 muestra la BRF por municipios en la Provincia de Valencia, mientras que la Tabla 34 muestra los municipios que cumplen con el primer criterio de selección establecido en la Metodología (ver Apartado 3.1.4.3) de poseer de 1000t/año de posibilidad de BRF.

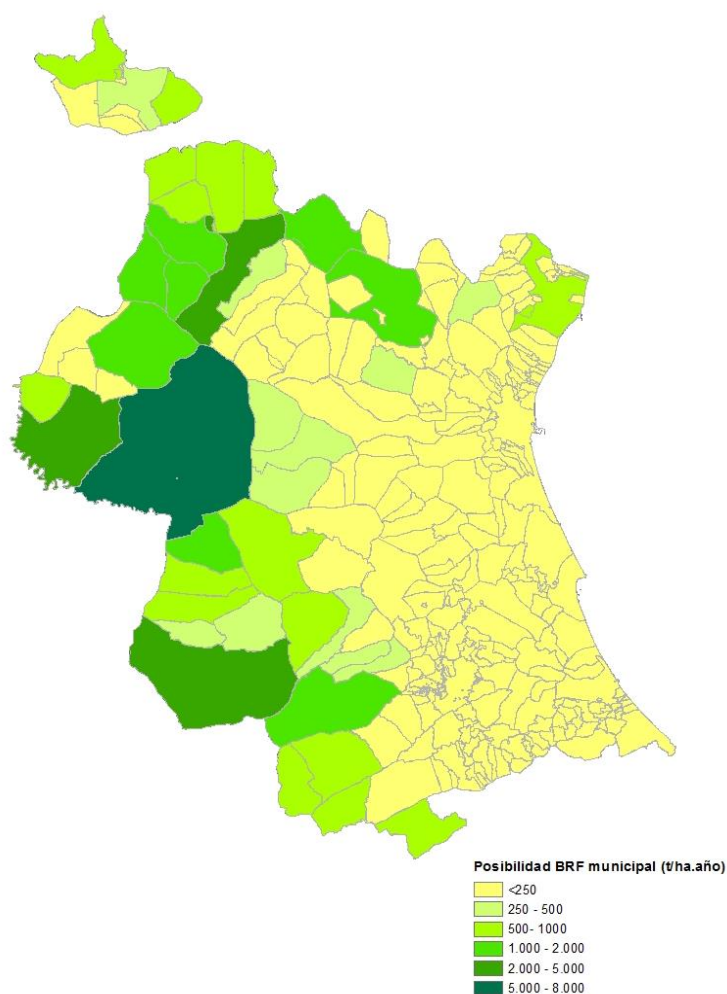


Figura 83. Mapa de potencialidad de BRF municipal en la Provincia de Valencia.

**Tabla 34. Listado de municipios con BRF > 1.000t/año.**

<b>Municipio</b>	<b>BRF (t/año)</b>
Requena	7.015,41
Ayora	4.334,36
Venta del Moro	3.257,44
Chelva	2.089,24
Utiel	1.736,93
Llíria	1.717,02
Sinarcas	1.529,09
Enguera	1.488,86
Tuéjar	1.432,23
Andilla	1.221,85
Benagéber	1.098,21
Cofrentes	1.048,01
Titaguas	999,27

Esta primera evaluación da una visión muy clara de la distribución de la potencialidad real de suministro de BRF en el conjunto del territorio de la Provincia de Valencia que se concentra principalmente en las zonas de interior, concretamente en 13 municipios: Requena, Ayora, Venta del Moro, Chelva, Utiel, Llíria, Sinarcas, Enguera, Tuéjar, Andilla, Benagéber, Cofrentes y Titaguas (por orden decreciente de cantidad de BRF). Hay que tener en cuenta que los grandes incendios forestales del verano de 2012 afectaron de forma muy grave al interior de la Provincia de Valencia, reduciéndose el potencial en municipios como por ejemplo Andilla.

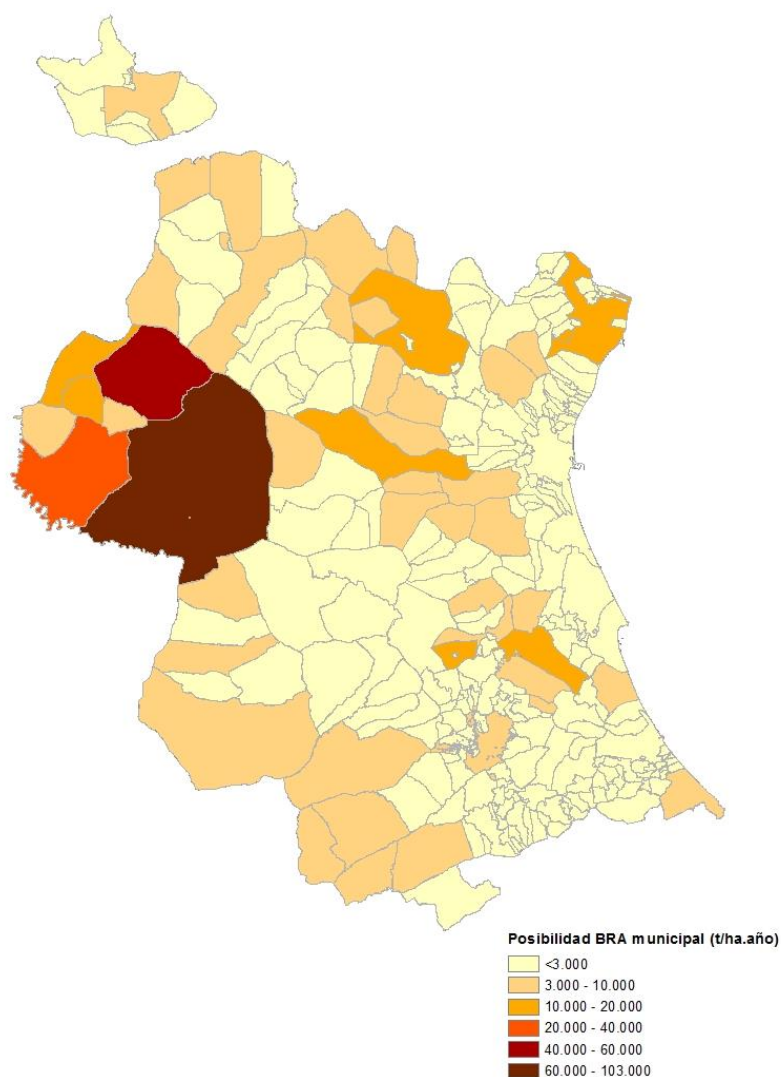
Una vez cumplido el primer criterio de selección de municipios, la Tabla 35 muestra los resultados de los municipios que cumplen con un potencial anual de BRF a nivel comarcal de más de 8.000 t/año. Este segundo criterio da una visión general del apoyo que pueden recibir estos municipios por el suministro de BRF de los otros municipios de su zona.

**Tabla 35. Listado de municipios con BRF comarcal > 8.000t/año.**

<b>Municipio</b>	<b>BRF (t/año)</b>	<b>Comarca</b>	<b>BRF Comarcal (t/año)</b>
Requena	7.015,41		
Venta del Moro	3.257,44	La Plana Utiel-	14.399,35
Utiel	1.736,93	Requena	
Sinarcas	1.529,09		
Chelva	2.089,24		
Tuéjar	1.432,23		
Andilla	1.221,85	Los Serranos	10.099,05
Benagéber	1.098,21		
Titaguas	999,27		
Ayora	4.334,36	La Vall d'Ayora	8.851,66
Cofrentes	1.048,01		

Se trata de 11 municipios situados en tres comarcas de interior entre cuyos municipios suman más de 8.000 t/año de potencialidad de BRF: La Plana de Utiel-Requena (Requena, Venta del Moro, Utiel y Sinarcas), Los Serranos (Chelva, Tuéjar, Andilla, Benagéber y Titaguas), El Valle de Ayora (Ayora y Cofrentes).

Por último, el tercer criterio de selección de municipios es el de que posean un potencial anual de BRA mayor de 3.000 t/año para permitir un apoyo del suministro de BRA a la instalación de una posible planta de aprovechamiento de biomasa. La Figura 84 muestra la cantidad de BRA por municipio en la Provincia de Valencia, mientras que los municipios que cumplen con este tercer criterio se reflejan en la Tabla 36.



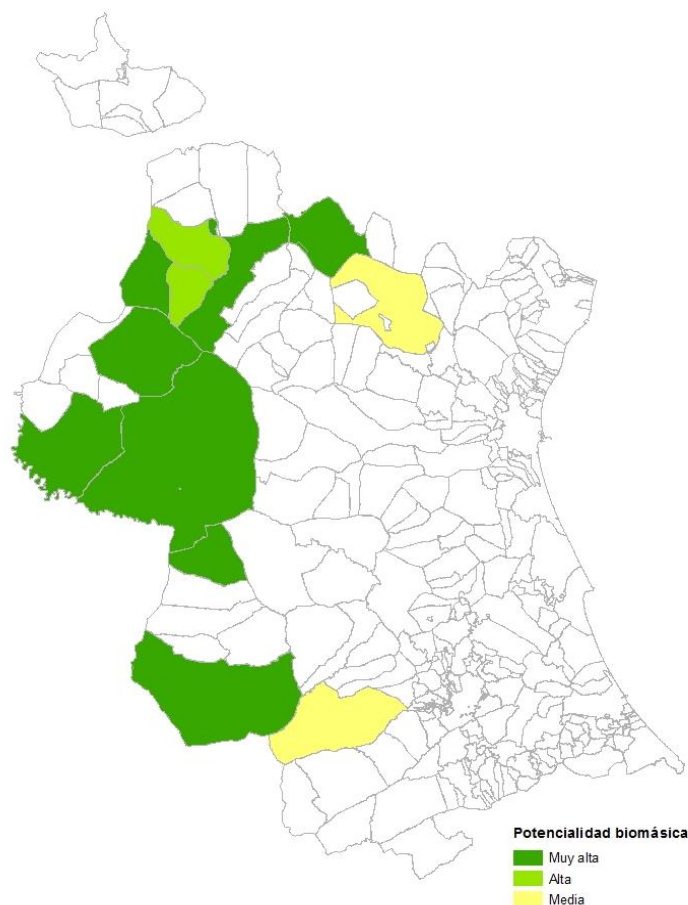
**Figura 84. Posibilidad de aprovechamiento de biomasa agrícola residual a nivel municipal (t/ha.año). Fuente: elaboración propia a partir de los límites administrativos recogidos en la cartografía ICV (2011).**

**Tabla 36. Listado de municipios con BRA > 3.000t/año.**

Municipio	BRF (t/año)	BRF Comarcal (t/año)	BRA (t/año)
Requena	7.015,41	14.399,35	102.791,50
Utiel	1.736,93	14.399,35	41.241,20
Venta del Moro	3.257,44	14.399,35	33.473,70
Sinarcas	1.529,09	14.399,35	6.556,30
Ayora	4.334,36	8.851,66	4.566,70
Cofrentes	1.048,01	8.851,66	4.270,40
Chelva	2.089,24	10.099,05	3.743,80
Andilla	1.221,85	10.099,05	3.565,80

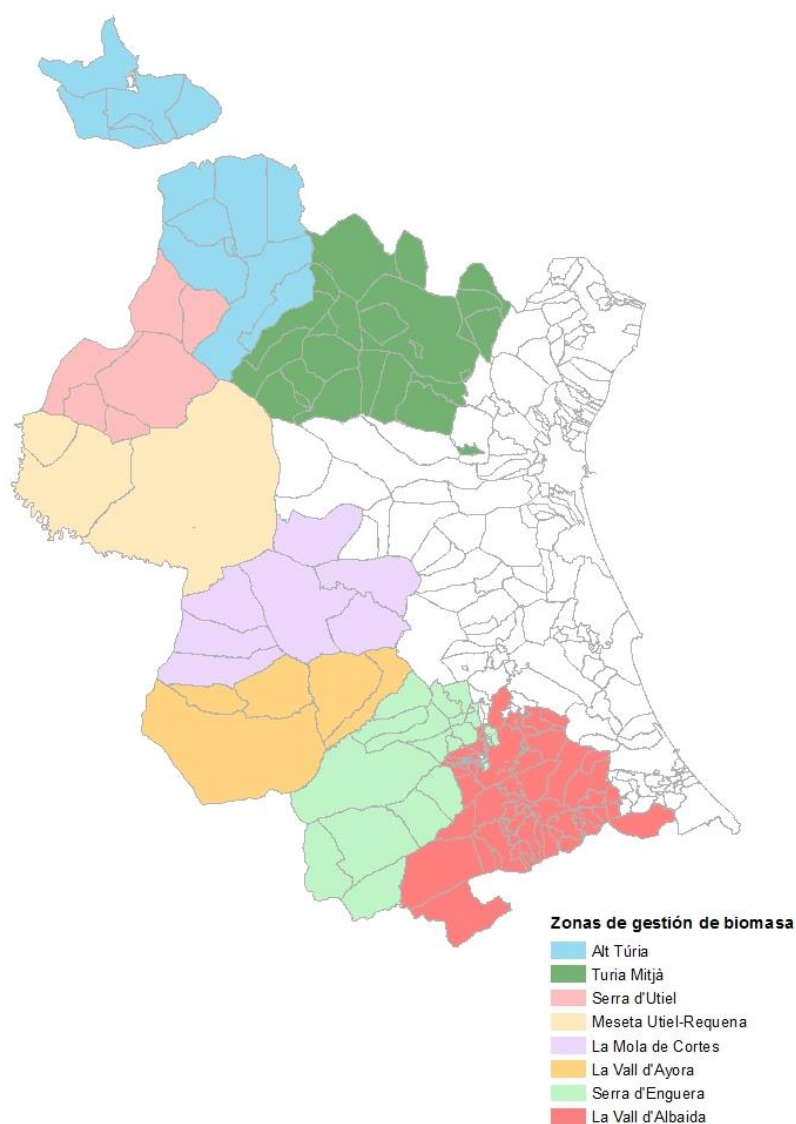
Se trata de ocho municipios: Requena, Utiel, Venta del Moro, Sinarcas, Ayora, Cofrentes, Chelva y Andilla.

De este modo, la Provincia de Valencia queda zonificada en municipios de media, alta y muy alta potencialidad biomásica según cumplan con el primer criterio, primero y segundo, o los tres criterios, respectivamente. La Figura 85 muestra estos resultados de forma gráfica.



**Figura 85. Mapa de municipios de interés para el aprovechamiento biomásico en la Provincia de Valencia.**

Una vez realizados los análisis previos de las condiciones básicas del suministro y de la distribución real de potencialidad de suministro a nivel municipal en el conjunto del territorio de la Provincia de Valencia, ésta queda zonificada en ocho áreas de gestión de biomasa forestal y agrícola como recurso energético. La Figura 86 muestra estos resultados de forma gráfica y en la Tabla 37 se indica la ubicación y la potencialidad de cada una de estas zonas. El nombre que toma cada zona de gestión intenta corresponder de modo aproximado al nombre de la comarca a la que pertenecen la mayoría de los municipios contenidos en ella. En en Anexo 2 se recoge información más detallada sobre cada una de ellas y sobre los municipios que las componen.



**Figura 86. Zonificación para el aprovechamiento biomásico en la Provincia de Valencia.**

**Tabla 37. Potencial de biomasa disponible para cada una de las plantas propuestas en sus zonas de gestión y suministro.**

Zona de gestión	Posible ubicación	BRF (t/año)	BRA (t/año)
Meseta Utiel-Requena	Venta del Moro	10.860,18	144.825,30
Alt Túria	Titaguas	8.788,06	29.533,40
Vall d' Ayora	Ayora	6.534,47	12.754,00
Túria Mitjà	Casinos	5.020,38	60.922,80
Serra d' Enguera	Enguera	4.955,61	46.673,90
Serra d' Utiel	Utiel	4.604,57	80.742,80
La Mola de Cortes	Cofrentes	4.094,73	15.296,70
Vall d' Albaida	Montaverner	1.858,38	47.092,90

#### 4.1.4. Directrices de gestión

A continuación se detallan las directrices de gestión integral de la biomasa con base forestal para unidades de gestión de la Provincia de Valencia en base al proceso de consultas realizado.

##### 4.1.4.1. Planificación del suministro de BRF y BRA

**Tabla 38. Directrices básicas y recomendaciones técnicas para la planificación del suministro de BRF y BRA.**

DIRECTRICES BÁSICAS	RECOMENDACIONES TÉCNICAS
1. Proyecto de ordenación forestal de la zona	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trabajo de campo para el reconocimiento del monte en la zona de gestión con el objeto de marcar los objetivos provisionales del proyecto de ordenación</li> <li>• Trabajo de investigación y gabinete para la recogida y análisis de información necesaria para la realización de la ordenación de los recursos en la zona de gestión</li> <li>• Zonificación ecológica a partir de fotografías aéreas y cartografía de la zona de gestión</li> <li>• Clasificación de los recursos de BRF existentes en la zona por calidades y dimensiones y por especie aprovechable</li> <li>• Establecimiento de los objetivos definitivos de la ordenación, siguiendo criterios de multifuncionalidad</li> <li>• Zonificación definitiva en unidades de gestión en la zona</li> <li>• Formación de las distintas unidades de aprovechamiento en gabinete y comprobación en campo</li> <li>• Redacción del proyecto de ordenación</li> </ul>



---

2. Planificación del suministro de BRF a la planta	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cálculo de la posibilidad real en cada una de las unidades de gestión de la zona ordenada</li><li>• Previsión del suministro anual y estacional para los próximos diez años (a revisar de forma conjunta a la ordenación) por unidades de gestión</li><li>• Evaluación mediante sistemas de información geográfica (SIG) de las mejores rutas y alternativas de transporte de cada una de las unidades de aprovechamiento a planta</li></ul>
3. Inventariación de la BRA y clasificación de recursos	<ul style="list-style-type: none"><li>• Trabajo de investigación y gabinete para la recogida y análisis de información necesaria para la inventariación de la BRA y la clasificación de los recursos en la zona de gestión</li><li>• Diseño y realización de un inventario exhaustivo de los recursos a pie de campo</li><li>• Delimitación de las unidades de gestión en campo, agrupando superficies por cultivos.</li><li>• Clasificación de los recursos de BRA existentes en la zona por calidades y dimensiones.</li><li>• Zonificación definitiva en unidades de gestión en la zona</li><li>• Formación de las distintas unidades de aprovechamiento en gabinete y comprobación en campo</li></ul>
4. Planificación de suministro de BRA a la planta	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cálculo real de la posibilidad anual de cada cultivo en cada una de las unidades de gestión</li><li>• Previsión del suministro anual y estacional para los próximos cinco años por unidades de gestión ( a revisar cada cinco años)</li></ul>

---

#### 4.1.4.2. Aprovechamiento de la BRF y de la BRA

**Tabla 39. Directrices básicas y recomendaciones técnicas para el aprovechamiento de BRF y BRA.**

DIRECTRICES BÁSICAS	RECOMENDACIONES TÉCNICAS
1. Análisis previo al aprovechamiento de la BRF en la zona de gestión	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tamaño y homogeneidad del aprovechamiento: se debe estimar un mínimo de 400 t verdes de biomasa para la realización de este aprovechamiento con astillado fijo para garantizar su rentabilidad</li> <li>• Carga de biomasa por hectárea: se consideran rentables los aprovechamientos cuando la carga de extracción es por encima de unas 50 t/ha</li> <li>• Cuantificación del matorral: en el caso de cortas a hecho, el matorral puede dificultar la visión de la base del tronco y el corte, así como puede producir un mayor desgaste de la maquinaria</li> <li>• Pedregosidad: la presencia de una elevada pedregosidad dificulta la mecanización del aprovechamiento (riesgo de colisión para el cabezal, puede dañar los elementos de corte, vuelco de la maquinaria, etc.)</li> <li>• Distancia de desembosque y cargadero: no deben ser excesivas y el cargadero debe tener espacio suficiente para no dificultar el trabajo. Además se deben evitar encharcamientos</li> </ul>
2. Planificación técnica anual del aprovechamiento de la BRF	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Decisión del destino de uso de la biomasa: combustión/gasificación o biocombustibles sólido para cada tipología de recursos en cada unidad de gestión</li> <li>• Procesado de la biomasa en monte cuando la distancia a planta supere los 15 kilómetros o cuando exista una elevada carga de biomasa por unidad de superficie</li> <li>• Sistema de aprovechamiento para biomasa forestal residual de aprovechamiento integral en fracción latizal: corta, procesado, recogida y apilado de fustes y ramas de árboles hasta 20 cm de DAP con motosierra y autocargador.</li> <li>• Sistema de aprovechamiento biomasa forestal residual derivada de tratamientos selvícolas o aprovechamientos forestales en fracción fustal: corta, procesado, recogida y apilado de residuos forestales procedentes de tratamientos selvícolas y aprovechamientos forestales con motosierra y autocargador.</li> </ul>
3. Análisis previo al aprovechamiento de la BRA en la zona de gestión y planificación técnica anual del aprovechamiento de la BRA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El tamaño mínimo de aprovechamiento y la carga de BRA por superficie será en función de la tipología del cultivo (olivo, almendro, vid, cítricos), edad y marco de plantación</li> <li>• El material de podado se debe concentrar en zonas de acopio accesibles</li> </ul>

- La carga de material en contenedores en cargadero se realiza mediante un apero cargador

#### 4.1.4.3. Logística de aprovisionamiento de la materia prima

**Tabla 40. Directrices básicas y recomendaciones técnicas para el aprovisionamiento de la materia prima.**

DIRECTRICES BÁSICAS	RECOMENDACIONES TÉCNICAS
1. Análisis previo a la logística y transporte de la BRF	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudio pormenorizado de costes logísticos sobre accesibilidad al monte, infraestructuras viales, grado de mecanización y recursos disponibles, métodos de aprovechamiento, recogida y transporte, distancia entre cargadero y planta en cada una de las unidades de gestión</li> </ul>
2. Preparación y dimensionamiento de cargaderos en monte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Preparación del cargadero: buena capacidad portante, superficie llana, evitar presencia de rocas y encharcamientos, localización en lugares donde puedan acceder camiones con tracción ordinaria</li> <li>• Dimensionamiento de los cargaderos: diseño adaptado para apilado de árboles enteros con anchura igual o mayor a la altura máxima de los árboles, en longitud hay que tener en cuenta la maquinaria auxiliar (astilladoras, camiones, etc.), altura de apilado no más de 2 metros para optimizar los trabajos de carga</li> </ul>
3. Transporte de BRF a planta	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hasta 5 km: transporte a fábrica con autocargador</li> <li>• De 5 a 15 km: transporte a fábrica con camión rígido</li> </ul>
4. Transporte de BRA a planta	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disposición de contenedores en camino a pie de campo</li> <li>• Hasta 15 km: transporte a fábrica con camión rígido</li> <li>• Para zonas de difícil acceso y hasta 5 km: transporte a fábrica con tractor agrícola.</li> </ul>

#### 4.1.4.4. Transformación energética en planta

**Tabla 41. Directrices básicas y recomendaciones técnicas para la transformación energética en planta.**

DIRECTRICES BÁSICAS	RECOMENDACIONES TÉCNICAS
1. Integración de facilidades instaladas en zonas de gestión definidas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En el caso de existir plantas ya instaladas se integrarán en el modelo de gestión</li> </ul>
2. Diseño y ejecución del proyecto de planta industrial de pellets	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zona de acopio: patio de maderas preferiblemente bajo cubierta y con suelo libre de encharcamientos y humedades con capacidad mínima de almacenamiento de 3.000 toneladas en madera en rollo larga, corta y en astilla.</li> <li>• Clasificación cualitativa y dimensional de la materia prima: clasificación por surtidos (calidad y dimensiones) de madera larga de coníferas, madera corta de coníferas, madera corta de frondosas, astilla de BRF de coníferas, astilla de BFR de frondosas, leñas de olivo, leñas de almendro, leñas de vid, leñas de cítricos, astilla de olivo, astilla de almendro, astilla de vid, astilla de cítricos y otras fuentes de biomasa residuales (reciclado)</li> <li>• Línea opcional de descortezado por herramientas motormanuales de cabezal vibrante, por anillo flotante o por tambor</li> <li>• Astillado: línea de astillado para coníferas (baja densidad) y línea de astillado para frondosas y cultivos agrícolas (alta densidad)</li> <li>• Secado: zona de oreo para astillas de coníferas (baja densidad) y de frondosas de origen forestal y agrícola (alta densidad) bajo cubierta</li> <li>• Refinado: línea de molino refinador para astilla de coníferas (baja densidad) y línea opcional de molino refinador para astilla de frondosas forestales y agrícolas (alta densidad)</li> <li>• Mezcla: tolvas para los diferentes tipos de astillas y mesa mezcladora, por cinta transportadora o por ciclón de flujo de aire</li> <li>• Pelletizado: línea de paletizado con extrusionadora flexible en presión, con matriz plana o circular de hasta 2.500 kg/hora</li> <li>• Enfriado: línea de enfriado del pellet por flujo de aire</li> <li>• Clasificación de pellets en tolvas para mínimo dos clases de calidad</li> <li>• Embalaje y almacenamiento: sistema de ensacado en sacos de Sacos 25 y 50 kg, Big-bags (grandes bolsas con aproximadamente 1.000 kg) y a granel, almacén de producto final bajo cubierta</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redacción del proyecto</li> <li>• Plan de inversión aproximado para planta de 6.000 toneladas/año: 1.500.000 €</li> <li>• Empleo directo en planta: 7 puestos de trabajo.</li> </ul>
3. Diseño y ejecución del proyecto de planta industrial de astillas para generación térmica/eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zona de acopio: patio de maderas preferiblemente bajo cubierta y con suelo libre de encharcamientos y humedades con capacidad mínima de almacenamiento de 5.000 toneladas en madera en rollo larga, corta y en astilla</li> <li>• Clasificación cualitativa y dimensional de la materia prima: clasificación por surtidos (calidad y dimensiones) de madera larga de coníferas, madera corta de coníferas, madera corta de frondosas, astilla de BRF de coníferas, astilla de BFR de frondosas, leñas de olivo, leñas de almendro, leñas de vid, leñas de cítricos, astilla de olivo, astilla de almendro, astilla de vid, astilla de cítricos y otras fuentes de biomasa residuales (reciclado)</li> <li>• Línea opcional de descortezado por herramientas motormanuales de cabezal vibrante, por anillo flotante o por tambor</li> <li>• Astillado: línea de astillado para coníferas (baja densidad) y línea de astillado para frondosas y cultivos agrícolas (alta densidad)</li> <li>• Secado: zona de oreo para astillas de coníferas (baja densidad) y de frondosas de origen forestal y agrícola (alta densidad) bajo cubierta</li> <li>• Línea de combustión o gasificación para generación de energía eléctrica (2MW), preferiblemente en un mínimo de dos motores/turbinas, subida a la red eléctrica</li> <li>• Redacción del proyecto</li> <li>• Plan de inversión aproximado para planta de 2 MW: 3.500.000 €</li> <li>• Empleo directo en planta: 7 puestos de trabajo.</li> </ul>

#### 4.1.4.5. Distribución y uso de la energía a nivel local/comarcal

**Tabla 42. Directrices básicas y recomendaciones técnicas para la distribución y uso de la energía a nivel local/comarcal.**

DIRECTRICES BÁSICAS	RECOMENDACIONES TÉCNICAS
1. Sustitución de calderas de diésel por calderas de pellets a nivel local/comarcal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudio de número de calderas de uso doméstico, agrícola e industrial en la zona de gestión y a nivel municipal</li> <li>• Estudio de número de calderas de uso doméstico, agrícola e industrial fuera de la zona de gestión (franja costera de la Provincia de Valencia) a nivel municipal</li> </ul>

---

	<ul style="list-style-type: none"><li>• Determinación de la sustitución de calderas diésel por calderas de pellets por tipología</li><li>• Propuesta de ayudas públicas a la sustitución de calderas de combustibles fósiles por pellets</li><li>• Plan comercial</li><li>• Servicio integral de sustitución de calderas y aprovisionamiento de pellets para clientes privados (uso doméstico, agrícola e industrial)</li></ul>
2. Diseño de un sistema de distribución de pellets a nivel local/comarcal y a mercados mayores	<ul style="list-style-type: none"><li>• Distribución del producto mediante sacos de 25-50 kg o big-bags</li><li>• Distribución del producto y descarga a granel mediante camiones cisterna</li></ul>
3. Servicio integral de aprovisionamiento energético a infraestructuras locales	<ul style="list-style-type: none"><li>• Convenio marco con Administraciones Locales para la implantación de calderas de pellets en edificios públicos (ayuntamiento, colegios y centros de formación, centros de salud, piscinas, centros de la tercera edad, bibliotecas, etc.)</li><li>• Plan de difusión y servicio de información al ciudadano y concienciación social sobre el uso de pellets de base forestal como energía renovable y alternativa y como motor del desarrollo sostenible de zonas de interior de la Provincia de Valencia</li></ul>

---

## 4.2. Parcelas representativas

Tras el análisis de los resultados obtenidos, el estrato tanto con mayor superficie forestal como con mayores existencias es el estrato 2, tal y como se puede observar en la Tabla 43.

**Tabla 43. Superficie total y existencias de biomasa arbórea (BF) por estratos de la Provincia de Valencia.**

Estrato	Sup. total (ha)	% sup.	nº teselas	Sup. media por tesela (ha)	BF (t)
1	39.041	11,13	1.291	30,24	1.078.905
<b>2</b>	<b>117.701</b>	<b>33,55</b>	<b>3.848</b>	30,59	<b>1.539.699</b>
3	55.057	15,70	2.978	18,49	278.020
4	46.920	13,38	1.366	<b>34,35</b>	67.174
5	17.061	4,86	516	33,06	213.226
6	9.730	2,77	317	30,69	38.784
7	7.884	2,25	357	22,08	126.934
8	6.813	1,94	233	29,24	54.479
9	14.393	4,10	416	34,60	5.486
10	3.825	1,09	443	8,63	2.231
11	32.357	9,22	1.903	17,00	69.049
Total	350.783	100	13.668	25,66	3.473.987

El estrato 2 corresponde a masas con una formación forestal dominante de *Pinus halepensis* en estado de fustal-latizal, con una ocupación mayor o igual al 70% y una fracción de cabida cubierta (Fcc) de entre el 40-69%, cubre el 33% de la superficie forestal de la Provincia de Valencia. Este estrato posee a su vez las mayores existencias en biomasa, un total de 1,5 millones de toneladas de biomasa forestal total (BF) como puede apreciarse en la Tabla 43.

Tras el análisis de resultados de la superposición de capas de distribución de estratos forestales, altitud media, orientaciones dominantes y pendientes por teselas del IFN3, en la Tabla 44 se exponen los valores fisiográficos adoptados por cada estrato.

**Tabla 44. Caracterización fisiográfica de los estratos de la Provincia de Valencia.**

<b>Estratos</b>	<b>Pendiente media (%)</b>	<b>Altitud media (m.s.n.m)</b>	<b>Orientación media</b>
1	15,7 ± 8,8	701 ± 255	E-SO
<b>2</b>	<b>15,1 ± 8,6</b>	<b>643 ± 278</b>	<b>E-SO</b>
3	15,4 ± 9,4	634 ± 263	E-SO
4	18,6 ± 9	756 ± 237	E-SO
5	17,0 ± 8,98	1090 ± 310	E-SO
6	16,9 ± 8,9	1041 ± 257	E-SO
7	16,1 ± 9,3	856 ± 353	E-SO

Tras este análisis estadístico de pendiente y altitud media de las teselas con estrato 2, para la selección representativa de las parcelas forestales, se buscan aquéllas que posean una pendiente media comprendida de entre el 6,5 y 23,7% situadas a unas altitudes comprendidas entre 365 y 921 m.s.n.m y con orientaciones dominantes este-suroeste.

De entre todos los distritos se elige el distrito bioenergético de la Serra d'Enguera. Dentro de este, en el Monte de Utilidad Pública MUP V074 "Navalón" perteneciente al Ayuntamiento de Enguera, la parcela forestal "Alto del Santich" con unos valores de pendiente media de 8%, altitud 800m y orientación E-SO cumple con los requisitos de representatividad para poder realizar en ella los trabajos de aprovechamiento de biomasa (en el Anexo 3 se detallan el estado natural, legal y forestal de este monte).



## 4.3. Sistemas optimizados de aprovechamiento y logística

### 4.3.1. Registros

#### 4.3.1.1. Tiempos de trabajo

##### a) Tiempos de trabajo en apeo y procesado

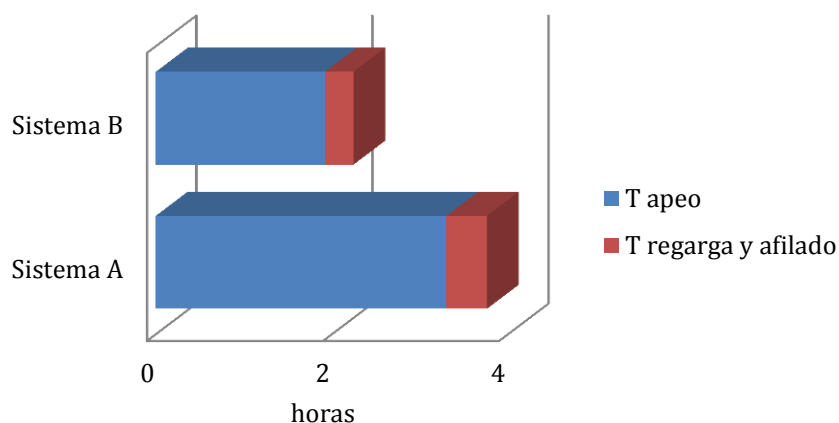
En la fase de apeo en un aprovechamiento forestal existen diversos parámetros que predicen el consumo de tiempo. Según los distintos autores estos son los siguientes: el DAP de los árboles aprovechados (Kluender y Stokes 1996, Lorzt et al. 1997, Wang et al. 2004, Spinelli et al. 2006, Ghaffarian i Sobhani 2007, Behjou et al. 2009, Mousavi et al. 2011, Çaliskan 2012, Ghaffarian et al. 2012), el volumen del árbol (Brock et al. 1986), la intensidad del aprovechamiento (Kluender y Stokes 1996, Lorzt et al. 1997) y la pendiente del terreno entre los árboles (Mousavi et al. 2011).

Para el presente aprovechamiento, con un DAP medio aprovechado de 16,5 cm, volumen unitario por pie de 0,07 m<sup>3</sup>, una intensidad de aprovechamiento del 35% del área basimétrica y una pendiente media del 5%, el resultado de la medición de tiempos en cada una de las parcelas y su tiempo medio por sistema se muestran en la Tabla 45.

**Tabla 45. Medición de tiempos de apeo y procesado.**

Parcela	Sistema	T apeo		T Recarga afilado (min)	T total neto (min)	T total bruto (min)
		(min)	(min/pie)			
1	A	217,8	1,86	30,5	217,8	248,3
3	A	188,0	2,11	23,5	188,0	211,5
6	A	226,2	2,66	35,5	226,2	261,7
7	A	160,6	3,82	20,2	160,6	180,8
<b>Media</b>	<b>A</b>	<b>198,1</b>	<b>2,21</b>	<b>27,4</b>	<b>198,1</b>	<b>225,6</b>
2	B	105,0	1,35	29,5	105,0	134,5
4	B	133,8	1,35	18,0	133,8	151,8
5	B	137,0	1,46	20,0	137,0	157,0
8	B	85,5	1,03	10,3	85,5	95,8
<b>Media</b>	<b>B</b>	<b>115,3</b>	<b>1,28</b>	<b>19,5</b>	<b>115,3</b>	<b>134,8</b>

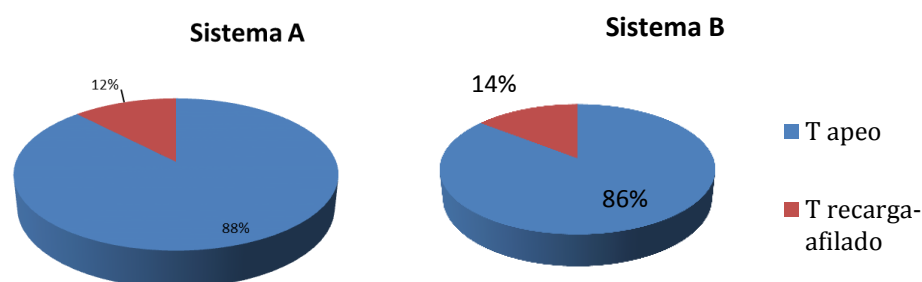
Se puede observar como el sistema A, en que se realiza un procesamiento tras el apeo de los pies, requiere más tiempo de recarga de combustible y afilado (27,4 min del sistema A frente a 19,5 en el sistema B). Igualmente, como cabe esperar, la operación de apeo y desrame requiere más tiempo en el sistema A (198,1 min) que el apeo de árbol completo (115,3 min) como muestra la Figura 87.



**Figura 87. Tiempo medio (h) invertido por parcela para el apeo y procesamiento según el sistema de aprovechamiento.**

En cuanto a los minutos empleados en el apeo de cada pie, la media para el sistema A integrado es de 2,21 min/pie, mientras que para el sistema B, de árbol completo es algo más de la mitad de éste, 1,28 min/pie. En un estudio realizado por Coates (2012) sobre apeo de *Picea sitchensis* por el sistema de árbol completo en Irlanda, se obtienen valores de 1,18 min/pie, valor coincidente con el obtenido de media para el sistema B en el presente estudio. Por otra parte, Spinelli y Magagnotti (2010), a través del desarrollo de ecuaciones predictivas de tiempos de apeo, estima para abetos (*Picea abies*) en 0,91 min/pie para árboles de DAP 10 cm y de 3,60 min/pie para árboles con DAP 20 cm, mientras que Kofmann y Kent (2007) observaron un tiempo de 0,41 min/pie para coníferas.

Según los resultados obtenidos, el peso de las operaciones de recarga de combustible y aceite y afilado, representa prácticamente el mismo porcentaje de tiempo total de apeo sobre ambos sistemas de aprovechamiento (12% y 14% respectivamente) como se refleja gráficamente en la Figura 88.



**Figura 88. Porcentaje de tiempo invertido para el apeo, entre tiempo apeo efectivo y tiempo de apeo total.**

A este respecto, en un estudio realizado en Lituania sobre tiempo de apeo motor manual de madera corta sobre un bosque de frondosas, Zinkevicius et al. (2012) contabilizaron un tiempo de recarga de combustible y el afilado de un 9% del total del tiempo de proceso de apeo, cifras algo menores a las obtenidas en el presente estudio (12-14%). En otro estudio realizado en Rumania, Borz y Ciobanu, (2013) obtuvieron un tiempo consumido en la recarga de combustible y afilado de la sierra mecánica de en torno al 14%, valor que pese a ser obtenido del apeo de una masa de frondosas, sí coincidente con el obtenido en este estudio.

#### b) Tiempos de trabajo en desembosque y saca

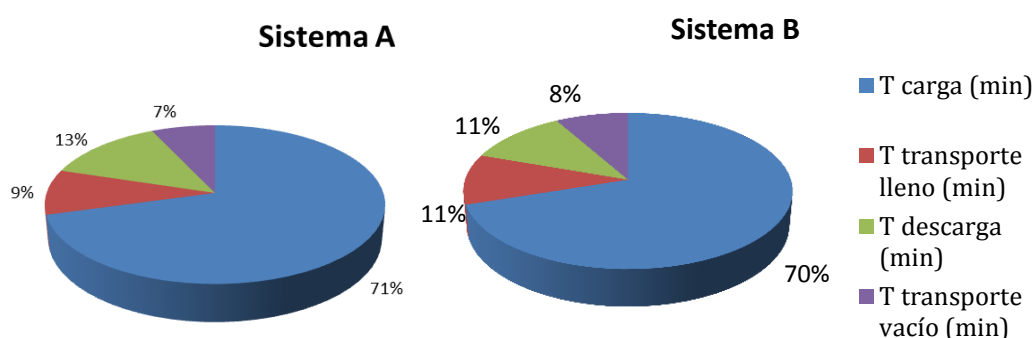
La medición de tiempos de las distintas operaciones de desembosque y saca del autocargador en cada uno de los sistemas y por parcelas se recojen en la Tabla 46.

**Tabla 46. Medición de tiempos desembosque y saca**

Parcela	Sistema	T carga (min)	T transporte lleno (min)	T descarga (min)	T transporte vacío (min)	Retrasos (min)	Distancia (m)	nº viajes	T total neto (min)	T total bruto (min)
1	A	105,0	20,0	23,0	17,0	0	850	2	165	165
3	A	174,9	28,5	34,9	19,5	0	750	3	258	258
6	A	188,5	24,3	38,3	17,3	0	750	3	269	269
7	A	207,0	15,1	30,1	12,7	0	850	2	265	265
<b>Media</b>	<b>A</b>	<b>168,9</b>	<b>22,0</b>	<b>31,6</b>	<b>16,6</b>	<b>0,0</b>	<b>800</b>	<b>2,5</b>	<b>239,0</b>	<b>239,0</b>
2	B	154,0	15,0	17,0	15,0	180	825	2	201	381
4	B	213,2	36,0	33,1	27,8	0	800	4	310	310
5	B	192,6	33,4	30,1	27,3	0	700	4	283	283
8	B	197,9	28,5	43,5	19,0	0	700	4	289	289
<b>Media</b>	<b>B</b>	<b>189,4</b>	<b>28,2</b>	<b>30,9</b>	<b>22,3</b>	<b>45,0</b>	<b>756</b>	<b>4</b>	<b>270,8</b>	<b>315,8</b>

Los resultados indican que, sin tener en cuenta posibles incidencias o retrasos, por lo general, el tiempo de desembosque de un sistema de árbol completo es mayor que el de un sistema en que se apean y se derraman los árboles debido al mayor volumen ocupado por los árboles en la caja del autocargador. Por otra parte, este mayor volumen hace necesario un mayor número de desplazamientos (casi el doble) y por tanto, un tiempo de transporte lleno y vacío mayor.

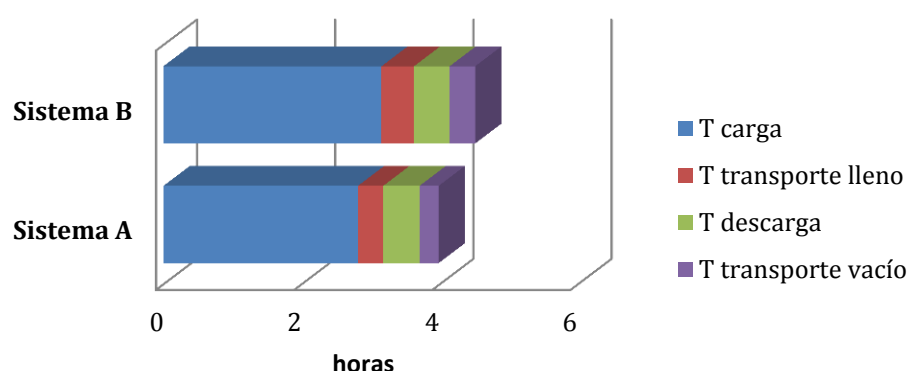
Los porcentajes de cada fase de desembosque sobre el total del tiempo de desembosque son bastante similares para ambos sistemas, siendo la carga la acción que mayor tiempo ocupa, seguida de la descarga, el transporte lleno y el transporte en vacío (ver Figura 89).



**Figura 89. Porcentaje de tiempo invertido en las distintas fases del desembosque en cada uno de los sistemas.**

La suma del tiempo de carga y descarga representa de media el 83% y el 81% del tiempo total de trabajo efectivo por parte del autocargador en cada sistema (A y B) respectivamente. Estos resultados coinciden con los resultados obtenidos por otros autores (Manner et al. 2013 y 2014) que afirman que la suma de ambos tiempos supone entre el 80-85% del tiempo total consumido.

En cuanto comparación entre la velocidad media durante el transporte del autocargador cargado y descargado, los resultados indican que la velocidad media es mayor cuando el autocargador viaja descargado. Esto coincide con lo observado por Manner et al. (2014). Las diferencias en velocidades son bastante similares entre ambos sistemas, con un 32% más de velocidad durante el transporte vacío respecto a la velocidad cargado en el sistema A y un 34% en el sistema B. Sin embargo, este mismo autor muestra diferencias más bajas, en torno a un 17%. Esto se debe al uso de un autocargador de gran capacidad y potencia (John Deere PowerTech Plus 6090) con respecto al utilizado en la presente investigación (Valtra Hitraf A83).



**Figura 90. Tiempo medio invertido (h) por parcela en el desembosque según el sistema de aprovechamiento.**

En la Figura 90 se puede observar que no existe ningún retraso para el sistema A, ya que no se produjeron durante los días de aprovechamiento, pero cabe esperar un porcentaje de tiempo de retraso debido a la maquinaria, el operario o la misma organización de los trabajos en cualquier tipo de aprovechamientos a la hora de estimar rendimientos reales (Spinelli 2011).

Cabe señalar que el tiempo de carga del sistema B, de árbol completo, es mayor que el tiempo de carga en el sistema A, donde se recogen separadamente fustes y ramas. Esto puede ser debido a la suma de los tiempos de desplazamiento dentro de la parcela, ya que hay un mayor número de ciclos en el sistema B. Por otra parte, otro factor de influencia es la movilidad dentro de las parcelas aprovechadas en árbol completo (sistema B) sea más reducida que en las de apeo y desrame (sistema A) debido al mayor volumen ocupado por la biomasa a extraer.

### c) Tiempos de trabajo en proceso de astillado

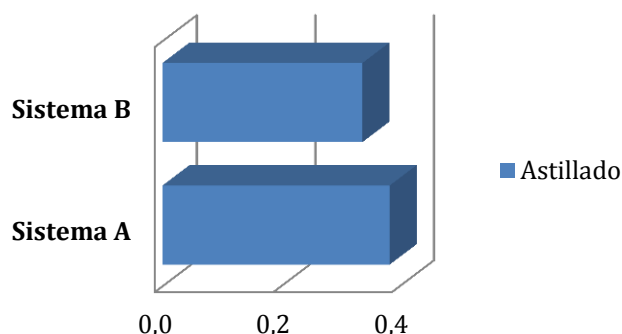
La Tabla 47 muestra los principales resultados tras la medición de tiempos de astillado en cada uno de los sistemas ensayados en las parcelas muestreadas. La Figura 91 muestra gráficamente la comparación de los tiempos de los procesos de astillado en los dos sistemas.

**Tabla 47. Medición de tiempos de astillado.**

Parcela	Sistema	T astillado (min)	Biomasa extraída (t)	T total neto (min)	T total bruto (min)
1	A	26,3	7,26	26,3	26,3
3	A	21,3	5,87	21,3	21,3
6	A	24,9	6,86	24,9	24,9
7	A	19,5	5,39	19,5	19,5
<b>Media</b>	<b>A</b>	<b>23,0</b>	<b>6,3</b>	<b>23,0</b>	<b>23,0</b>

Parcela	Sistema	T astillado (min)	Biomasa extraída (t)	T total neto (min)	T total bruto (min)
2	B	20,9	6,20	20,9	20,9
4	B	20,5	6,07	20,5	20,5
5	B	20,6	6,11	20,6	20,6
8	B	19,0	5,64	19,0	19,0
<b>Media</b>	<b>B</b>	<b>20,3</b>	<b>6,0</b>	<b>20,3</b>	<b>20,3</b>

Los resultados obtenidos demuestran que el tiempo consumido por el sistema A es ligeramente mayor al consumido por el sistema B. Esto se debe a la existencia de dos pilas de material para el sistema A, lo que requiere de un mayor tiempo de alimentación de la astilladora.



**Figura 91. Tiempo medio invertido (h) por parcela en el astillado según el sistema de aprovechamiento.**

#### **d) Tiempos de trabajo en transporte**

No se han contabilizado los tiempos de transporte ni se han tenido en cuenta para el estudio de los sistemas de aprovechamiento, ya que el objetivo de la investigación se ha centrado en el estudio empírico de la logística en monte del aprovechamiento. No obstante, para el cálculo de costes se han estimado teóricamente los tiempos de transporte, para lo que se supuso una distancia a planta de 40 km tal como han realizado otros autores (Tolosana y Laina 2008, Baraza y Merino 2009, Martínez-Abarca 2013). Al haber utilizado la misma astilladora con las mismas cuchillas para la producción de astilla de iguales dimensiones y posterior carga en el camión, se supone un mismo espacio ocupado por la biomasa una vez reducida a astillas.

### 4.3.1.2. Consumo de combustibles

La Tabla 48 expone la ficha técnica de la información recogida sobre los equipos utilizados en los ensayos, así como el consumo de combustible estimado tras el rellenado de los depósitos de las diferentes máquinas.

**Tabla 48. Ficha técnica de los equipos.**

EQUIPOS	Motosierra	Autocargador	Astilladora
Marca	STILH	VALTRA -HITRAF	STARK
Modelo	MS-261	A83	SH-4585
Potencia (CV)	3	88	385
H/año de uso	2000	2000	1500
Vida de servicio	6,0	10,0	12,0
Combustible	Gasolina	Diésel	Diésel
Precio (€)	490	130.00	240.000
Consumo estimado (l/h)	0,3	4,5	20

Con estos datos de partida y con la estimación de la duración de los procesos, se han obtenido los consumos medidos empíricamente, tal como se especifica en la Tabla 49.

**Tabla 49. Litros de combustible consumidos por los equipos.**

Parcela	Sistema	Motosierra (l)	Autocargador (l)	Astilladora (l)	Total (l)
1	A	4,7	12,14	8,8	25,6
3	A	3,4	18,96	7,1	29,5
6	A	4,5	19,75	8,3	32,5
7	A	2,4	19,48	6,5	28,3
<b>Media</b>	<b>A</b>	<b>3,7</b>	<b>17,6</b>	<b>7,7</b>	<b>29,0</b>
2	B	1,5	14,78	7,0	23,3
4	B	2,6	22,80	6,8	32,2
5	B	2,6	20,84	6,9	30,3
8	B	1,3	21,25	6,3	28,8
<b>Media</b>	<b>B</b>	<b>2,0</b>	<b>19,9</b>	<b>6,8</b>	<b>28,6</b>

Según los resultados, ambos sistemas consumen prácticamente el mismo combustible, dominados ambos por el consumo que realiza el autocargador. Las diferencias estriban en que en el sistema A de apeo y derrame el consumo de gasolina por parte de la motosierra es mayor al que consume en el sistema B de árbol completo debido al mayor número de cortes

que se han de producir y por tanto mayor tiempo de procesado. Sin embargo, el consumo del autocargador es menor debido al menor tiempo que se necesita para el desembosque. No obstante, al necesitar de un mayor tiempo de astillado, el conjunto resultante hace que el consumo de combustible por parte del sistema A sea ligeramente mayor que en el sistema B.

La Figura 92 muestra gráficamente las escasas diferencias en la media de consumos totales por sistema de aprovechamiento, aunque los mayores tiempos de desembosque del autocargador en el sistema B derivaron en un mayor consumo (un 69% frente a un 61% en el sistema A de los litros totales por sistema). Lo mismo sucede con el mayor tiempo de apeo, procesado y astillado en el caso del sistema A (13% y 26% respectivamente) con respecto al sistema B (7% y 24% respectivamente).

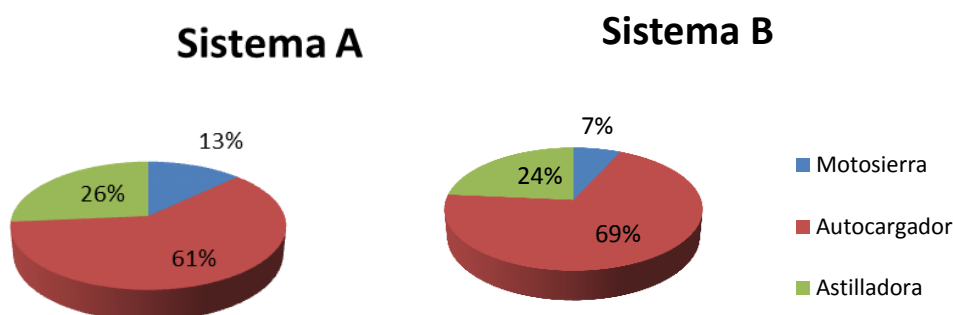


Figura 92. Porcentaje de consumo de los equipos en cada uno de los sistemas.

#### 4.3.1.3. Biomasa extraída

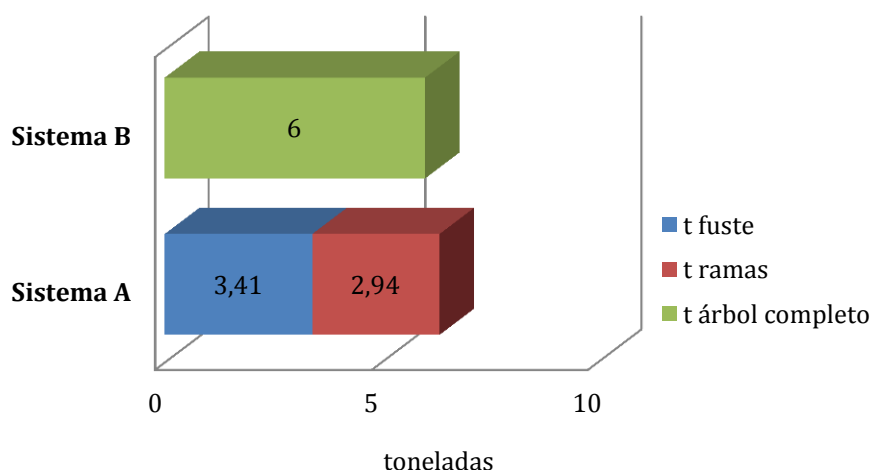
La Tabla 50 y la Figura 93 muestran los principales resultados obtenidos de biomasa extraída en cada una de las parcelas de estudio, así como el origen de la misma, bien de fuste o bien de ramas.



**Tabla 50. Número de pies y peso de la biomasa extraída estimado a 45% de humedad media.**

Sistema	Parcela	nº pies	Diámetro medio (cm)	Volumen fuste (m <sup>3</sup> /ha)	Cantidad biomasa (t)	De la cual fuste	De la cual ramas	De la Biomasa (t/ha)
A	1	83	13,59	25,73	7,26	3,90	3,36	29
	3	76	14,78	20,46	5,87	3,15	2,72	23,50
	6	77	16,59	24,29	6,86	3,68	3,18	27,44
	7	42	20,95	20,20	5,39	2,89	2,50	21,55
<b>Media</b>	<b>A</b>	<b>70</b>	<b>16,48</b>	<b>22,67</b>	<b>6,35</b>	<b>3,41</b>	<b>2,94</b>	<b>25,38</b>
B	2	76	17,56	24,82	6,20			24,80
	4	94	16,01	25,52	6,07			24,27
	5	85	16,01	26,19	6,11			24,46
	8	77	16,69	24,19	5,64			22,56
<b>Media</b>	<b>B</b>	<b>83</b>	<b>16,57</b>	<b>25,18</b>	<b>6,01</b>			<b>24,02</b>

De la totalidad de las parcelas se extrajeron 49,40 t de biomasa, de las cuales 25,38 corresponden a los aprovechamientos mediante el sistema A y 24,02 t a los aprovechamientos mediante el sistema B. Esto significa que hay una diferencia de 1,36t entre sistemas. Esta diferencia se debe a que, aunque se planificó la misma intensidad de corta con el mismo marco de espaciamiento y los mismos criterios de marcaje, la realidad de las parcelas forestales y la posible falta de recogida de todos los árboles apeados ha impedido que este número sea exactamente el mismo. Por ello, el estudio de la productividad de los aprovechamientos en relación a las toneladas que se expondrá en el próximo apartado es muy relevante a la hora de obtener conclusiones sobre influencia real del tipo de sistema sobre las distintas variables.



**Figura 93. Peso medio de biomasa extraída por parcela (t) en cada uno de los sistemas de aprovechamiento.**

En comparación con los estudios de IDAE (2011a), sumando toda la posibilidad de clareo, 1ª clara y 2ª clara (edad a la que se aprovecha en el presente estudio la masa) *Pinus halepensis* se observa una ligera mayor posibilidad de biomasa aprovechada (0,51 t/ha.año), frente a las actuales 0,41 t/ha.año obtenidas como la posibilidad media aprovechada (24,7 t/ha de media de ambos sistemas, divididas por los 60 años de edad en que se aprovecha la masa). Esta menor posibilidad obtenida se debe a la falta de tratamientos selvícolas realizados hasta el momento que deriva en un menor crecimiento de la masa.

Carreñas (2004), obtuvo 25t/ha de biomasa residual para trabajos de claras sistemáticas mecanizadas sobre *Pinus halepensis* en la Sierra de Filabrés (Almería), valor que coincide con el obtenido por el presente estudio pese a las distintas condiciones de trabajo.

Martínez-Fernández (2013) para claras por lo bajo sobre *Pinus halepensis* y cortas policia obtiene 12t/ha de biomasa. Este valor mucho menor que el obtenido, se debe a la retirada tan sólo de pies tronchados, torcidos, descopados o que no tenían posibilidad de crecimiento, lo que disminuye la cantidad de biomasa total en comparación con el criterio de retirada del 35% de los pies y en torno al 26% del área basimétrica seguido en este estudio.

#### **4.3.1.4. Impactos sobre el medio**

##### **a) Daños sobre el suelo y el sotobosque**

Se considera de manera visual el porcentaje de matorrales y otra vegetación eliminada debido al aprovechamiento, respecto a la superficie que ocupaban previamente y la superficie de rodadura de la maquinaria sobre el total de la superficie de la parcela. La Figura 94 muestra un ejemplo de estos daños.



**Figura 94. Daños remanentes de rodadura tras los aprovechamientos sobre el suelo.**

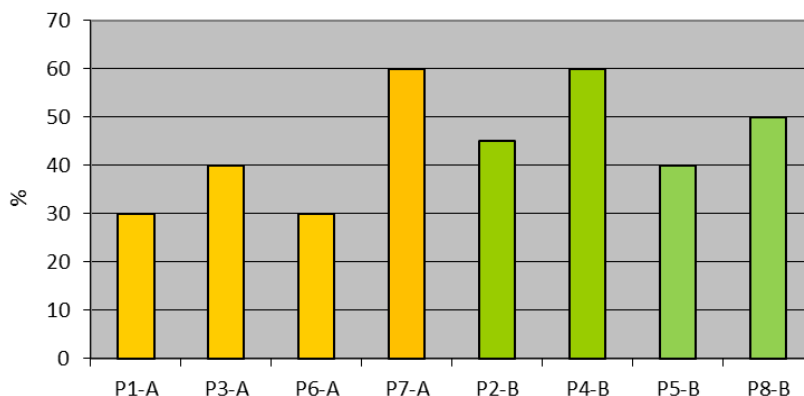
La Tabla 51 muestra el registro de daños tomado sobre sotobosque y superficie afectada por rodadura.

**Tabla 51. Daños ocasionados sobre el sotobosque y el suelo de las parcelas.**

Parcela	Sistema A				Sistema B			
	P1	P3	P6	P7	P2	P4	P5	P8
% sup sotobosque	30	40	30	60	45	60	40	50
<b>Media</b>		<b>40</b>				<b>48,7</b>		
% sup rodadura	5	7	5	5	8	10	10	13
<b>Media</b>		<b>5,5</b>				<b>10,2</b>		

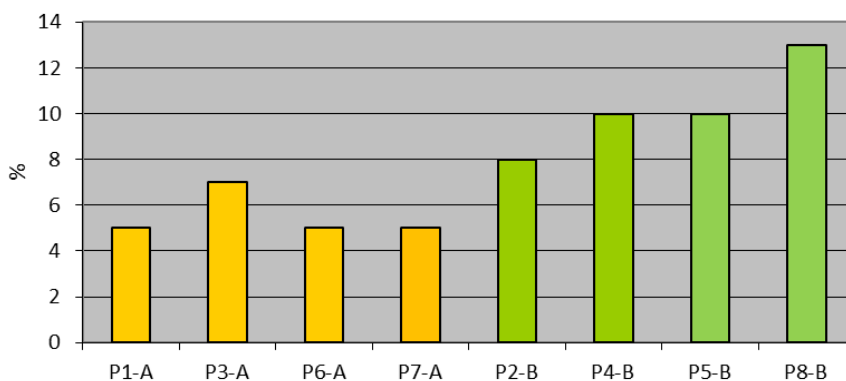
El sistema de aprovechamiento a árbol completo (B) presenta de media mayores daños que el sistema integrado (A), tanto para el parámetro “superficie de sotobosque dañada” (48,7% de superficie en el sistema B frente a 40% de superficie en el sistema A) como para “superficie con rodadura presente” (10,2% de superficie en el sistema B frente a 5,5% de superficie en el sistema A).

Gráficamente, se pueden observar estos daños en las Figuras 95 y 96.



**Figura 95. Superficie de sotobosque dañada sobre el total de la parcela.**

En cuanto a superficie de sotobosque dañada, la media obtenida es muy similar para ambos sistemas (40% para el sistema A, 49% para el sistema B). Pese a haber realizado una intensa búsqueda, no se tiene conocimiento de la existencia de experiencias comparables con la que poder contrastar los resultados obtenidos.



**Figura 96. Superficie dañada por rodadura sobre el total de la parcela.**

Respecto a la superficie de suelo dañada con marcas de rodadura, la media del sistema A es de un 5%, resultando ser la mitad que la media del sistema B, de un 10% para árbol completo. Estos resultados se ven refrendados por Adebayo et al. 2007, que afirman que el sistema de árbol completo posee un mayor potencial de compactación de suelo durante la extracción de árbol completo, exponiendo en mayor medida el suelo mineral (Hartsough et al. 1997).

## b) Daños sobre la masa remanente

De acuerdo con diversos autores (Butora and Schwager 1986, Bacher 1999, Acar y Dinç 2001) la frecuencia del daño causado a los árboles remanentes depende mayormente de la maquinaria de aprovechamiento, la distancia entre calles, la rapidez del apeo, el método de desembosque, el número de árboles apeados por unidad de área y la situación topográfica.

La Figura 97 muestra un ejemplo de los daños ocasionados a los pies remanentes. En ella se puede observar como junto a la vía de saca aparecen ramas rotas, y árboles dañados.



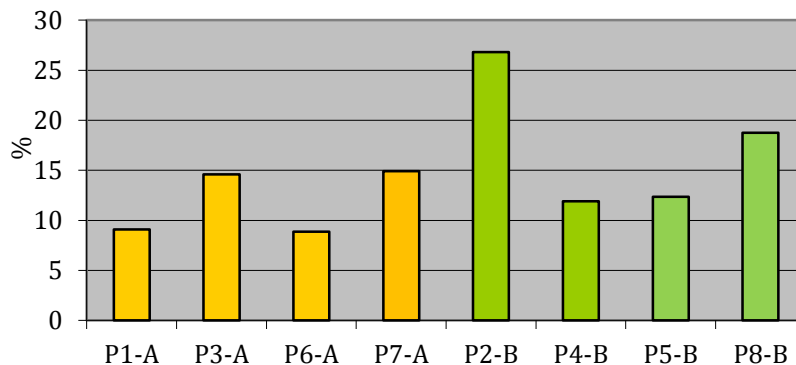
**Figura 97. Daños tras los aprovechamientos sobre la masa remanente.**

La Tabla 52 muestra un resumen de los daños registrados.

**Tabla 52. Porcentaje de pies dañados sobre los pies remanentes en las parcelas**

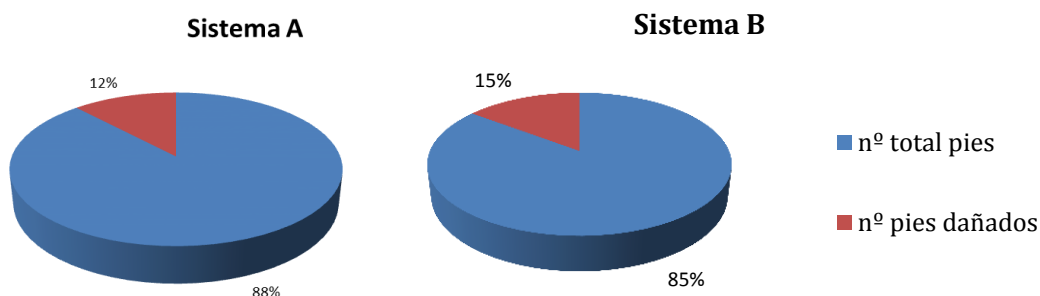
Parcela	Sistema A				Sistema B			
	P1	P3	P6	P7	P2	P4	P5	P8
pies dañados (%)	9	15	9	15	27	12	12	19
<b>Media</b>	<b>12</b>				<b>17</b>			

Gráficamente, se pueden observar estos daños en las Figuras 98 y 99.



**Figura 98. Porcentaje de pies remanentes dañados por parcela.**

La Figura 99 muestra gráficamente el porcentaje de pies dañados sobre el total de los pies remanentes, siendo ligeramente mayor en el caso de aprovechamiento de árbol completo (17%) frente al sistema integrado (12%).



**Figura 99. Porcentaje del número total de pies dañados sobre cada sistema.**

Esta ligera diferencia puede deberse a que la carga de los árboles con toda su copa hasta la caja autocargador requiere un mayor espacio de maniobra que la carga mediante pinza de fustes y ramas por separado, con lo que se genera un menor daño a la masa remanente. Además, hay que tener en cuenta que el menor número de ciclos que se necesitan para el desembosque en el sistema A (2,5 ciclos de media) frente al sistema B (4 ciclos) hace que se produzca una menor distancia de desplazamiento dentro de la parcela, con lo que el riesgo para el autocargador de poder dañar árboles a su paso es menor. Esta teoría viene apoyada por estudios previos indican que el sistema de apeo *cut-to-length* (CTL), parcialmente asimilable en este caso al sistema integrado, puede generar menos daño a la masa que el apeo de árbol completo (Camp 2000, Landford y Stokes 1995, Waters et al. 2004), como reflejan en los resultados obtenidos.

Los resultados obtenidos son comparables con los aportados por Spinelli et al. (2014) que registraron un 15% de daños a árboles remanentes en el sistema de madera corta para trituración (comparable al sistema A del presente estudio), mientras que obtuvo un 6% para aprovechamiento de árbol completo. Cabe tener en cuenta que estos autores señalan tan sólo el daño ocasionado por el sistema de apeo sin tener en cuenta el proceso de desembosque y que en estos resultados sí se está considerando el desembosque.

Los mismos autores señalan que el daño en claras selectivas en bosques mediterráneos resulta en frecuencias de daños mayores que las obtenidas por ellos para árbol completo. Según Piccio et al. (2011) estos pueden elevarse hasta el 11% y según Tsioras y Liamas (2010) hasta un 20%, lo que encuadra los presentes resultados en el rango observado en la literatura.

Por otra parte, en la Tabla 53 se muestra en detalle el número de veces que ocurre un daño en cada parcela según zona dañada (corteza, el tronco y/o ramas) y grado de severidad (leve, moderado o grave).

**Tabla 53. Árboles dañados y grado de severidad.**

		Sistema A				Sistema B			
nº pies dañados		P1	P3	P6	P7	P2	P4	P5	P8
Fuste	Leve	1	2	2	0	0	1	2	0
	Moderado	1	2	1	0	3	3	0	0
	Grave	0	0	0	0	1	0	0	0
Corteza	Leve	3	7	6	4	4	2	10	3
	Moderado	2	2	1	0	2	4	2	0
	Grave	0	0	0	0	0	0	0	2
Ramas	Leve	3	0	0	8	2	0	0	12
	Moderado	0	0	0	0	6	0	0	0
	Grave	0	0	0	0	0	0	0	2

Las Figuras 100, 101 y 102 ayudan a visualizar el registro de daños.

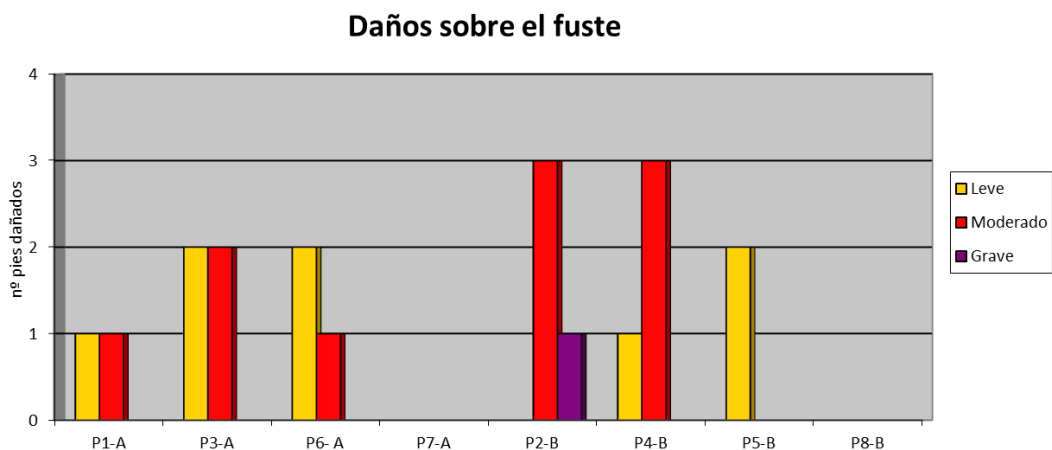


Figura 100. Cuantificación de pies y cualificación del daño sufrido por el fuste.

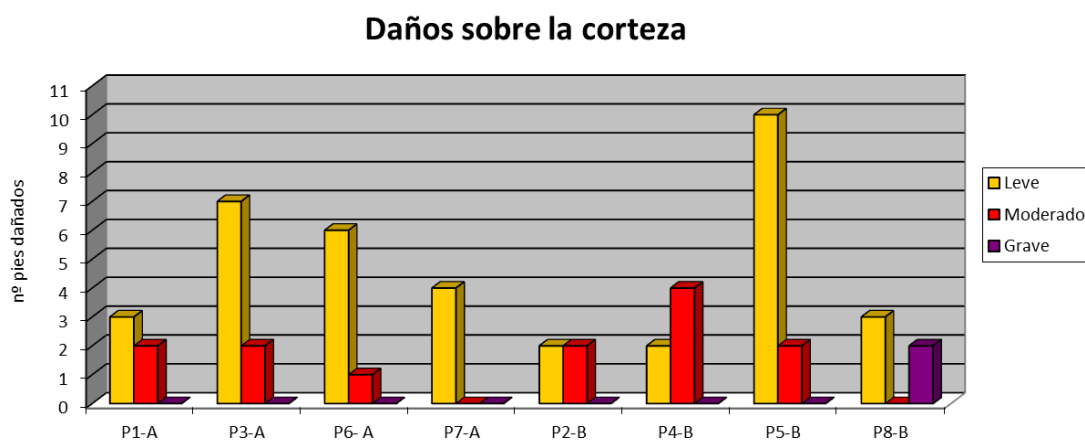


Figura 101. Cuantificación de pies y cualificación del daño sufrido sobre la corteza.

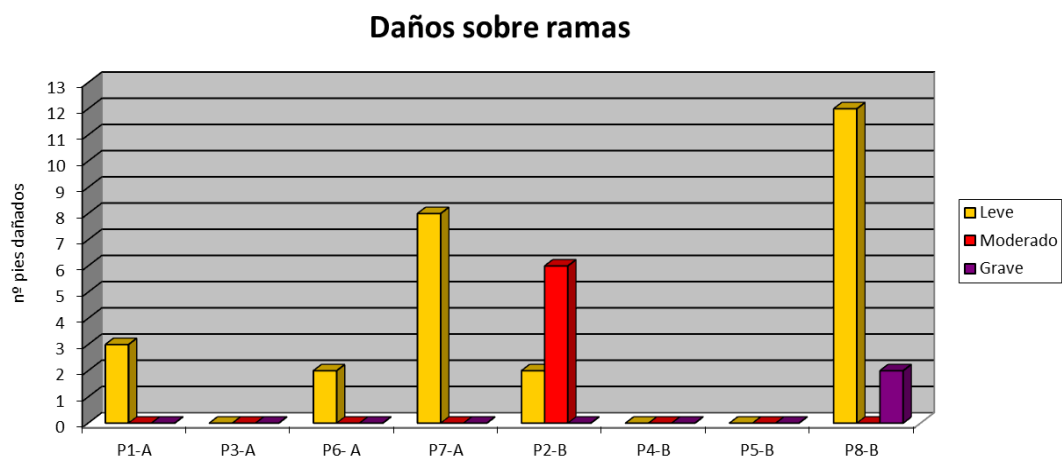


Figura 102. Cuantificación de pies y cualificación del daño sufrido por las ramas.



---

La fracción del árbol que resulta más frecuentemente dañada es la corteza para ambos sistemas, siendo los daños producidos por lo general leves, aunque en el caso del sistema B aparecen con más frecuencia daños de intensidad moderada y dos casos de daño grave.

La fracción siguiente más dañada son las ramas, con predominancia de daños de intensidad leve en ambos sistemas pero de nuevo con presencia de daños moderados (sobre siete pies) y daños graves (sobre dos pies) en el sistema B.

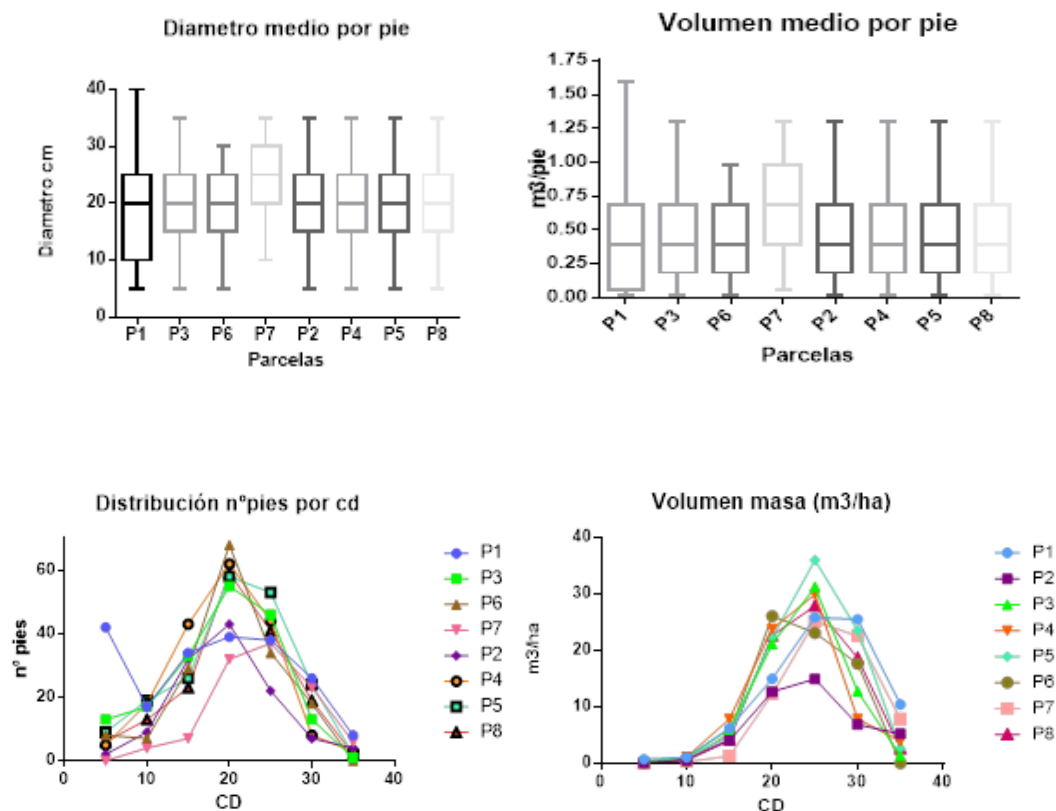
En cuanto a la fracción de fuste, el número de pies dañados es pequeño (con un máximo de tres pies dañados por parcela) pero presenta predominancia de daños de intensidad moderada en ambos sistemas, sobretodo en el sistema B donde también aparece un caso de daño grave sobre un fuste.

#### ***4.3.2. Evaluación de la homogeneidad y selección final de las parcelas de estudio.***

Con el fin de asegurar la existencia de una homogeneidad dasométrica entre las parcelas y homogeneidad en cuanto a intensidad de los trabajos realizados para proceder a un análisis comparativo entre sistemas sin errores muestrales, se obtuvieron los siguientes resultados:

##### ***4.3.2.1. Homogeneidad dasométrica de la masa***

Los resultados de las pruebas inferenciales aplicadas a las variables de diámetro (DAP) y volumen medio de los pies en cada parcela y distribución del número de pies y del volumen por clase diamétrica indican que no existen diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% entre parcelas en cuanto a su distribución de los diámetros y volúmenes por clase diamétrica (ver Figura 103). Sin embargo, sí existen diferencias significativas entre los diámetros y volúmenes medios de cada parcela. Concretamente, los test de comparación múltiple de Dunns (en el caso de diámetros) y de Turkey (en el caso de volumen) que comparan dos a dos las parcelas, indican que la parcela 7 es la que contiene una media significativamente distinta a la del resto de parcelas en cuanto a diámetro y volumen medio. Esto puede ser debido a algún tipo de entresaca realizada no contemplada en el historial del monte que ha aumentado el crecimiento de los árboles remanentes. Ello comporta que los valores que adopta esta parcela en posteriores análisis de tiempos y biomasa no pueden tomarse como equiparables a los valores adoptados por el resto de parcelas por su falta de homogeneidad, y por tanto, aunque realizados los aprovechamientos, no se consideraron los resultados de la parcela 7 para la obtención de conclusiones sobre los sistemas de aprovechamiento.



**Figura 103. Gráficos de las variables representativas de la homogeneidad dasométrica de la masa por parcelas y por clases diamétricas (CD).**

En el Anexo 4 puede encontrarse el detalle de los resultados descriptivos e inferenciales de cada variable en cada parcela.

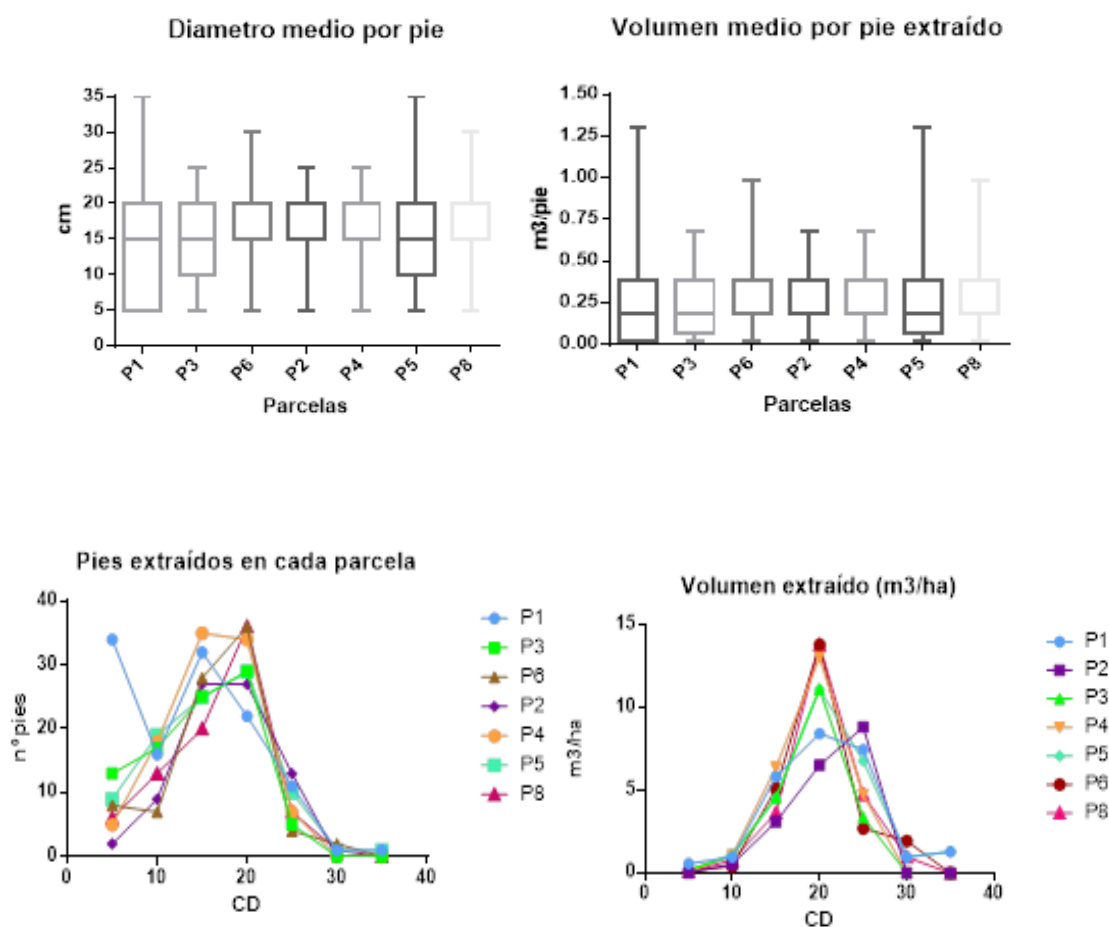
#### 4.3.2.2. Homogeneidad en la intensidad de los tratamientos

Los resultados de las pruebas inferenciales indican que no existen diferencias significativas entre parcelas en cuanto a su distribución de los diámetros (DAP) y volúmenes por clase diamétrica (ver Figura 104). Sin embargo, sí existen diferencias significativas entre los diámetros y volúmenes medios extraídos de cada parcela. Concretamente, los test de comparación múltiple de Turkey que comparan dos a dos las parcelas, indican que hay diámetros medios significativamente distintos entre las parcelas P1 y P6, P1 y P2, y P2 y P3 y entre las parcelas P1 y P2 en cuanto a volúmenes medios de los árboles extraídos. Por tanto, se puede afirmar que en P1 y P2 los volúmenes de los árboles aprovechados fueron distintos a los del resto. Eliminando de los posteriores análisis de biomasa y tiempo la parcela P2 (sistema B) se eliminan las diferencias significativas entre los volúmenes medios de las parcelas restantes y por tanto, según los criterios establecidos en la metodología, se puede

considerar que las parcelas restantes son homogéneas en cuanto a intensidad de aprovechamiento.

Estas diferencias encontradas pueden deberse a errores en la toma de datos proporcionada por los operarios.

En el Anexo 4 puede encontrarse el detalle de los resultados inferenciales de cada variable en cada parcela.



**Figura 104. Gráficos de las variables representativas de la homogeneidad de la intensidad de aprovechamiento sobre las parcelas por parcelas y por clase diamétrica (CD).**

Por tanto, para los análisis de los aprovechamientos no se tienen en cuenta las parcelas P7 en el caso del sistema A ni la P2 en el caso del sistema B, considerando tan sólo como válidos para posteriores análisis estadísticos los resultados obtenidos para las siguientes parcelas:

- P1, P3, P6 para el sistema A
- P4, P5, P8 para el sistema B

### 4.3.3. Resultados comparativos de los sistemas de aprovechamiento

#### 4.3.3.1. Rendimientos

Los resultados presentados en la Tabla 54 muestran la producción de biomasa extraída por hectárea y los rendimientos de apeo, desembosque y astillado.

**Tabla 54. Rendimientos de los aprovechamientos.**

Sistema	Parcela	Biomasa (t/ha)	Apeo (t/h)	Desembosque (t/h)	Astillado (t/h)
A	1	29,04	1,75	2,64	16,55
	3	23,50	1,67	1,37	16,55
	6	27,44	1,57	1,53	16,55
	<b>Media</b>	<b>26,66</b>	<b>1,66</b>	<b>1,85</b>	<b>16,55</b>
	<b>Desv.est</b>	<b>2,85</b>	<b>0,09</b>	<b>0,67</b>	-
	<b>CV (%)</b>	<b>10,69</b>	<b>5,44</b>	<b>37,47</b>	-
B	4	24,27	2,40	1,17	17,79
	5	24,46	2,34	1,29	17,79
	8	22,56	3,53	1,17	17,79
	<b>Media</b>	<b>23,76</b>	<b>2,76</b>	<b>1,21</b>	<b>17,79</b>
	<b>Desv.est</b>	<b>1,04</b>	<b>0,67</b>	<b>0,07</b>	-
	<b>CV (%)</b>	<b>4,40</b>	<b>24,44</b>	<b>5,79</b>	-

#### a) Producción de biomasa

En primer lugar, se puede observar una mayor cantidad de biomasa por hectárea para el caso del sistema A (26,66 t/ha) frente al sistema B (23,76 t/ha). Los resultados inferenciales indican que no hay diferencias significativas entre las medias de productividad de ambos sistemas con un 95% de nivel de confianza (P value = 0,213) (ver Anexo 4).

Con ello, se puede afirmar que ambos sistemas extraen la misma cantidad de biomasa por hectárea, confirmando que la intensidad de la clara ha sido la misma en todas las parcelas de estudio, permitiendo así una comparación del resto de variables obtenidas. Sin embargo, obviamente la suma de biomasa extraída de los árboles apeados no puede ser exactamente la misma, al variar ligeramente los diámetros y alturas de los individuos apeados y procesados.

### **b) Rendimiento en el proceso de apeo**

Se observa que el rendimiento del apeo (teniendo en cuenta los tiempos de repostaje y afilado) es mayor para el caso del aprovechamiento a árbol completo (2,76 t/h) que el del sistema A (1,66 t/h). Este resultado es el esperado, ya que en el sistema a árbol completo no se necesita de un procesado adicional de los pies apeados. Pese a ello, las diferencias observadas no son significativas para un nivel de confianza del 95.0% (P value = 0,104).

El rendimiento obtenido del apeo del sistema A, coincide en gran medida con el estimado por Ambrosio (2005) para la elaboración manual del apeo en una masa similar de *Pinus sylvestris* en Galicia, de 2,71 m<sup>3</sup>/h frente a 2,5m<sup>3</sup>/h obtenidos en este estudio (densidad en verde a 30% de humedad = 0,668 t/m<sup>3</sup>), con la salvedad de que los árboles poseían un poco más de área basimétrica y debido a ello, el leve mayor rendimiento.

### **c) Rendimiento en el proceso de desembosque**

En cuanto al proceso de desembosque, el sistema A presenta un mayor rendimiento que el sistema a árbol completo, siendo las diferencias observadas no significativas (P value = 0,253 con un 95% de confianza).

En la práctica, la capacidad de desembosque del autocargador pasa de 2,62 t verdes por ciclo (viaje) de desembosque en el caso del sistema A, a 1,49 t verdes por ciclo en el caso del sistema B por el mayor volumen en la caja que los árboles completos ocupan. Las experiencias de Tolosana et al. (2013a) sobre el desembosque de restos de *Pinus sylvestris* acordonados con un autocargador escandinavo Timberjack 1410 resultan en 4,3 t verdes por ciclo y de 4,0 toneladas carga por ciclo en el caso del autocargador Dingo. En ambos casos, según indican los autores, esta carga está muy por debajo de la capacidad de transporte de la máquina, siendo el factor limitante el volumen. En el presente caso se observa un cierto paralelismo para el sistema B, ya que al ser mayor el volumen ocupado por árboles completos respecto al volumen de fustes y ramas, la capacidad de transporte también se ve disminuida.

En cuanto a productividad por hora efectiva trabajada, el autocargador desembosca de media unas 1,85 t verdes por hora en el sistema A, y una media de 1,21 t por hora en el sistema B. Heikkilä et al. (2006) afirman que la productividad de desemboscar árboles desramados es mayor que la de desemboscar árboles completos, como sucede en los aprovechamientos realizados.

Las experiencias de Tolosana et al. (2013a) indican que el autocargador Timberjack trabajando en restos acordonados obtuvo 10,2 t verdes de biomasa cada hora de trabajo productivo, mientras que la productividad del autocargador Dingo fue de 3,2 t verdes de biomasa por hora de trabajo productivo. La gran diferencia con respecto a los resultados obtenidos se debe principalmente a que se trata de biomasa de distinta naturaleza (árboles apeados y ramas por una parte, y árbol completo por otra frente a la saca de restos, entendida como ramas y copas) y al acordonamiento de los restos en las experiencias de Tolosana que hacen que la productividad aumente en gran medida. En el presente estudio el autocargador se trasladaba al lugar de apeo de los árboles y una vez allí ir cargándolos de manera casi selectiva.

En cuanto al rendimiento del desembosque de biomasa en ambos sistemas, los resultados de las pruebas inferenciales indican que no existen diferencias significativas entre las medias de ambos sistemas. Varios autores señalan como factores condicionantes de la productividad de un autocargador su capacidad de carga, la distancia de desembosque, peso de madera o la cantidad biomasa por hectárea (Kallio y Leinonen 2005, Spinelli 2007, Nurmi 2007). Al ser estos factores constantes para las parcelas aprovechadas, esto podría explicar la igualdad entre sistemas.

Según Tolosana et al. (2013a) los autocargadores madereros son una opción para disminuir la inversión de las empresas en nueva maquinaria aunque su rendimiento es generalmente bajo. No obstante, este puede mejorar sensiblemente cuando las ramas y puntas están acordonadas, operación más factible en sistemas de aprovechamiento mecanizados e integrados.

Aunque no se da el caso de ser un aprovechamiento totalmente mecanizado debido al apeo motormanual, un acordonamiento o apilamiento de ramas en el caso del sistema A podría mejorar los rendimientos obtenidos.

#### **d) Rendimiento en el proceso de astillado**

Los resultados obtenidos en campo se limitan a un tiempo de astillado para toda la biomasa de las parcelas aprovechadas mediante el sistema A de apeo y desrame y otro para todas las parcelas aprovechadas mediante árbol completo (sistema B). Este tiempo fue asignado a cada parcela de acuerdo a la cantidad de biomasa obtenida de ella. Para el caso de rendimientos esto se traduce en una igualdad de valores para todas las parcelas de uno y otro sistema, lo cual invalida la utilidad de análisis estadísticos.

Sin embargo, los resultados indican que existe un mayor rendimiento de 17,8 t/h en el caso del sistema B frente a un 16,5 t/h para el sistema A. Esto se debería a la alimentación de la astilladora, que en el caso del sistema de árbol completo se realizó en una fase y en el caso del sistema A, donde existían pilas de fustes por una parte y un apilado de ramas por otra (ver Figura 105), se realizó en dos fases, lo que incrementa el tiempo de triturado al pasar de una pila de material a otra.



**Figura 105. Pilas de biomasa. De izquierda a derecha, pila de ramas y copas (sistema A), pila de árbol completo (sistema B) y pila de fustes (sistema A).**

El astillado sobre ramas y puntas amontonados en cargadero en la experiencia de Tolosana et al. (2013a) alcanzó productividades máximas de 14 t/h. Sin embargo el autor indica que el rendimiento de astillado aumenta cuando se incluyen entre las ramas las trozas de sección menor, destinadas a la trituración para papel o tablero, como podría ser el presente caso en que se trituran fustes y árboles completos de hasta 25 cm de DAP con corteza. Igualmente, Stampfer y Kanzian (2006) afirman que la productividad de una astilladora varía con el tipo de material a astillar. Sin embargo, a partir de los datos disponibles no se puede asumir distintos rendimientos según la naturaleza del material de origen.

#### 4.3.3.2. Consumos de combustibles

Los resultados presentados en la Tabla 55 muestran los consumos de combustible realizados por la maquinaria utilizada durante los aprovechamientos.

**Tabla 55. Consumos en litros por toneladas verdes de la maquinaria utilizada.**

Sistema	Parcela	Cons. motosierra (l/t)	Cons. autocargador (l/t)	Cons. astilladora (l/t)	Cons. total (l/t)
A	1	0,65	1,67	1,21	3,53
	3	0,58	3,23	1,21	5,01
	6	0,65	2,88	1,21	4,74
	<b>Media</b>	<b>0,63</b>	<b>2,59</b>	<b>1,21</b>	<b>4,43</b>
	<b>Desv.est</b>	<b>0,04</b>	<b>0,82</b>	-	<b>0,79</b>
	<b>CV(%)</b>	<b>6,57</b>	<b>31,49</b>	-	<b>17,87</b>
B	4	0,42	3,76	1,12	5,30
	5	0,42	3,41	1,12	4,95
	8	0,22	3,77	1,12	5,11
	<b>Media</b>	<b>0,35</b>	<b>3,64</b>	<b>1,12</b>	<b>5,12</b>
	<b>Desv.est</b>	<b>0,11</b>	<b>0,20</b>	-	<b>0,18</b>
	<b>CV (%)</b>	<b>32,23</b>	<b>5,60</b>	-	<b>3,44</b>

##### a) Consumo de la motosierra

El sistema A consume más combustible por tonelada de biomasa obtenida debido al mayor procesado requerido en el apeo y derrame (0,63l/t frente a 0,35l/t del sistema B). Los resultados indican que sí existen diferencias significativas (P value = 0,0406) con un 95% de nivel de confianza en el consumo de combustible de la motosierra entre un sistema y otro.

#### **b) Consumo del autocargador**

En cuanto al consumo de combustible en el autocargador en las operaciones de desembosque y saca (2,59 l/t frente del sistema A a 3,64 l/t del sistema B) en que se han necesitado un menor número de ciclos de autocargador para llevar a cabo los transportes. Sin embargo, el análisis estadístico indica que no existen diferencias significativas en el consumo de combustible en la fase de desembosque entre un sistema y otro (P value = 0,148 para un nivel de confianza del 95.0%).

#### **c) Consumo de la astilladora**

Al igual que sucedía en el análisis de rendimiento de la astilladora se dispone sólo de dos datos distintos de consumo, uno para el sistema A y otro para el sistema B, lo cual invalida el uso de pruebas estadísticas.

Se advierte un ligero mayor consumo por tonelada en el caso del sistema A (fuste más ramas) de 1,21 l/t frente al sistema B de 1,12 l/t. Esto puede deberse a que el material, al astillarse en dos fases, es en sí más heterogéneo que en el caso de árbol completo y la astilladora requiera un mayor esfuerzo y por tanto mayor consumo por tonelada astillada. También puede deberse a un posible tiempo de espera por alimentación, entre las dos fases.

#### **d) Consumo total de combustible**

Con todo ello, el consumo total de combustible para el sistema A es de 4,43 l/t, mientras que en el sistema B es de 5,12 l/t, consumiendo así este último un 24% más combustible en todo el proceso de aprovechamiento y astillado de la biomasa extraída.

### **4.3.3.3. Calidad de la biomasa**

El análisis de la calidad de la biomasa se puede encontrar en el Apartado 4.4.1. *Astillas* y en el Anexo 5.

### **4.3.3.4. Impacto sobre el medio**

En la Tabla 56 se muestran los resultados del porcentaje de superficie afectada por el impacto de rodadura, la superficie de sotobosque dañado y la ponderación del grado de daño sobre la masa de árboles remanentes.



Tabla 56. Ponderación del grado de daño.

		Parcela	Sup sotobosque dañado (%)	Sup rodadura (%)	Grado daño pies remanentes
<b>Sistema A (integrado)</b>		P1	30	5	22
		P3	40	7	29
		P6	30	5	20
		<b>Media</b>	<b>33,3</b>	<b>5,7</b>	<b>23,7</b>
		<b>Desv. Est.</b>	<b>5,77</b>	<b>1,15</b>	<b>4,72</b>
		<b>CV (%)</b>	<b>17,32</b>	<b>20,38</b>	<b>19,96</b>
<b>Sistema B (árbol completo)</b>		P4	60	10	31
		P5	40	10	20
		P8	50	13	45
		<b>Media</b>	<b>50</b>	<b>11</b>	<b>32</b>
		<b>Desv. Est.</b>	<b>10</b>	<b>1,73</b>	<b>12,53</b>
		<b>CV (%)</b>	<b>20</b>	<b>15,47</b>	<b>39,15</b>

Para todos los impactos considerados, el sistema de árbol completo presenta medias más elevadas de daños. Concretamente, para el grado de daño sufrido por los árboles remanentes en las parcelas aprovechadas mediante el sistema B de árbol completo, por lo general es de media un 8,7% mayor al sufrido por las parcelas del sistema A. Esto se debe la carga de los árboles sobre la caja del autocargador que al tener copa requieren un mayor espacio de maniobra por parte de la pinza y por tanto, en su movimiento daña los árboles colindantes.

Los estudios inferenciales de estas variables indican que no existen diferencias significativas entre sistema en cuanto a superficie de sotobosque afectada o grado de daño de los pies remanentes (P value = 0,08 y 0,37 respectivamente con un 95% de confianza). Sin embargo, sí existen diferencias significativas en cuanto a la superficie afectada por la rodadura (P value= 0,01). Esto se debe al número mayor de ciclos requeridos por el autocargador en el sistema de árbol completo que obviamente al realizar más pasadas genera más marcas de rodaduras sobre el suelo. Gráficamente, estos resultados se pueden observar en las Figuras 106, 107 y 108.

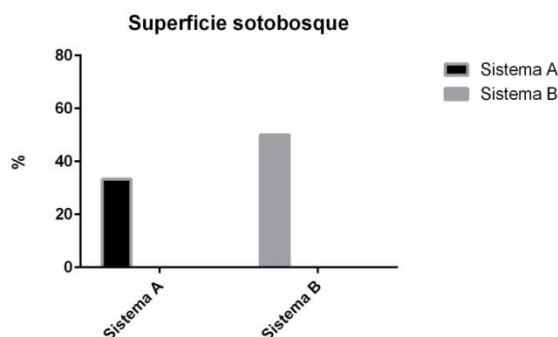
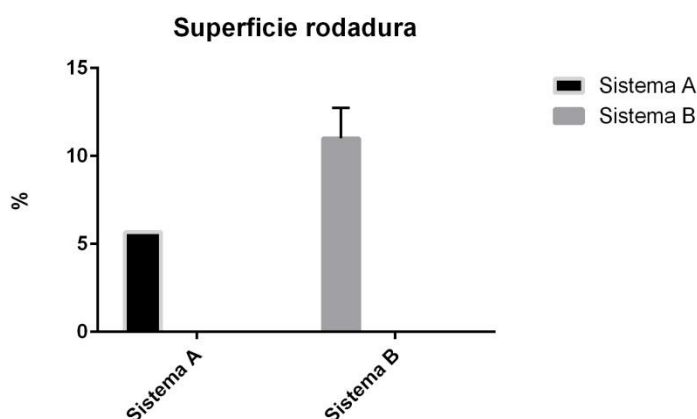
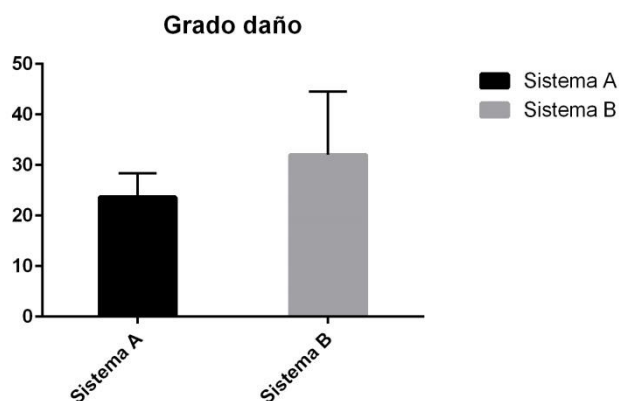


Figura 106. Comparativa de la superficie de sotobosque dañada según sistema de aprovechamiento.



**Figura 107. Comparativa de la superficie de rodadura según el sistema de aprovechamiento.**



**Figura 108. Comparativa del grado de daño sobre pies remanentes según el sistema de aprovechamiento.**

No obstante, para poder evaluar debidamente el impacto real sobre la masa remanente se requeriría de una continuación en el seguimiento de los daños a lo largo de algunos años, lo que no ha sido posible en el presente estudio, sin embargo, en este caso tanto por la magnitud de los impactos como por la escasa superficie afectada por los tratamientos (un total de 2 ha), los daños generados no poseen gran trascendencia en cuanto a la estabilidad o pervivencia de la masa.

### 4.3.3.5. Rentabilidad económico-financiera

#### a) Análisis de costes

En el Anexo 4 se exponen los datos tomados para la estimación de los costes, basados en experiencias comparables (Miyata 1980, Valente et al. 2011, Spinelli 2012) y comunicaciones de empresas forestales consultadas (Moixent Forestal, Forestal del Maestrazgo y Biofor Energía). Además, los datos han sido contrastados con referencias bibliográficas a nivel español (Arno y Masip 2003, Colegio de Ingenieros de Montes 2004) y de cuadros de precios (TRAGSA 2011). Así, la Tabla 57 recoge valores medios de cada uno de los componentes del coste (costes unitarios) en cada uno de los procesos de aprovechamiento, astillado y transporte de la biomasa (unidades de obra).

**Tabla 57. Componentes del coste.**

Componentes	Unidades	Motosierra	Autocargador	Astilladora	Camión
Coste de personal	€/h	20	18	18	18
Costes fijos totales	€/h	0,11	18	20	6
Costes variables totales	€/h	22	29	50	58
Costes indirectos	%	6%	6%	6%	6%
Beneficio industrial	%	8%	8%	8%	8%
<b>Costes TOTALES</b>	<b>€/h</b>	<b>25</b>	<b>53</b>	<b>79</b>	<b>73</b>

Basado en estos costes medios unitarios, la Tabla 58 recoge los resultados del análisis de los costes de operación por tonelada de biomasa obtenida para una parcela representativa (con datos medios) tratada según el sistema A y otra tratada según el sistema B (árbol completo).

**Tabla 58. Análisis de los costes de las operaciones por sistema de aprovechamiento**

Sistema de aprovechamiento	Operación	Coste horario (€/h)	Tiempo de trabajo efectivo (h/t)	Rendimiento (t/h)	Coste unitario (€/t)
A - Sistema integrado	Apeo y procesado	25	0,60	1,66	14,96
	Desembosque	53	0,58	1,74	30,78
	Astillado	79	0,06	16,55	4,77
	Transporte (a 40 Km)	73			3,33
	<b>TOTAL</b>				
B- Sistema de árbol completo	Apeo	25	0,38	2,64	9,46
	Desembosque	53	0,83	1,21	43,73
	Astillado	79	0,06	17,79	4,44
	Transporte (a 40 Km)	73			3,33
	<b>TOTAL</b>				

El sistema A presenta unos costes por tonelada al 45% de humedad de 53,84€ frente al sistema de árbol completo en que este coste sube a 60,96€ por tonelada al 45% de humedad.

La Tabla 59 presenta los costes expresados en las unidades más comúnmente utilizadas en cada uno de los procesos y en su suma total. Los resultados se muestran en toneladas de biomasa en verde (45% de humedad), en base anhidra (0% de humedad) y en MWh según factor de conversión de MWh a GJ (1MWh = 3,6 GJ) (Klass, 1998). Se toma como poder calorífico de referencia por tonelada de *Pinus halepensis* el obtenido de los ensayos, es decir, el valor medio de 17,43 MJ/kg en base anhidra a 0% de humedad (17,43 MJ/kg = 17,43GJ/t = 4,85MWh/t).

**Tabla 59. Costes de las operaciones según unidades.**

	Coste en verde (€/t húmedas)		Coste en seco (€/t anhidras)		Coste energético (€/MWh)	
	A	B	A	B	A	B
Apeo y procesado	14,96	9,46	27,20	17,20	5,59	3,53
Desembosque	30,78	43,73	55,96	79,51	11,49	16,33
Transporte	3,33	3,33	6,05	6,05	1,78	1,66
Astillado	4,77	4,44	8,67	8,07	1,24	1,24
<b>TOTAL</b>	<b>53,84</b>	<b>60,96</b>	<b>97,89</b>	<b>110,84</b>	<b>20,11</b>	<b>22,76</b>

Los costes en € por tonelada en verde obtenida se traducen en 97,89€ por tonelada anhidra (0% humedad) para el caso del sistema A y de 110,84€ por tonelada anhidra para el sistema B y en 20,11€ por MWh y 22,76€ por MWh respectivamente.

Como se puede observar en los resultados, el coste de procesado en el sistema A aumenta los costes respecto al apeo en el sistema B de árbol completo. Según Laitila et al. (2010), el desramado de los fustes aumenta de manera significativa el coste de las astillas y reduce el coste de su desembosque, aunque esta reducción es pequeña. No obstante, el efecto del desramado sobre los costes de producción de astillas se reduce cuando se aumenta el DAP de los árboles aprovechados.

En cuanto al proceso de apeo, los costes del sistema B se reducen un 37% respecto al mismo coste en el sistema A, lo que coincide parcialmente con Spinelli et al. (2014) que indican una reducción de costes del 40-50% en segundas claras sobre pinos en monte mediterráneo. En el presente caso hay que tener en cuenta que se trata de unas primeras claras retrasadas y probablemente la mayor densidad de la masa ha procurado el desrame natural y se requiere menos dedicación en tiempo de trabajo de procesado de los pies en el sistema A integrado, lo que hace que la diferencia entre uno y otro sistema en cuanto a costes de apeo sea menor que la esperada.

En estudios previos, los costes de aprovechamiento de madera corta industrial con destino de uso para tableros o para pastas celulósicas eran a menudo comparables o menores que los costes de aprovechamiento de árbol completo (Landford y Stokes 1996). Por el contrario, otros

---

dos estudios Gingras 1994, Yaoxiang et al. 2006) concluyeron que el coste de madera corta era de 15 a 30% más caro que el coste del sistema de árbol completo. En estos estudios, las diferencias entre costes estaban afectadas principalmente por la productividad de la maquinaria así como por la distancia de desembosque y el tamaño de los árboles. Estos autores encontraron también más productivo el sistema de árbol completo con respecto al de madera corta.

La productividad y costes de madera corta industrial y el sistema de aprovechamiento de árbol completo vienen determinados por el tipo de parcela forestal y variables de aprovechamiento tales como tamaño de los árboles, densidad de aprovechamiento, distancia de desembosque y las cualidades de los operarios forestales (Andersson 1994, Egan 1999, Wagner et al. 2000, LeDoux y Huyler 2001, Kellogg y Spong 2004). Principalmente, el componente más caro en el coste total de aprovechamiento resultó ser el coste de transporte entre el área de aprovechamiento y en ambos sistemas según Han et al. (2004) y Kellogg y Spong (2004).

En este sentido los resultados obtenidos corroboran esta teoría, con entorno a un 57% y 72% del coste total explicado por el coste de desembosque en ambos sistemas A y B respectivamente. En un estudio comparativo entre madera corta industrial y aprovechamiento de árbol completo Adebayo et al. (2007) obtuvieron unos porcentajes de 36% y 54% respectivamente, en parte debido al mayor coste del proceso de apeo (y por tanto peso sobre el total) al ser este mecanizado. Aunque se puede observar que entre ambos existe igualmente una diferencia de entorno al 20% como en los resultados obtenidos en el presente estudio.

Según Frühwald (2007), los costes de producción de astillas provenientes de restos de aprovechamiento de biomasa se sitúan por debajo de los costes de las astillas procedentes de árbol completo, estimados en 10 €/MWh y 15 €/MWh respectivamente en aclareos de *Picea abies* en Escandinavia y Norte de Alemania, lo que apoya los resultados obtenidos en el presente estudio.

En España, las experiencias de Enersilva (2007) demuestran que los costes de recogida y transporte de biomasa para bosques adultos del género *Pinus* varían entre 41 y 95 €/t (a 26% de contenido en humedad sobre base húmeda), mientras que los actuales resultados calculados a esa misma humedad se sitúan entre 65 €/t para el sistema A y 95€/t para el sistema B, lo que resulta comparable con las citadas experiencias.

Por otra parte, la Tabla 60 recoge resultados comparables recogidos en bibliografía sobre estudios de aprovechamiento de árbol completo (sistema B), costes y emisiones con los obtenidos para el mismo sistema (apeo de árbol completo, desembosque, astillado en cargadero y transporte a planta) procedente de diferentes países a nivel mundial según la distancia de desembosque y la distancia de transporte a planta.

**Tabla 60. Comparación de costes de aprovechamiento de árbol completo y emisiones generadas entre diferentes estudios.**

País	Autores	Distancia		Coste de aprovechamiento (€/MWh)	Emisiones de CO <sub>2</sub> (KgCO <sub>2</sub> /MWh)
		Desemb. (m)	Transp. (Km)		
España		700-850	80	22,76	6,3
Japón	Yoshioka (2011)	100-1000	20-80	45,37-82,76	3,08-7,01
Reino Unido	Hunter et al. (1999)		20-80	7,40-10,23	
Suecia	Andersson (1999)		60	10,23-11,25	
Finlandia	Korpilahti (1998)	250	60	7,2	5,61

\* Los resultados se presentaban en el US\$. Para el cambio a € se ha utilizado el cambio a 24/04/2014 que es de 0,72 €/.\$.

En la comparación de resultados se puede apreciar un coste de aprovechamiento menor que el que se da en Japón, pero casi el doble del resto de los países europeos que se sitúan entorno a los 10 €/MWh.

Según Hunter et al. (1999), los costes de obtención de una unidad de bioenergía en una planta de conversión energética se encuentran al mismo nivel que los costes de los combustibles fósiles, como por ejemplo el carbón, gasóleo y el gas. Esto puede interpretarse como que la biomasa como fuente de energía es competitiva con respecto a los combustibles fósiles en los países europeos (Yoshioka 2011) y por tanto, sería un objetivo a alcanzar para los sistemas descritos en el presente estudio. Los motivos de un coste de aprovechamiento mayor que en los tres países europeos coinciden con los de Japón (Yoshioka 2011) y son:

- la escasa capacidad de carga y la potencia de la astilladora de las máquinas estudiadas en comparación con el resto de las máquinas europeas.
- El uso de maquinaria no totalmente adaptada al trabajo a realizar
- Operadores con poca experiencia en la recogida de biomasa con fines energéticos.

El uso de maquinaria adaptada a árbol completo más la formación específica de los operarios podría disminuir los costes de aprovechamiento. Por ejemplo, en el centro y norte de Europa es habitual utilizar empacadoras en terrenos con nula o poca pendiente para reducir el volumen de la biomasa residual y se utilizan trailers de 30 t, de manera que el desembosque y el transporte a planta son muy eficientes (Yoshioka 2011). Sin embargo, hay que tener en cuenta que en muchos de los casos, esta maquinaria se aplica sobre terrenos llanos con muy buena accesibilidad y densidad vial en el monte, especialmente en los países nórdicos, por lo cual se hace necesarias la implementación y puesta en uso de maquinaria y sistemas adaptados a la topografía abrupta de la Comunitat Valenciana, en este caso.

## b) Análisis de ingresos

Los precios de venta de las astillas muestran una gran variación dependiendo de su origen, el volumen de astillas, la calidad y el conocimiento del comprador (Spinelli 2007). En este sentido dependen sumamente del contenido en humedad, de su granulometría, así como de las especificaciones requeridas por la tecnología según su destino final, tales como presencia de corteza, porcentaje de finos, uniformidad, etc. (Forestal Maestrazgo 2013). Es por ello que existe una amplia horquilla de precios.

En el caso del presente estudio los precios han sido proporcionados por las empresas forestales consultadas (Moixent Forestal S.L., Biofor Energía S.L. y Forestal Maestrazgo S.L.), según humedades y granulometría. La Tabla 61 presenta los precios medios de venta de astilla estimados, tanto en cargadero como en planta, según las informaciones recibidas de las empresas. Así los precios de las astillas de fuste van desde 36-100 €/t según destino, lugar de compra y humedades, y entre 25-90€/t para el caso de astillas de ramas y de árbol completo, de nuevo según destino, lugar de compra y humedades.

**Tabla 61. Precios de venta estimados.**

Destino de la astilla	Fracción	Precio en cargadero(€/t)		Precio en planta (€/t)	
		>30%H	<30%H	>30%H	<30%H
Térmico	Fuste	36	45-50	45-50	70-100
	Ramas		45-50*		70-90*
	Árbol completo		45-50*		70-90*
Eléctrico (gasificación)	Fuste				
	Ramas	25		40-45	
	Árbol completo	25		40-45	
Cogeneración	Fuste				
	Ramas	25		40-45	
	Árbol completo	25		40-45	

\* tras un año de acopio para que pierda toda la acícula. No suele hacerse.

Cabe señalar que los factores que influyen directamente el coste de transporte a planta (tipo de camión y carga, humedad de la astilla durante el transporte, distancia entre cargadero y planta) determinarán de forma determinante el precio final en planta.

Para los cálculos de rentabilidad, dentro de la anterior horquilla de precios calculados se han tomado los valores más adecuados para la calidad de la astilla producida en los aprovechamientos, teniendo en cuenta una distancia media representativa a planta de 40 km (Tolosana et al. 2008a, Baraza y Merino 2009, Martínez-Abarca 2013). La Tabla 62 recoge estos precios, siendo los precios más altos para la astilla de fuste (entre 36-50 €/t en cargadero y

entre 50-100€/t en planta en ambos lugares según contenido en humedad) mientras que la astilla de ramas y de árbol completo presentan precios más bajos (entre 25-45 €/t en cargadero y entre 45-90 €/t en planta en ambos lugares según contenido en humedad) sin diferencias entre ellas pese a la supuesta diferencia de calidades de las astillas.

**Tabla 62. Datos de base para la estimación de ingresos.**

Fracción	Precio en cargadero (€/t)		Precio en planta (€/t)	
	>30%H	<30%H	>30%H	<30%H
	Fuste	36	50	50
Ramas	25	45	45	90
Árbol completo	25	45	45	90

### c) Análisis de rentabilidades

#### - Rentabilidad económica

Los resultados sobre rentabilidad económica se presentan en la Tabla 63.

**Tabla 63. Rentabilidad económica de los aprovechamientos.**

Re (€/t)	Venta en cargadero		Venta en planta	
	>30%H	<30%H	>30%H	<30%H
<b>Sistema A</b>	-1,83	-1,42	12,30	42,29
<b>Sistema B</b>	-9,89	-7,34	7,43	33,64

Para ambos sistemas la rentabilidad económica es negativa tanto en verde como para astilla seca si esta es vendida directamente en cargadero. Esto se debe, sin duda, a la pequeña superficie de las parcelas aprovechadas (2.500 m<sup>2</sup>), ya que se han tomado las toneladas medias de biomasa por sistema, que hace que el coste de los trabajos supere los ingresos recibidos. Según Spinelli (2007) y Tolosana (2009), la carga de biomasa a recoger por hectárea es directamente proporcional a la rentabilidad obtenida.

En este tipo de claras en latizal alto, la rentabilidad es mayor, no obstante, en el sistema A, donde se aprovechan dos clases de material astillado a distinto precio, siendo la astilla derivada del fuste determinantemente aceptada en el mercado para la fabricación de biocombustibles sólidos de alta calidad como pellets (Filbakk 2011).



### - Rentabilidad financiera

La Tabla 64 muestra los resultados obtenidos del cálculo de la rentabilidad financiera comparando los dos sistemas de aprovechamiento, astillado y transporte analizados.

**Tabla 64. Rentabilidad financiera de los aprovechamientos.**

R <sub>f</sub> (€/t)	Venta en cargadero		Venta en planta	
	>30%H	<30%H	>30%H	<30%H
<b>Sistema A</b>	-19,60	-28,08	-6,15	14,62
<b>Sistema B</b>	-32,92	-41,88	-16,28	-1,92

En el caso de la rentabilidad financiera, el balance negativo se acentúa aún más para los dos sistemas investigados, ya que se tienen en cuenta las inversiones realizadas. Obviamente, es de esperar que con mayores superficies de aprovechamiento por economía de escala los costes se reduzcan y rentabilicen el uso de la biomasa con fines térmicos (Spinelli 2007, LIFE 07 Best4VarioUse 2012)

Igualmente, el sistema A, integrado, es más rentable financieramente que el sistema B, de árbol completo. Esto se debe a que la tecnología normalmente utilizada en el trabajo de claras y cortas finales de *Pinus halepensis* en España ha sido desarrollada inicialmente para optimizar la extracción de fustes en autocargador para su uso maderable (Moixent Forestal 2012).

Por otra parte, en cuanto a comparación de los dos sistemas estudiados, diversos autores (Valente et al. 2011, Hohle 2010, Hudson 1995) sugieren que el sistema de árbol completo permite la integración de la recuperación de los residuos de corta con la extracción de la madera tradicional, ayudando a reducir los costes de ambas operaciones. Sin embargo, la presente experiencia demuestra que de realizarse conjuntamente esta recogida de restos una vez procesado el árbol, los costes totales son menores que respecto a la extracción del árbol completo. La separación de estos residuos y de los fustes genera dos tipos de calidades de biomasa distinta que otorga un valor añadido a la biomasa extraída de fustes libres de ramas respecto a la de árbol completo, cuya mezcla de biomasa de fuste y copa es considerada de menor calidad.

Según Tolosana et al. (2007 y 2008a), las mejoras en la tecnología y la optimización de la logística tienen un gran potencial para aumentar los rendimientos y reducir los costes en el aprovechamiento de la biomasa residual, siendo necesario realizar más experiencias de investigación que orienten el potencial del aprovechamiento de biomasa residual forestal de una manera sostenible.

Los sistemas mecanizados (apeo y elaboración con cosechadora forestal) permiten integrar el aprovechamiento de biomasa con el de madera: la cosechadora puede dejar la biomasa acordonada a borde de calle. Aunque esto supone un 20% de pérdida de productividad en el apeo y procesado de la madera, facilita todas las operaciones posteriores con la biomasa,

mejorando la rentabilidad conjunta. Los sistemas mecanizados se pueden adaptar así con facilidad a conseguir costes de 41,8 €/t verde de astilla puesta en planta, un valor con posible rentabilidad en las condiciones actuales de mercado. Este coste, en cambio, se dispara cuando el apeo y elaboración son manuales (Tolosana et al. 2013a).

#### 4.3.3.6. Emisiones de gases de efecto invernadero

Tomados los valores de referencia para la densidad de los combustibles, sus poderes caloríficos y los factores de emisión, se obtienen las emisiones de Kg de CO<sub>2</sub> equivalentes por tonelada de biomasa producida. La Tabla 65 presenta los resultados de las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes calculadas por tonelada producida en los dos sistemas analizados.

**Tabla 65. Emisiones de Kg de CO<sub>2</sub> equivalentes emitidas por tonelada de biomasa producida.**

Operación	Consumo		Emisiones		
	Litros (l)	Terajulios (TJ)	Kg CO <sub>2</sub> e	kg CO <sub>2</sub> e/Tn	
<b>Sistema A</b>	Apeo	4,77	1,56E-04	10,81	1,62
	Desembosque	16,95	5,96E-04	44,17	6,63
	Astillado	8,05	2,83E-04	20,99	3,15
	Transporte	9,09	3,20E-04	23,69	3,55
	<b>TOTAL</b>	<b>38,86</b>	<b>1,355E-03</b>	<b>99,67</b>	<b>14,95</b>
<b>Sistema B</b>	Apeo	2,35	7,70E-05	5,33	0,90
	Desembosque	21,63	7,61E-04	56,38	9,49
	Astillado	6,68	2,35E-04	17,40	2,93
	Transporte	8,10	2,85E-04	21,11	3,55
	<b>TOTAL</b>	<b>38,76</b>	<b>1,358E-03</b>	<b>100,23</b>	<b>16,87</b>

Para el cálculo de los litros de combustible utilizados por el camión, se parte de una distancia representativa de ida y vuelta de 80km, y 60 minutos de desplazamiento. Se ha tomado el consumo de un camión remolque de 22 t de capacidad de astillas húmedas y se le ha asignado los litros consumidos por tonelada. En la Tabla 65 se ven reflejados los litros correspondientes a las 6,66 t de biomasa del sistema A y las 5,94 t producidas mediante el sistema B.

El mayor consumo de combustible por parte del autocargador en el sistema B (3,64l/t) frente al sistema A (2,59l/t) hace que las emisiones sean más altas (16,87 KgCO<sub>2</sub>/t) en sistema B frente a 14,95 KgCO<sub>2</sub>/t en sistema A).

Según la comparativa entre diferentes estudios cuanto a emisiones de anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>) a la atmósfera para aprovechamiento de árbol completo, mostrada en la Tabla 60, se puede constatar que estas emisiones (6,3 kgCO<sub>2</sub>/MWh para el sistema de árbol completo y 5,6 kgCO<sub>2</sub>/MWh para el sistema integrado) son ligeramente inferiores a las documentadas en Japón por Yoshioka (2011) (con 0,6 kgCO<sub>2</sub>/MWh de menos) y claramente superiores a las documentadas por Korpilahti (1998) (con 1,7 kgCO<sub>2</sub>/Mwh de diferencia) en Finlandia.

Se podría reducir la huella de carbono sustituyendo el uso de combustibles fósiles por el de biocombustibles a la hora de producir energía térmica. Sin embargo, de acuerdo con Yoshioka (2011), para llevar a cabo una evaluación profunda de los resultados sería necesario examinar no sólo el consumo de combustible por parte de la maquinaria forestal, sino el balance energético todo el sistema que incluiría los materiales, la construcción, las reparaciones y mantenimiento de la maquinaria usada en el monte así como los costes asociados a una planta de conversión energética.

#### 4.3.3.7. *Análisis de balances energéticos*

Tomados los valores de referencia para la energía contenida por litro de combustible (kWh/l) y un supuesto de energía liberada al producirse la combustión de biomasa en una planta térmica de mediana escala, podemos obtener las unidades de biocombustibles sólido producidas por cada unidad de energía en cada uno de los dos sistemas de aprovechamiento analizados. Los resultados se muestran en la Tabla 66 en ratio de input de energía (IE) y unidades de bioenergía producidas.

**Tabla 66. Unidades de biocombustible sólido producidas por cada unidad de energía introducida.**

	IE (%)	Unidades de bioenergía
<b>Sistema A</b>	8,3	12,0
<b>Sistema B</b>	9,3	10,7

Por cada unidad de combustibles fósiles introducidas para realizar el aprovechamiento se producen, 12 y 10,7 unidades de bioenergía equivalentes en forma de astillas en los sistemas A y B respectivamente. Esto se debe probablemente a la necesidad de optimización del sistema de aprovechamiento de árbol completo (sistema B) que hace que los tiempos sean mayores en el caso del desembosque y por tanto se requiera más input energético.

En el estudio realizado por Valente et al. (2011), el sistema de árbol completo llega a producir hasta 20 unidades de bioenergía equivalentes por cada unidad de combustibles fósil introducida. Los resultados dependen de los rendimientos de combustión de las planta de biomasa tomados como referencia, aparte del consumo de combustibles durante el

aprovechamiento. En cualquier caso, este bajo ratio de energía para la producción de astillas ha sido confirmado por otros estudios previos (Wihersaari 2005).

En análisis de comparación entre varios sistemas de aprovechamiento de desembosque de árbol completo y astillado mediante astilladora móvil en campo, astillado tras saca en cargadero y astillado tras transporte del árbol completo en planta, Yoshioka (2011) obtiene para el caso de astillado en cargadero resultados similares (entre 3,92 y 8,92%). El valor más alto coincide plenamente con los resultados obtenidos.

## 4.4. Desarrollo biocombustibles sólidos de alto valor añadido

### 4.4.1. Astillas

Las tablas completas de resultados de cada ensayo por muestra se encuentran en el Anexo 5. Los siguientes resultados presentan los valores medios y desviación típica de la totalidad de las muestras para cada fracción analizada.

#### a) Características morfológicas

##### a1) Clases de astilla según su origen y fuente del material

Las astillas procedentes de las distintas fracciones de los aprovechamientos realizados se clasifican de según muestra la Tabla 67.

**Tabla 67. Clasificación de las astillas según su origen.**

Sistema aprovechamiento	Fracción	Clasificación
A (integrado)	Fuste	1.1.3.2. Biomasa leñosa procedente del monte, fuste, coníferas
	Ramas	1.1.4.2. Biomasa leñosa procedente del monte, residuos de corta, fresco/verde, coníferas

Sistema aprovechamiento	Fracción	Clasificación
B (árbol completo)	Árbol completo	1.1.1.2. Biomasa leñosa procedente del monte, arboles completos sin raíces, coníferas

#### a2) Clasificación del material según tamaño

Atendiendo a la granulometría de las astillas, todas ellas presentan un tamaño medio que encuadra dentro de la clasificación de P31,5 independientemente de su fracción de origen, aunque la mediana de la distribución de partículas media para el caso de las astillas procedentes de ramas es ligeramente inferior (28 mm) a la de fuste (30,29 mm) y a la de árbol completo debido a que por lo general el material de origen astillado posee menores diámetros (ver Tabla 68).

**Tabla 68. Clasificación de las astillas según su tamaño.**

Sistema aprovechamiento	Fracción	<i>d</i> 50 media (mm)	Desv. Est.	CV (%)
A (integrado)	Fuste	30,29	0,69	2,27
	Ramas	28,00	1,18	4,21
B (árbol completo)	Árbol completo	30,04	0,75	2,50

#### b) Característica física: contenido en humedad

A continuación se muestran los resultados de las distintas mediciones de humedad durante el proceso de caracterización de las astillas. Se realizaron dos mediciones de humedad de las astillas, por una parte se midió la humedad de la astilla recibida secada en estufa y por otra se midió la humedad de la molienda de la misma necesaria para proceder al cálculo de contenido en cenizas (ver Tabla 69).

**Tabla 69. Humedad de las astillas**

Sistema aprovechamiento	Fracción	Humedad media estufa (% masa, b.h.)	Desv. Est.	CV (%)
A (integrado)	Fuste	50,18	1,07	2,14
	Ramas	43,13	0,42	0,98
B (árbol completo)	Árbol completo	45,96	0,78	1,69

Se puede observar una mayor cantidad de humedad en el material de fuste (50,18%) y de árbol completo (45,96%) respecto a la humedad contenida en las astillas de ramas (43,13%). Esto se debe a un menor secado de los troncos y del árbol completo durante las dos semanas hasta que tuvo lugar el astillado. De acuerdo con Hakkila (1962) pilas pequeñas de astillas secan antes que pilas grandes y este puede ser el motivo de un secado más rápido de la pila de ramas (de entorno a 3t) en comparación a las pila mayor de árbol completo (6 t), aunque este hecho no explica la mayor humedad media de la fracción de fuste pese a ser una pila algo mayor (3,5 t) que la de ramas. Según Acuna et al. (2012) no existen modelos predictivos de curvas de secado por fracción de material para aprovechamientos forestales (árbol completo, fustes y residuos forestales) y por ello no se ha podido encontrar literatura que pueda explicar la causa real de esta diferencia.

Tanto el tamaño como el contenido en humedad de las astillas son factores determinantes de su precio según las empresas forestales consultadas (ver Apartado 3.3.4.5.). En comparación con otros trabajos de aprovechamientos forestales realizados por estas empresas en montes de *Pinus halepensis* en el interior de la Comunitat Valenciana, se puede constatar que el contenido de humedad obtenido en este trabajo experimental es similar a las experiencias prácticas acumuladas.

### c) Características química: contenido en cenizas

En contenido en cenizas tras el análisis es el que se especifica en la Tabla 70.

**Tabla 70. Contenido en cenizas.**

Sistema aprovechamiento	Tipo muestra	Cenizas medias (%)	Desv. Est.	CV (%)
A (integrado)	Fuste	1,09	0,02	1,41
	Ramas	3,24	0,02	0,62
B (árbol completo)	Árbol completo	1,55	0,07	4,77

En cuanto a las cenizas se observan diferencias entre los tres tipos de materiales: la cantidad de cenizas resulta superior en la muestra de árbol completo (1,55%) que en la muestra de fuste (1,09%), sin embargo, las ramas presentan un destacado contenido de cenizas (3,24%) respecto a los contenidos medios de la fracción de árbol completo y fuste.

Según Richardson et al. (2002) el contenido en cenizas de los residuos forestales depende en gran medida de la proporción de follaje y de ramillas debido a que tanto la corteza como las hojas presentan mayor contenido mineral que la madera. Por tanto, una mayor presencia de acículas y un mayor porcentaje de corteza sobre una misma masa en la fracción de ramas, seguida por la de árbol completo hace que ambos presenten mayor contenido de cenizas que la

fracción de astillas de fuste. Este resultado viene refrendado por Thörnqvist (1984) que señala que en árboles defoliados la proporción de madera aumenta y el contenido en cenizas se reduce, lo que explicaría el menor contenido en cenizas de las astillas de fuste.

Un contenido en cenizas superior al 8% constituye normalmente un problema para la mayoría de los sistemas térmicos de astillas (López 2013). Así, por ejemplo, según la *US Environmental Protection Agency* (2007) y *The Carbon Trust* (2008) la astilla destinada a procesos de gasificación no debe superar un contenido de 25% en peso para el caso de gasificadores de lecho fluido y de 6% para el caso de gasificadores con reactores de parrilla fija (*fixed grade reactors*). Para su uso térmico se recomienda idealmente un contenido inferior al 3% (*Biomass Energy Resource Center* 2006). En este caso, todas las muestras de astillas cumplirían con este requisito.

También para la fabricación de pellets según norma EN 14961, el contenido de cenizas medio no debe superar 3%, por lo que para este uso, según los resultados obtenidos, las astillas provenientes de ramas quedarían descartadas, siendo solamente asumible las de árbol completo y fuste. López (2013) y Liokadis et al. (2011) refrendan estos resultados en sus experiencias para *Pinus halepensis*.

#### d) Características energéticas: poder calorífico

La Tabla 71 detalla los parámetros medios de los ensayos para el cálculo del poder calorífico bruto de las muestras tomadas de las tres fracciones de material (astillas de fuste, de ramas y de árbol completo) así como sus resultados.

**Tabla 71. Poder calorífico bruto (PCB) en base húmeda y seca y poder calorífico neto (PCN) en base seca de las muestras (EN 14981).**

Sistema aprovechamiento	Fracción	Media PCB	Media PCB	Media PCN	Desv. Est.	CV (%)
		VOL. CTE (MJ/kg, bh ensayo)	VOL. CTE (MJ/kg, b.s.*)	PRE. CTE (MJ/kg, b.s.*)		
A (integrado)	Fuste	17,04	18,93	17,58	0,13	0,78
	Ramas	16,76	18,62	17,27	0,00	0,03
B (árbol completo)	Árbol completo	16,99	18,87	17,52	0,07	0,39

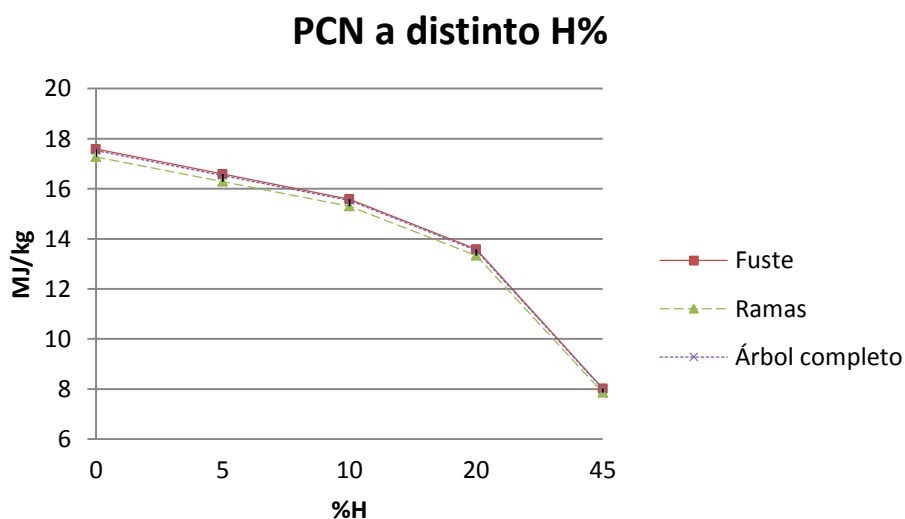
\*b.s. base seca (0% H)

Como puede observarse, el poder calorífico no presenta grandes variaciones entre los tres tipos de material (17,04 MJ/kg para la fracción de fuste, 16,76 MJ/kg para la fracción de ramas y 16,99 MJ/kg para la fracción de árbol completo). En este sentido Kollmann (1959) que afirma que 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.

A pesar de ello, cabe señalar que como resultado del análisis, las astillas de fuste poseen un ligero mayor poder calorífico neto (PCN) que las muestras de árbol completo, siendo las muestras de ramas las que menor PCN poseen. Esto coincide con Rodríguez-Rivas (2009) que sostiene que aquellas especies que presentan mayor lignificación, que son más densas y que tienen mayor contenido de resinas, terpenos y aceites esenciales poseen un mayor poder calorífico y explicaría el motivo de la tendencia a la disminución del PCN cuando se incorporaron muestras con hojas como pueden ser las muestras de ramas y de árbol completo, ya que el poder calorífico de ramas, follaje y corteza es distinto al de la madera de fuste (Musselman y Hocker, 1981, Singh y Kostecy, 1986, Olofsson, 1975).

Según Nurmi (1993 y 1997) el poder calorífico neto de las astillas provenientes de árboles completos es mayor que el de los fustes desramados, esto se debe al mayor poder calorífico de la biomasa de la copa en comparación al de la biomasa de fustes de madera pura. Sin embargo, en el presente caso, la variación en los resultados es tan pequeña que no permite corroborar ninguna de las dos teorías.

Por otra parte, en cuanto al análisis de la influencia de los distintos contenidos de humedad sobre el poder calorífico, los ensayos conformes a normativa (EN14918), constatan que el contenido en humedad influye de manera significativa sobre el poder calorífico neto, disminuyendo conforme aumenta la humedad contenida en la biomasa. Así, por ejemplo, para la fracción fuste el PCN a presión constante a una humedad en verde del 45% es de 8,02 MJ/Kg, mientras que a una humedad del material seco al aire del 20% es de 13,58 MJ/Kg, siendo la de 17,58 MJ/Kg en el caso del material anhidro (0% de humedad). Esta influencia es corroborada por otros autores para *Pinus halepensis* (López 2013) y para *Quercus ilex* (Fernández-Puratic 2012). La Figura 109 muestra la disminución de PCN con el contenido en humedad de la muestra. La tabla de los resultados de PCN a distintas humedades de las tres fracciones analizadas puede encontrarse en el Anexo 5.



**Figura 109. Poder calorífico neto (PCN) a presión constante según contenido en humedad para cada fracción analizada según normativa (EN 14981).**



### e) Clasificación de la calidad de las astillas ensayadas

Por último, como resultado del conjunto de valores obtenidos en los anteriores ensayos se procede a determinar la clasificación de la calidad de las astillas obtenidas en los aprovechamientos según la norma EN 14961-4. La Tabla 72 muestra los resultados de la asignación del material ensayado a las clases de calidad determinadas por esta normativa.

**Tabla 72. Resumen de los resultados de los ensayos de calidad.**

Sistema aprovechamiento	Tipo muestra	Origen fuente	y Tamaño de partícula (mm)	Contenido en H (% en masa)	Cenizas (% en masa en b.s.*)	Poder calorífico neto (MJ/Kg)	Calidad**
A (integrado)	Fuste	1.1.3.2. Biomasa leñosa procedente del monte, fuste, coníferas	P31,5	50,18	1,09	17,59	ENPLUS A2
	Ramas	1.1.4.2. Biomasa leñosa procedente del monte, residuos de corta, fresco/verde, coníferas	P31,5	43,13	3,24	17,27	-
B (árbol completo)	Árbol completo	1.1.1.2. Biomasa leñosa procedente del monte, arboles completos sin raíces, coníferas	P31,5	46	2	17,53	ENPLUS B1

\*b.s. base seca (0% H)

\*\* Sin tener en cuenta el ensayo de humedad

Los resultados de los análisis muestran que las astillas procedentes de fuste y de árbol completo cumplen los requisitos para la obtención de un certificado de calidad ENPLUS A2 y B1 respectivamente, siempre que si se diera un secado de las mismas que las situara por debajo del 35% en contenido en humedad. Sin embargo, las astillas procedentes de ramas presentan más contenido en ceniza del tolerado por la clasificación establecida por la EN14961-4 y por tanto no podría clasificarse su calidad. Disminuyendo ligeramente este contenido en cenizas por debajo del 3% sí podrían ser clasificadas como ENPLUS B1.

Con ello, cabe destacar la importancia de un secado previo de las astillas y de la inclusión o mezclas de material de diámetros cuanto más superiores mejor con el fin de reducir al máximo posible el contenido en cenizas.

En este sentido, el sistema A genera astillas de dos tipos de calidades: por una parte se generan astillas de fuste con calidad mayor a las de árbol completo y por otra parte se generan astillas de ramas de calidad inferior a las de árbol completo. La conveniencia de un sistema u otro depende del destino energético de las astillas. Según Laitila (2010), el apeo de pies con ramas reduce la calidad de las astillas, pero esto sólo constituye un factor crítico para las plantas térmicas pequeñas que requieren contenidos de cenizas muy bajo para operar convenientemente, como es el caso de plantas de combustión pequeñas y plantas de gasificación. Así, el material desramado produce un biocombustible uniforme libre de acículas y ramas beneficioso tanto en plantas de pellets como en mayores plantas de cogeneración, sobre todo en gasificación, con una capacidad restringida de manejo de altos niveles de cloro y metales alcali contenidos en el material de rama (Nurmi y Hillebrand 2007). Una cantidad suficiente de álcalis y cloro produce aglomeración de residuos arenosos en el lecho y corrosión en calderas de lechos fluidos, lechos circulantes e intercambiadores de calor (Nurmi y Hillebrand 2007). Este problema es mayor con astillas de biomasa residual que incluyen mayor proporción de cortezas y acículas, no con árboles enteros (Laitila 2010).

#### 4.4.2. Pellets

##### 4.4.2.1. Ensayos de laboratorio

Las tablas completas de resultados de cada ensayo por muestra se encuentran en el Anexo 5. Los siguientes resultados presentan los valores medios y desviación típica de la totalidad de las muestras para cada fracción analizada.

#### a) Características morfológicas

##### a1) Clases de pellets según su origen y fuente del material

El origen de los pellets elaborados es el de material astillado del fuste desramado (con corteza y sin corteza y de las clases diamétricas 15 y 20) y de las ramas de la misma masa donde se sitúan las parcelas experimentales de *Pinus halepensis*. Además, de bosques muy cercanos en el mismo término municipal de Enguera se extrajeron fustes y ramas en un aprovechamiento similar de *Pinus pinaster*, con el fin de establecer comparativas y mezclas (ver Apartado 3.4.2.7.). La Tabla 73 muestra el origen de los pellets analizados.

**Tabla 73. Origen de los pellets analizados (EN 14961-1).**

<b>Muestra</b>	<b>Origen</b>
PH CC 15	1.1.3 Fuste
PH SC 15	1.1.3 Fuste
PH CC 20	1.1.3 Fuste
PH SC 20	1.1.3 Fuste
PP CC 15	1.1.3 Fuste
PP SC 15	1.1.3 Fuste
PP CC 20	1.1.3 Fuste
PP SC 20	1.1.3 Fuste
PH RAMAS	1.1.4. Residuos de corta
PP RAMAS	1.1.4. Residuos de corta

### a2) Dimensiones

Las dimensiones de los pellets (diámetro y longitud), son factores importantes tanto para la manipulación y el transporte, la generación de finos (Robohm y Apelt 1986) como para temperatura de la combustión y su estabilidad en estufas y calderas (Sikanen y Vilppo 2012). Su longitud afecta directamente a la alimentación de las calderas. A menor longitud más fácilmente se da en flujo continuo (Sikanen y Vilppo 2012). En cuanto a su diámetro, pellets más finos permiten una combustión más uniforme, especialmente en calderas pequeñas (Lehtikangas et al. 2001)

En el presente estudio, las dimensiones objetivo en el proceso de fabricación en la línea experimental diseñada (ver Apartado 3.4.2.1) fue de 40 mm de longitud y 6 mm de diámetro.

Tras un muestreo de las dimensiones, la Tabla 74 muestra las dimensiones reales alcanzadas y sus estadísticas descriptivas.

**Tabla 74. Dimensiones (diámetro y longitud) de los pellets analizados (EN 16127).**

<b>Muestra</b>	<b>Diámetro (mm)</b>			<b>Longitud (mm)</b>		
	<b>Media</b>	<b>Desv. est.</b>	<b>CV (%)</b>	<b>Media</b>	<b>Desv. est.</b>	<b>CV (%)</b>
PH CC 15	6,06	0,16	2,61	39,00	1,25	3,21
PH SC 15	5,97	0,12	1,94	39,07	1,07	2,74
PH CC 20	5,90	0,20	3,39	40,53	2,22	5,47
PH SC 20	6,00	0,10	1,67	40,73	1,65	4,05
PP CC 15	6,00	0,17	2,89	39,77	0,25	0,63
PP SC 15	5,97	0,15	2,56	41,63	1,40	3,37
PP CC 20	6,03	0,15	2,53	39,90	1,55	3,89
PP SC 20	5,93	0,15	2,57	39,80	1,10	2,76
PH RAMAS	5,90	0,20	3,39	41,17	1,37	3,32
PP RAMAS	5,867	0,06	0,98	40,733	1,17	2,87

Como se puede extraer de los resultados presentados en la Tabla 74, el valor medio de diámetro es de 6 mm, variando muy poco entre las distintas muestras (con un máximo de desviación estándar de 0,2 y 3,39% de coeficiente de variación para las muestras de PH CC 20 y PH RAMAS). Por otro lado, el valor medio de la longitud es de 40 mm, siendo en esta dimensión la variación algo mayor, pero no significativa (máxima desv. est. = 2,22 y máximo CV = 5,47% para las muestras de PH CC 20).

Las Figuras 110 y 111 muestran los resultados de modo gráfico.

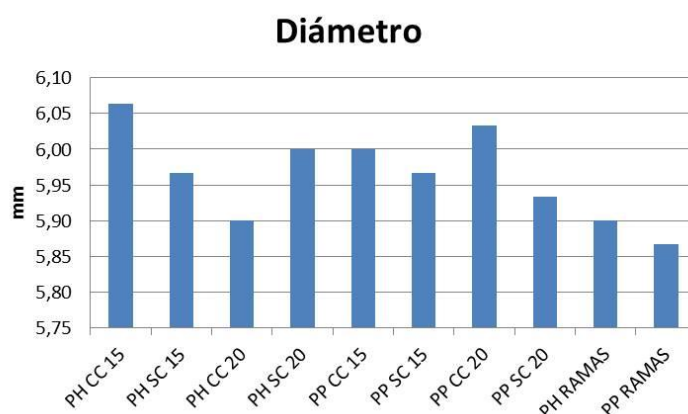


Figura 110. Gráfica de diámetros medios de los pellets analizados.

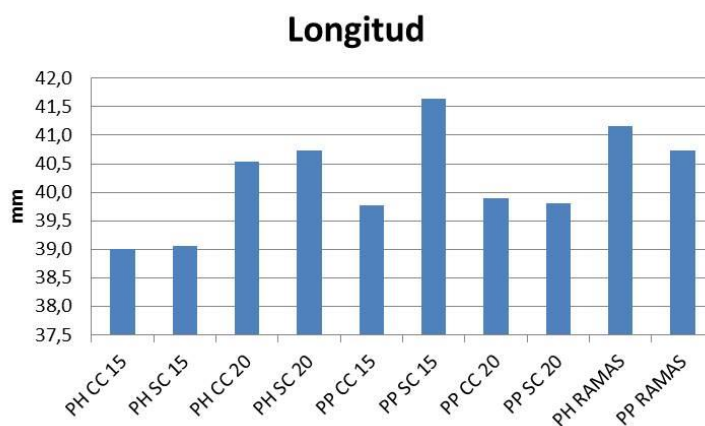


Figura 111. Gráfica de longitudes medias de los pellets analizados.

No se ha encontrado literatura que estudie la variación dimensional en el proceso de producción de pellets, razón por la cual no se ha podido contrastar debidamente los resultados obtenidos.

### a3) Porcentaje de corteza

Según Poblete y Sánchez (1991) 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.

En lo que concierne a la producción de pellets según las experiencias de Filbakk et al. (2011) pellets puros de corteza poseen mejores propiedades mecánicas en comparación con pellets de madera que contenía diversas concentraciones de corteza. Sin embargo, las diferencias no fueron significativas y la durabilidad mecánica se encuentra en la misma categoría de calidad. Por otra parte, las densidades a granel de los pellets de mezcla madera-corteza fueron superiores a las de la madera pura y corteza y el contenido de cenizas se ve aumentado con la cantidad de corteza en los pellets.

En un estudio realizado por Bradfield y Levi (1984) las maderas de frondosas descortezadas no fueron capaces de producir pellets y bloquearon la matriz de la pelletizadora tanto en presencia como en ausencia de vapor de agua añadido, mientras que mezclando en ellas de un 15-35% de corteza se produjeron pellets con una durabilidad comprendida entre el 93-99%. En otra experiencia, Chen et al. (1989) mezclaron carbón y madera, resultando la adición de corteza necesaria para evitar el uso de aditivos cohesionantes, señalando que el alto porcentaje en extractivos (ceras, resinas y almidones) y la lignina de la corteza pudieron ayudar a incrementar la cohesión y en general la resistencia de los pellets.

De esta manera, Lehtikangas (2011) señala que la corteza y residuos del aprovechamiento forestal son materias primas adecuadas para la producción de pellets, especialmente si el contenido de cenizas se controla. En este caso, la Tabla 75 recoge los resultados del contenido en corteza de las muestras de pellets analizadas, en este caso sólo de las muestras fabricadas con astilla de fuste con corteza. La dificultad para la separación de madera y corteza en la fracción de ramas impidió conocer su contenido en corteza.

**Tabla 75. Porcentaje de corteza de los pellets analizados.**

<b>Muestra</b>	<b>Corteza media (%)</b>	<b>Desv. Est</b>	<b>CV(%)</b>
PH CC 15	4,60	0,39	8,50
PH CC 20	12,92	0,18	1,38
PP CC 15	9,34	0,94	10,08
PP CC 20	13,53	0,62	4,59

Los resultados coinciden con Poblete y Sánchez (1991) en que la cantidad de corteza en la madera en rollo varía apreciablemente con el tamaño de las trozas, por lo que, en general, a menor diámetro de madera, más corteza por unidad de masa. De acuerdo con Filbakk et al. (2011), el pino tiene mayor grosor de corteza en la base del fuste y más fina en la punta delgada. Al ser menor el diámetro en punta delgada, el porcentaje en corteza incrementa en las partes altas del fuste.

Sin embargo, en este caso, el porcentaje de corteza tiende a ascender conforme aumenta la clase diamétrica, tal como puede observarse en la Figura 112. Aunque Poblete y Sánchez (1991) dicen que a menor diámetro de madera más corteza, hay que tener en cuenta que se trata de árboles que con la misma edad poseen DAPs distintos y no puede esperarse un mayor porcentaje de corteza para las astillas procedentes de árboles de DAP 15, ya que se trata de árboles que han crecido menos lo cual implica también un menor desarrollo de grosor de corteza. En líneas generales, los resultados se pueden considerar válidos ya que se encuentran entorno al 10%, valor medio de contenido en corteza en peso según Vadla (2006) y Hakkila (1989).

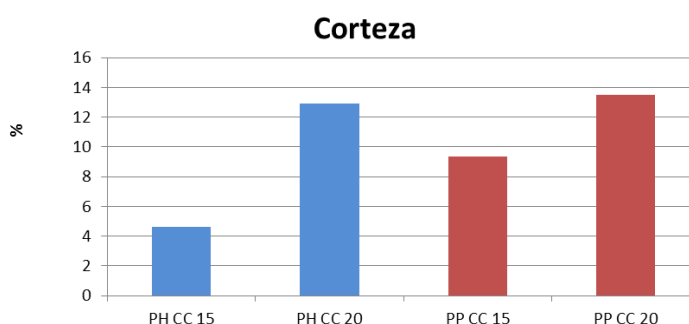


Figura 112. Gráfica comparativa del porcentaje medio de corteza.

## b) Características físicas

### b1) Contenido en humedad

En la fabricación de pellets el agua actúa como agente cohesivo y como lubricante a la vez, ayudando a desarrollar fuerzas de van der Waals incrementando el área de contacto entre las partículas (Grover y Mishra 1996). Kaliyan y Morey (2009) demuestran que la resistencia y durabilidad de biocombustibles densificados (pellets y briquetas) aumentan con un incremento en contenido de humedad hasta que se alcanza un contenido óptimo. En general, el contenido óptimo en humedad de los pellets suele situarse entre el 8-15% de su peso total (Ortiz et al. 2003, Lehtikangas 2001). Su cantidad determina de manera significativa el poder calorífico. Sin embargo, la gran variación de humedad que se da en las astillas no debe darse en los pellets, ya que no es deseable pelletizar material con más de un 15% de humedad (Pellets@atlas 2009). Por otra parte, material lignocelulósico excesivamente seco actúa como aislante térmico lo que impide la transmisión de calor que supone un elemento clave en la compactación en la prensa de pelletizado (Relova et al. 2009). La Tabla 76 muestra los resultados de los ensayos realizados.

Tabla 76. Contenido en humedad de los pellets analizados (EN 14774).

Muestra	Humedad media (%)	Desv. Est	CV (%)
PH CC 15	5,50	1,48	26,88
PH SC 15	4,83	0,76	15,67
PH CC 20	5,50	0,65	11,76
PH SC 20	4,67	0,32	6,89
PP CC 15	5,83	0,75	12,87
PP SC 15	5,17	0,75	14,53
PP CC 20	6,33	0,45	7,08
PP SC 20	3,83	0,31	7,97
PH RAMAS	3,33	0,59	17,58
PP RAMAS	5,83	0,40	6,93

La humedad máxima alcanzada por los pellets es de 6,33% para las muestras de PP CC 20 siendo la mínima 3,33% para la muestra de PH RAMAS. En cualquier caso, todas las muestras se sitúan por debajo del 10% requerido por la normativa para clasificar su calidad como A1, A2 o B (EN 14961-2)

Los resultados parecen señalar cierta afección del contenido de corteza en la astilla sobre el porcentaje de humedad de los pellets obtenidos (ver Figura 113). Las muestras obtenidas en base a astilla con corteza presentan, por lo general, una humedad algo mayor que las muestras sin corteza para una misma clase diamétrica del fuste. Para el caso de *Pinus halepensis*, las muestras sin corteza presentan un 13% menos de humedad que las muestras con corteza, y para *Pinus pinaster* un 29% menos de humedad. No se aprecian diferencias remarcables en cuanto a clase diamétrica o si las astillas provienen de ramas o de fuste.

Esta tendencia observada es corroborada por los estudios de Filbakk et al. (2011) que comprobaron que muestras de pellets fabricados con corteza pura poseían mayor contenido en humedad (14% en base húmeda) que muestras de pellets de madera sin corteza (11% en base húmeda).

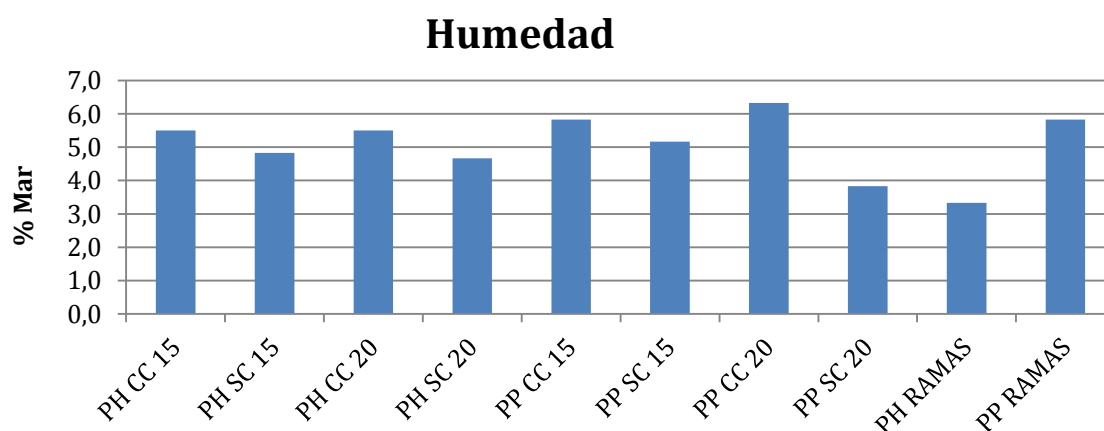


Figura 113. Gráfica comparativa del contenido medio en humedad.

**b2) Densidad a granel**

La densidad a granel (“*bulk density*”) depende relativamente del material inicial y de las condiciones de pelletizado tales como presión impresa sobre el pellets al ser fabricados, la humedad, etc. (Arshadi et al. 2008). La eficiencia del transporte depende de la densidad a granel (Lehtikangas et al. 2001). En este caso, los resultados de la densidad a granel son los que se muestran en la Tabla 77.

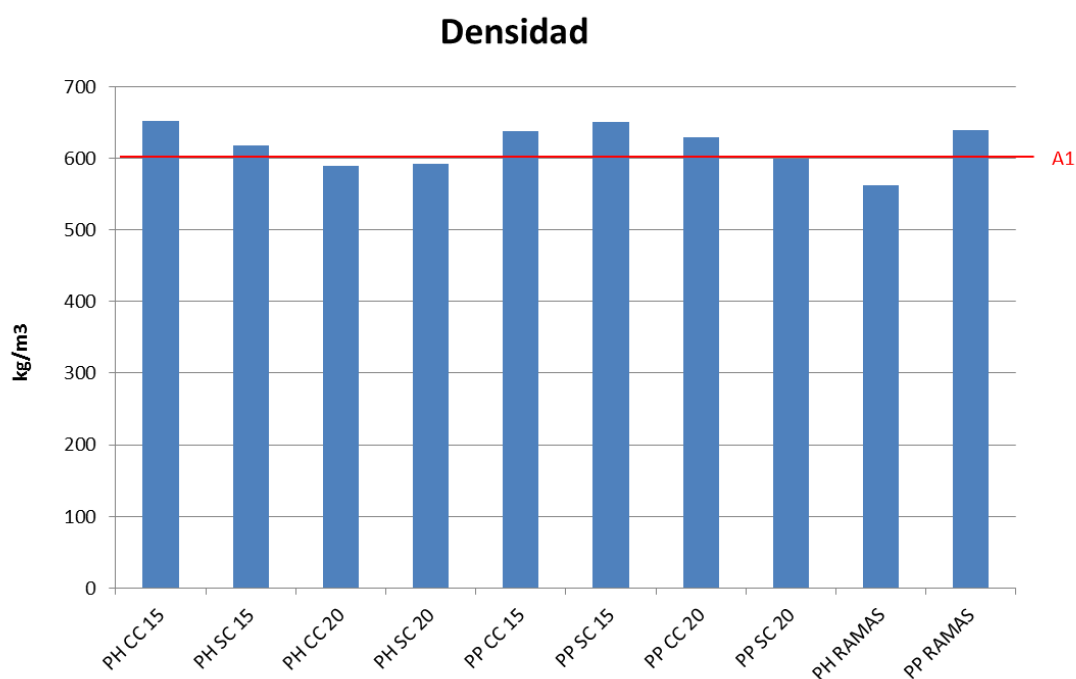
**Tabla 77. Densidad a granel de los pellets analizados (EN 15103).**

Muestra	Densidad a granel media (kg/m <sup>3</sup> )	Desv. Est.	CV (%)
PH CC 15	616,14	14,04	2,28
PH SC 15	588,61	31,81	5,40
PH CC 20	557,55	18,82	3,37
PH SC 20	565,33	21,82	3,86
PP CC 15	598,06	11,66	1,95
PP SC 15	616,89	10,89	1,76
PP CC 20	592,78	24,58	4,15
PP SC 20	577,00	5,38	0,93
PH RAMAS	544,23	9,92	1,82
PP RAMAS	602,67	13,70	2,27

Se pueden observar diferencias de unas muestras a otras, siendo la media para los pellets de *Pinus halepensis* algo menor (603,3 kg/cm<sup>3</sup>) a la de los pellets de *Pinus pinaster* (631,7 kg/cm<sup>3</sup>).

Como se puede observar en la Figura 114, todas las muestras excepto tres (PH CC 20, PH SC 20 y PH RAMAS) superan el requisito de calidad de la normativa que establece una densidad mínima mayor o igual a 600 kg/m<sup>3</sup> para las tres calidades (A1, A2 y B). Hay que tener en cuenta que las muestras de PH CC 20 y PH SC 20) apenas están por debajo de este límite, siendo la diferencia de densidad de las muestras de PH RAMAS claramente mayor.





**Figura 114. Gráfica comparativa de la densidad a granel media.**

### c) Características mecánicas

#### c1) Durabilidad mecánica

La durabilidad mecánica de los pellets es de suma importancia para los consumidores (Pellets@las 2009) y el único parámetro físico métrico considerado por la industria (Wilson 2010). Se necesitan pellets de madera con una alta durabilidad mecánica para reducir la presencia de finos y mantener una buena calidad de los pellets durante el transporte (Filbakk et al. 2011). La durabilidad mecánica está determinada, entre otras variables, por el contenido en lignina y en agua y por la fuerza de compresión con la que han sido fabricados los pellets (Pellets@las 2009).

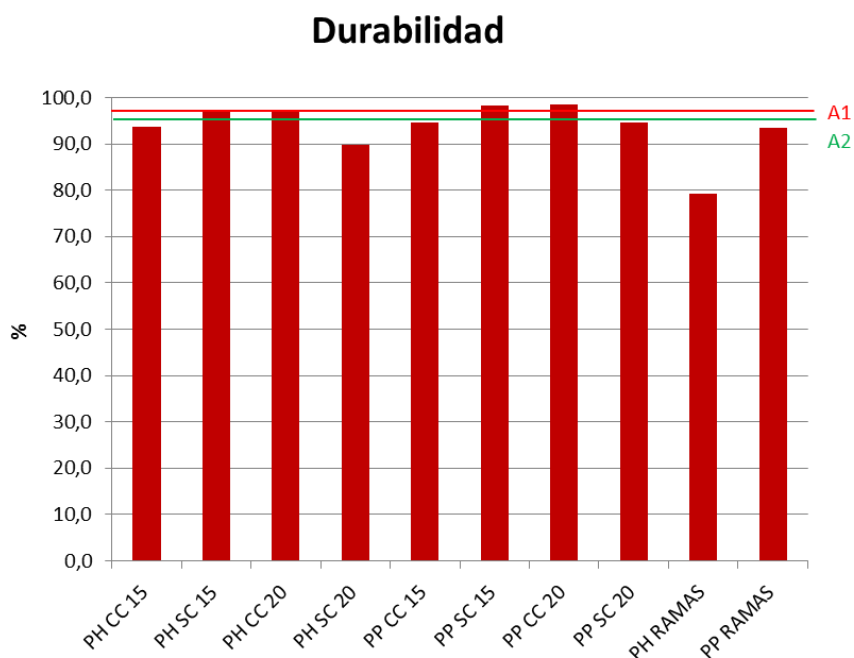
Los resultados para los tests de durabilidad mecánica se expresan en la Tabla 78.

**Tabla 78. Durabilidad mecánica de los pellets analizados (EN 15210-1).**

Muestra	Durabilidad media (%)	Desv. Est.	CV (%)
PH CC 15	93,61	4,69	5,01
PH SC 15	97,11	1,60	1,64
PH CC 20	96,80	2,73	2,82

Muestra	Durabilidad media (%)	Desv. Est.	CV (%)
PH SC 20	89,79	6,37	7,09
PP CC 15	94,70	2,63	2,77
PP SC 15	98,25	1,90	1,94
PP CC 20	98,60	2,02	2,05
PP SC 20	94,61	2,64	2,79
PH RAMAS	79,31	5,95	7,50
PP RAMAS	93,55	5,24	5,60

A simple vista, no se observan diferencias significativas entre las muestras, siendo la durabilidad media para pellets fabricados con *Pinus halepensis* de un 94,4%, y de un 95,9% para las muestras de pellets de *Pinus pinaster*.



**Figura 115. Gráfica comparativa de la durabilidad mecánica media de los pellets.**

Según se puede observar en la Figura 115, la durabilidad mecánica no supera los rangos para poder clasificarlos como pellets de calidad salvo en el caso de las muestras de PP SC 15 y PP CC 20 que podrían ser clasificados como A1 o A2 con una durabilidad mayor o igual a 97,5 según los requerimientos de durabilidad y de PH SC 15 y PH CC 20 que cumplirían para la calidad B ( $\geq 96,5$ ).

Esto también puede deberse a que tanto la durabilidad como el contenido de finos dependen en gran medida del proceso de enfriado (Pellets@tlas 2009) y en este caso debido al retraso en la puesta a punto del enfriador de la planta piloto el enfriamiento de los pellets se tuvo que realizar

al aire de manera natural. Por todo ello, los resultados obtenidos no deberán ser tenidos en cuenta.

### c2) Cantidad de finos

La cantidad de finos generados se evalúa al final del proceso de fabricación. Estos finos o polvo pueden formarse durante la producción, la gestión de los pellets en la planta o durante el proceso de embalaje y transporte (Pellets@las 2009). Es importante analizar este parámetro, ya que se trata de un factor limitante para el movimiento de los pellets en durante el proceso de alimentación de una caldera, contribuyendo con su excesiva presencia a una alimentación ineficiente y de materiales desiguales que derivaría en una pobre combustión (Lehtikangas et al. 2001). Una excesiva cantidad de finos también puede producir riesgos en el manejo del combustible y el polvo orgánico puede constituir un riesgo de salud para los operarios de la fábrica o el almacén que manipulan los pellets (Vinterback 2004).

La cantidad de finos generada por los pellets elaborados se muestra en la Tabla 79.

**Tabla 79. Cantidad de finos de los pellets analizados (EN 15149-2).**

Muestra	Finos media (%)	Desv. Est.	CV (%)
PH CC 15	0,70	0,32	45,83
PH SC 15	3,37	0,50	14,82
PH CC 20	0,21	0,14	66,67
PH SC 20	0,29	0,19	66,06
PP CC 15	0,38	0,18	48,24
PP SC 15	0,17	0,13	77,15
PP CC 20	0,21	0,22	103,78
PP SC 20	0,63	0,24	37,33
PH RAMAS	0,76	0,19	25,38
PP RAMAS	0,71	0,17	24,07

A la vista de los resultados parece ser que hay un valor anómalo en cuanto a finos que se sale de los valores típicos y es en el caso de la muestra PC SC 15 probablemente debido a un enfriamiento incorrecto de las muestras, por lo que no debe tenerse en cuenta este valor. De media, exceptuando este caso, los pellets de *Pinus halepensis* presentan una media de un 0,5% de finos mientras que el *Pinus pinaster* una media de 0,4%.

Por otra parte, las astillas de ramas tienden a generar pellets con más contenido en finos, aunque no se han encontrado referencias bibliográficas al respecto que apoyen o desmientan este resultado observado.

Respecto a los altos CV obtenidos cabe señalar que no hay que tenerlos en cuenta, ya que cuando la media aritmética está muy próxima a cero, el CV por su fórmula de cómputo puede dar valores

muy grandes que no necesariamente implican dispersión de datos, como es el caso y por tanto, el valor del CV pierde significado.

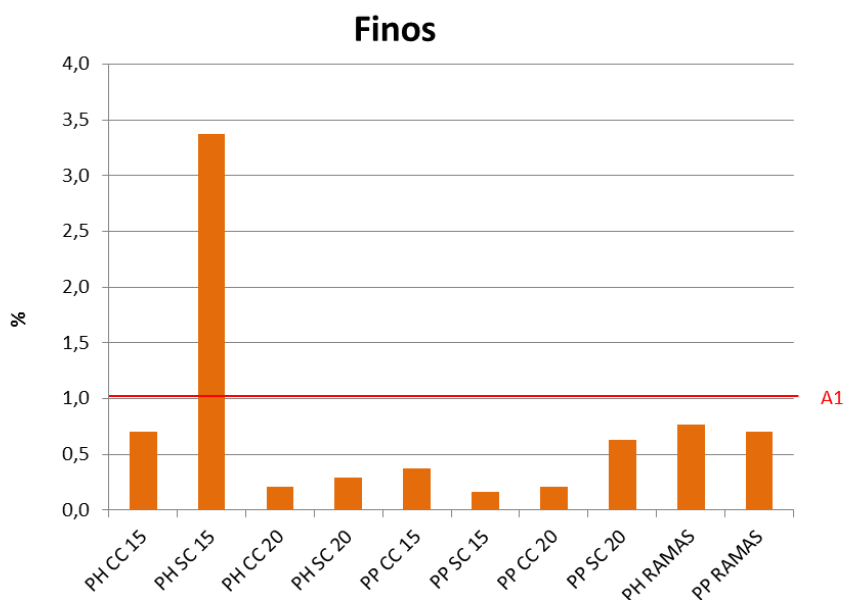


Figura 116. Gráfica comparativa del contenido medio de finos.

Tal como se puede observar en la Figura 116, exceptuando la muestra de PH SC 15, el resto de muestras de pellets cumplen con los requisitos de calidad de la normativa que sitúan la cantidad de finos máxima en un 1% para las tres calidades (A1, A2 y B).

#### d) Características químicas

##### d1) Contenido en cenizas

Conocer el contenido en cenizas es muy relevante para el correcto funcionamiento de las estufas o calderas en las que se quemen los pellets, ya que puede formar escorias y elevadas deposiciones de residuos (Öhman et al. 2004). Por otra parte, un alto contenido en cenizas suele ser indicativo de materiales extraños en el material de partida tales como aditivos, suciedad, otros residuos, etc. (Francescato et al. 2008).

Un incremento en el contenido de cenizas reduce el poder calorífico, implica el riesgo de sinterización al mismo tiempo que afecta negativamente a los equipos de molienda y pelletización en el proceso de fabricación industrial (Lehtikangas et al. 2011).

La Tabla 80 muestra los resultados para los ensayos de contenido medio de cenizas.

Tabla 80. Contenido en cenizas de los pellets analizados (EN 14775).

Muestra	Cenizas media (%)	Desv. Est.	CV (%)
PH CC 15	0,83	0,06	7,33
PH SC 15	0,62	0,22	35,15
PH CC 20	0,94	0,31	33,22
PH SC 20	0,55	0,15	26,91
PP CC 15	0,41	0,21	51,62
PP SC 15	0,25	0,14	54,11
PP CC 20	0,46	0,07	14,26
PP SC 20	0,20	0,04	21,79
PH RAMAS	0,85	0,21	24,79
PP RAMAS	0,94	0,27	28,62

Un análisis de los resultados muestra que en general, los pellets de *Pinus halepensis* presentan ligeramente más porcentaje en ceniza (un 0,75% de media) que los de *Pinus pinaster* (0,45%). Además, que los pellets con corteza presentan igualmente más ceniza que los pellets sin corteza (0,60% frente a 0,45% respectivamente).

De nuevo, el valor del CV pierde significado al encontrarse la media aritmética muy cercana a cero.

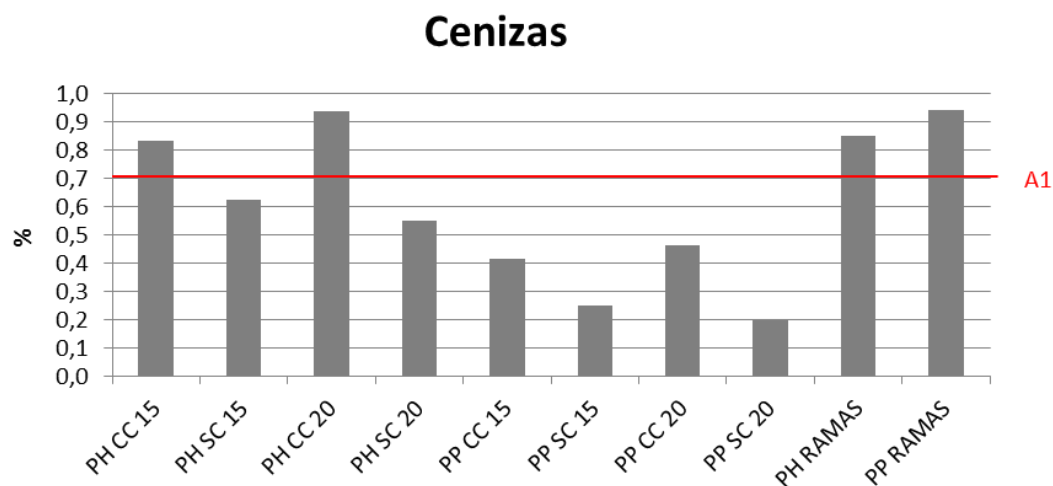


Figura 117. Gráfica comparativa del contenido medio en cenizas.

Por otra parte, como cabría esperar, resalta el alto contenido en cenizas de las ramas (en torno al 0,9%) independientemente de la especie con respecto al resto de muestras. Esto es debido al mayor porcentaje de presencia de corteza en las muestras.

Como se puede observar en la Figura 117, todas las muestras cumplen con el requerimiento para obtener la calidad A1 ( $\leq 0,7\%$ ) salvo las muestras de PH CC 15, PH CC 20 y ambas muestras de ramas, que quedarían clasificadas como calidad A2 ( $\leq 1,5\%$ ).

### d2) Contenido en cloro y azufre

Un alto contenido en azufre por encima del 0,1% del peso en base seca puede causar problemas de escorias y formación de yesos, ya que puede reducir el punto de derretimiento de las cenizas (Lehtikangas et al. 2001). Por otra parte, los mismos autores señalan que el cloro puede inducir a la formación de dioxinas extremadamente tóxicas. Ambos actúan como agentes corrosivos y pueden reducir la capa de óxido protectora en las estufas o calderas de pellets (Öhman y Nordin 1998)

Sin embargo, según Huang (2014) y Biomass Energy Centre (sf) por lo general su presencia es baja en los biocombustibles sólidos (astillas, pellets o briquetas) de material lignocelulósico de base forestal.

La Tabla 81 muestra los resultados obtenidos en cuanto a contenido en cloro y azufre. Los resultados no parecen presentar diferencias significativas a simple vista entre especies, contenido en corteza o fracción de origen, siendo los valores medios de cloro y azufre de 0,018% y 0,01% respectivamente para todas las muestras de *Pinus halepensis* y de 0,015% de cloro y de 0,015% de azufre para *Pinus pinaster*.

De nuevo, el valor del CV pierde significado al encontrarse la media aritmética muy cercana a cero.

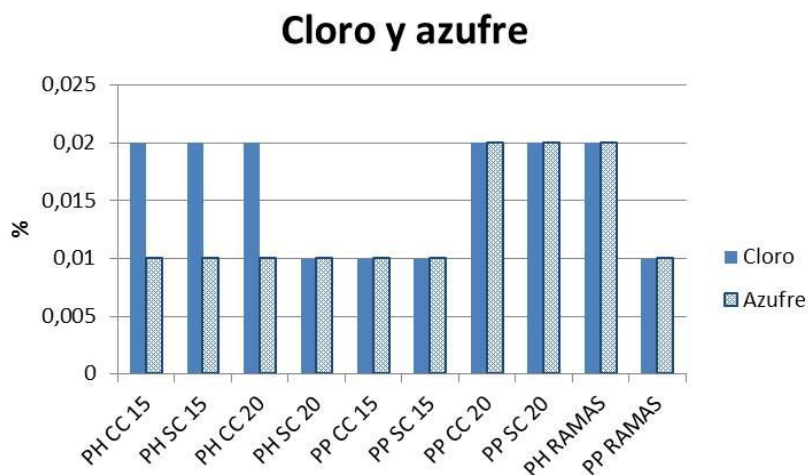
**Tabla 81. Contenido en cloro y azufre de los pellets analizados (EN 15289).**

Muestra	Cloro media(%)	Desv. Est.	CV (%)	Azufre media (%)	Desv. Est.	CV (%)
PH CC 15	0,02	0,01	50	0,01	0,01	100
PH SC 15	0,02	0	-	0,01	0,01	100
PH CC 20	0,02	0,01	50	0,01	0	-
PH SC 20	0,01	0	-	0,01	0	-
PP CC 15	0,01	0,01	100	0,01	0,01	100
PP SC 15	0,01	0,01	100	0,01	0,01	100
PP CC 20	0,02	0,01	50	0,02	0	-
PP SC 20	0,02	0	-	0,02	0	-
PH RAMAS	0,02	0,02	86	0,02	0,01	50
PP RAMAS	0,01	0	-	0,01	0	-

La normativa de calidad (EN 14961-2) limita la presencia de cloro y azufre en los pellets a 0,03% y 0,04% de su peso seco respectivamente. Por tanto, como se puede observar en la Figura 118 y

la Tabla 81 todas las muestras cumplen los requisitos para obtener la clasificación como A1 tanto en contenido máximo tolerado de cloro como de azufre.

Los resultados en contenido de azufre coinciden con Hakkila y Kalaja (1983) que obtuvieron valores de azufre de 0,02% contenido en ramas de coníferas y de 0,01% de azufre en troncos.



**Figura 118. Gráfica comparativa del contenido medio en cloro y azufre.**

#### e) Características energéticas: poder calorífico

El poder calorífico es el parámetro de calidad energética más importante, ya que indica la cantidad de energía contenida en los pellets. Los resultados para las muestras son los que se muestran en la Tabla 82, teniendo en cuenta que los ensayos fueron realizados a una humedad constante del 10% para permitir la comparación entre todas las muestras.

**Tabla 82. Poder calorífico de los pellets analizados (EN 14918).**

MUESTRA	H (%)	PCB VOL. CTE media (MJ/kg, bh ensayo, 10%H)	PCB VOL. CTE media (MJ/kg, b.s.*)	PCN PRE. CTE media(MJ/kg, b.s.*)	Desv. Est.	CV (%)
PH CC 15	10	16,87	18,74	17,39	0,16	0,92
PH SC 15	10	16,86	18,73	17,38	0,37	2,10
PH CC 20	10	17,27	19,18	17,84	0,36	2,02
PH SC 20	10	17,28	19,20	17,85	0,18	0,99
PP CC 15	10	16,81	18,67	17,32	0,18	1,06
PP SC 15	10	16,89	18,76	17,41	0,46	2,62
PP CC 20	10	17,21	19,12	17,77	0,44	2,46
PP SC 20	10	18,00	20,00	18,65	0,32	1,71

MUESTRA	H (%)	PCB VOL. CTE media (MJ/kg, bh ensayo, 10%H)	PCB VOL. CTE media (MJ/kg, b.s.*)	PCN PRE. CTE media (MJ/kg, b.s.*)	Desv. Est.	CV (%)
PH RAMAS	10	17,74	19,71	18,36	0,34	1,88
PP RAMAS	10	17,14	19,04	17,69	0,57	3,20

\*b.s. base seca (0% H)

El primer resultado evidente es que el poder calorífico neto en base seca a presión constante es muy parecido en todas las muestras, siendo de media 17,77 MJ/kg para ambos pinos. Tal y como afirman Francescato et al. (2004) el PCN es practicamente el mismo entre diferentes especies de coníferas.



**Figura 119. Media del poder calorífico neto a presión constante en base seca (0%H) de los pellets ensayados.**

Todos los pellets ensayados exceden el poder calorífico mínimo requerido por la normativa de calidad (>16.500 KJ/kg).

**f) Clasificación de la calidad de los pellets ensayados**

Por último, como resultado del conjunto de valores obtenidos en los anteriores ensayos se ha procedido a determinar la clasificación de la calidad de los pellets elaborados según la norma EN 14961-2. Los resultados de la asignación total a clases de calidad se muestran en la Tabla 83.



**Tabla 83. Resumen de los resultados de los ensayos de calidad.**

Muestra	Origen	M (%)	A (%)	DU (%)	F (%)	BD (kg/m <sup>3</sup> )	Q (MJ/kg)	Cl (%)	S (%)	Calidad
PH CC 15	1.1.3	5,50	0,83	93,61	0,70	652	17,39	0,02	0,01	
PH SC 15	1.1.3	4,83	0,62	97,11	3,37	618	17,38	0,02	0,01	
PH CC 20	1.1.3	5,50	0,94	96,80	0,21	590	17,84	0,02	0,01	
PH SC 20	1.1.3	4,67	0,55	89,79	0,29	593	17,85	0,01	0,01	
PP CC 15	1.1.3	6,33	0,41	94,70	0,38	638	17,32	0,01	0,01	
PP SC 15	1.1.3	5,17	0,25	98,25	0,17	650	17,41	0,01	0,01	A1
PP CC 20	1.1.3	5,83	0,46	98,60	0,21	629	17,77	0,02	0,02	
PP SC 20	1.1.3	3,83	0,20	94,61	0,63	600	18,65	0,02	0,02	
PH RAMAS	1.1.4.	3,33	0,85	79,31	0,76	563	18,36	0,02	0,02	
PP RAMAS	1.1.4.	5,83	0,94	93,55	0,71	640	17,69	0,01	0,01	

M=humedad, A=cenizas, DU= durabilidad mecánica, F= finos, BD= densidad a granel, Q= poder calorífico neto, Cl= Cloro, S= azufre

Tal y como muestra la Tabla 83, de manera estricta, sólo la muestra PP SC 15 obtiene valores medios de todas las variables suficientes para ser clasificada en clase A1 según EN 14961-2.

No obstante, tal como se ha especificado en el Apartado 3.4.2.1, la variable de durabilidad mecánica y el valor de PH SC 15 de finos debería ser excluidas debido a un enfriamiento no adecuado y a un valor anómalo respectivamente. Sin tener en cuenta estas variables, la Tabla 84 muestra los resultados de la asignación a clases de calidad.

**Tabla 84. Calidad de los pellets elaborados.**

Muestra	Origen	M (%)	A (%)	F (%)	BD (kg/m <sup>3</sup> )	Q (MJ/kg)	Cl (%)	S (%)	Calidad
<b>PH CC 15</b>	1.1.3	5,50	<b>0,83</b>	0,70	652	17,39	0,02	0,01	<b>A2</b>
PH SC 15	1.1.3	4,83	0,62	-	618	17,38	0,02	0,01	A1
<b>PH CC 20</b>	1.1.3	5,50	<b>0,94</b>	0,21	590	17,84	0,02	0,01	<b>A2</b>
PH SC 20	1.1.3	4,67	0,55	0,29	593	17,85	0,01	0,01	A1
PP CC 15	1.1.3	6,33	0,41	0,38	638	17,32	0,01	0,01	A1
PP SC 15	1.1.3	5,17	0,25	0,17	650	17,41	0,01	0,01	A1
PP CC 20	1.1.3	5,83	0,46	0,21	629	17,77	0,02	0,02	A1
PP SC 20	1.1.3	3,83	0,20	0,63	600	18,65	0,02	0,02	A1
<b>PH RAMAS</b>	1.1.4.	3,33	<b>0,85</b>	0,76	563	18,36	0,02	0,02	<b>A2</b>
<b>PP RAMAS</b>	1.1.4.	5,83	<b>0,94</b>	0,71	640	17,69	0,01	0,01	<b>A2</b>

M=humedad, A=cenizas, DU= durabilidad mecánica, F= finos, BD= densidad a granel, Q= poder calorífico neto, Cl= Cloro, S= azufre

De este modo, todos los pellets podrían clasificarse como de calidad A1, excepto las muestras de PH CC 15, PH CC 20, y PH ramas y PP ramas que se quedarían clasificadas como A2 debido valores superiores a 0,7% de contenido en cenizas.

Estos resultados indican que el proceso de elaboración de los pellets en la planta piloto diseñada, instalada y puesta en marcha con la presente investigación ha sido adecuado pero puede ser objeto de mejora ya que la durabilidad y la densidad a granel dependen de las condiciones de prensado en la pelletizadora y enfriado industrial en el sinfín, y estas pueden ser reguladas.

Como resultado final, se puede concluir que las astillas de *Pinus halepensis* y *Pinus pinaster* cualquiera que sea su fracción de origen son adecuadas para la fabricación de pellets de alta calidad, aunque siempre se deberá intentar evitar altos contenidos de corteza que influyen negativamente en contenidos de cenizas, cloro y azufre que suelen ser las variables más limitantes de para la calidad del pellet. Este resultado viene refrendado por Lehtikangas (2011) que concluye de sus estudios 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.

#### **4.4.2.2. Análisis inferencial de las variables**

En este apartado se van a estudiar con más detenimiento algunas de las posibles interrelaciones entre factores intrínsecos la biomasa como su fracción de origen, especie o presencia o no de corteza, para la determinación de su calidad. Cabe señalar que sobre los resultados de las variables estudiadas, a parte de estos factores también influyen las condiciones y factores dependientes de los parámetros de fabricación de los pellets como por ejemplo la presión aplicada y la temperatura que alcanzan los pellets (Relova et al. 2009).

##### **a) Variable “porcentaje de corteza”**

Los resultados del t-test para el análisis de la influencia de la especie sobre el porcentaje de corteza a través de la comparación de medias, demuestran que no existen diferencias significativas ( $P$  value = 0,62) con un nivel de confianza del 95% entre las especies en cuanto a porcentaje de corteza, tal como se puede observar en la Figura 120.

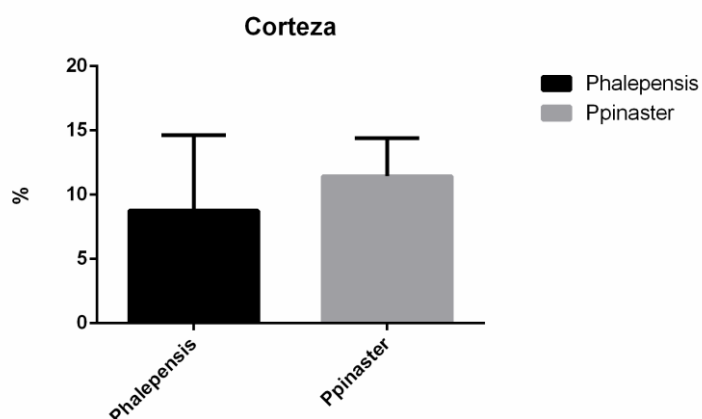


Figura 120. Análisis del porcentaje de corteza por especie.

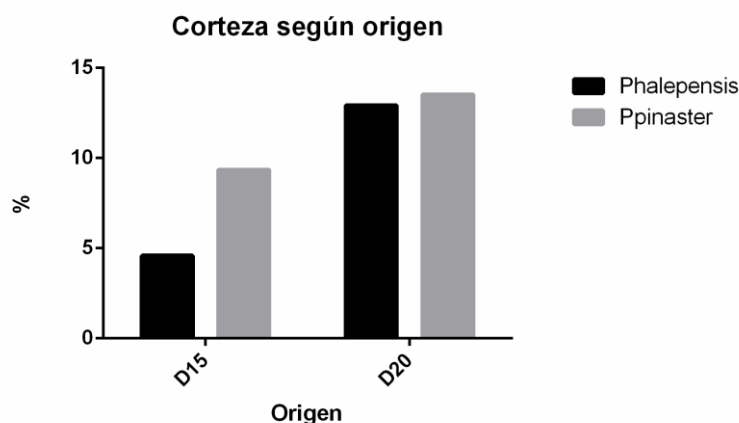


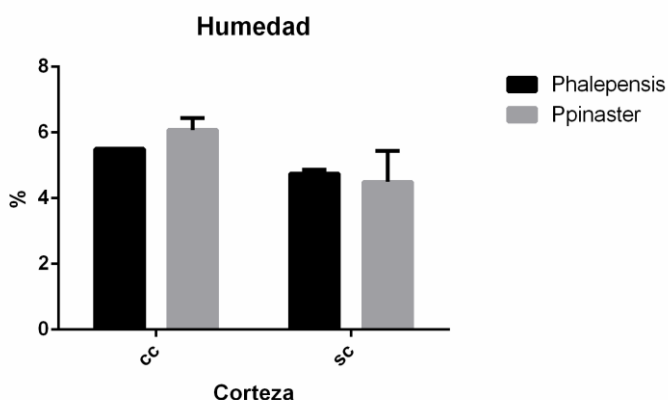
Figura 121. Análisis del porcentaje de corteza según especies y fracción de origen.

Por otra parte, en cuanto a la influencia de la fracción de origen y la especie, tampoco se hallan diferencias significativas debidas a estos factores (ver Figura 121 y detalles en el Anexo 5). Cabe señalar que la separación de la corteza se hizo *de visu* y de manera manual, lo que puede haber llevado a ciertos errores de peso.

La diferencia entre porcentajes de corteza dentro de una misma clase diamétrica y entre especies, hace que no sea posible explicar las características de los pellets basándose en una igualdad en su contenido o al menos, explicar una gradación, ya que intervienen demasiados factores no controlados.

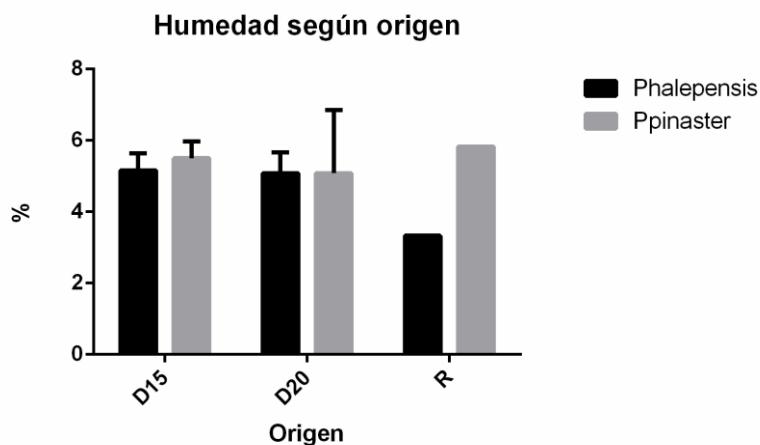
**b) Variable “contenido en humedad”**

Los resultados estadísticos del *Two-way Anova* “especie” vs. “presencia de corteza” para la variable “contenido en humedad” indican que existen diferencias significativas con un 95% de nivel de confianza entre la humedad de cada muestra debidas a la presencia de corteza (P value = 0,03) (ver Anexo 5). La Figura 122 muestra estos resultados de forma gráfica.



**Figura 122. Análisis humedad según especies y presencia de corteza.**

En cuanto al análisis de la fracción de origen del material astillado sobre la humedad final de los pellets, los resultados del *Two-way Anova* de los factores “especie” vs. “fracción” indican que ni la especie ni la fracción de origen (fuste de clase diamétrica 15cm, 20cm, o ramas) ejercen influencia significativa sobre la variable con un 95% de nivel de confianza (ver Anexo 5). La Figura 123 muestra estos resultados de forma gráfica.



**Figura 123. Análisis humedad según especies y fracción de origen.**

### c) Variable “densidad a granel”

Para el caso del análisis estadístico inferencial de la influencia de otras variables ensayadas sobre la densidad a granel, tan sólo la comparativa del factor “especie” vs. “fracción” permite observar una influencia de la especie en la densidad a granel obtenida, con un P-value de 0,031 para un nivel de confianza del 95% (ver Anexo 5). Las Figuras 124 y 125 muestran estos resultados de forma gráfica.

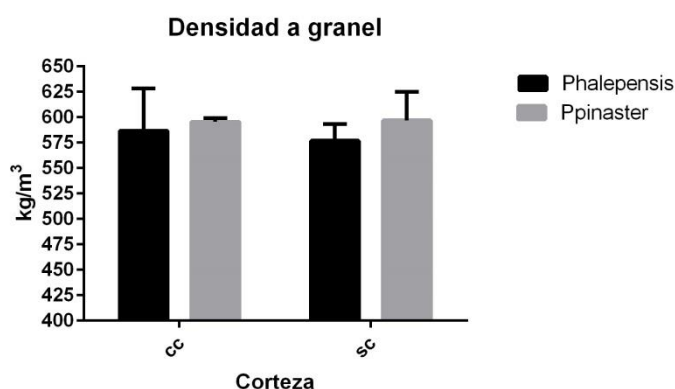


Figura 124. Análisis densidad según especies y presencia de corteza.

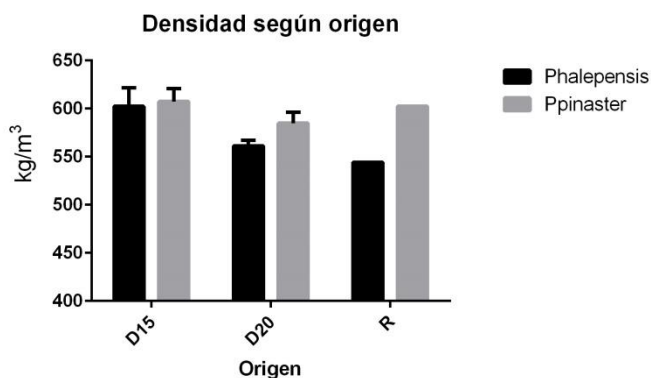


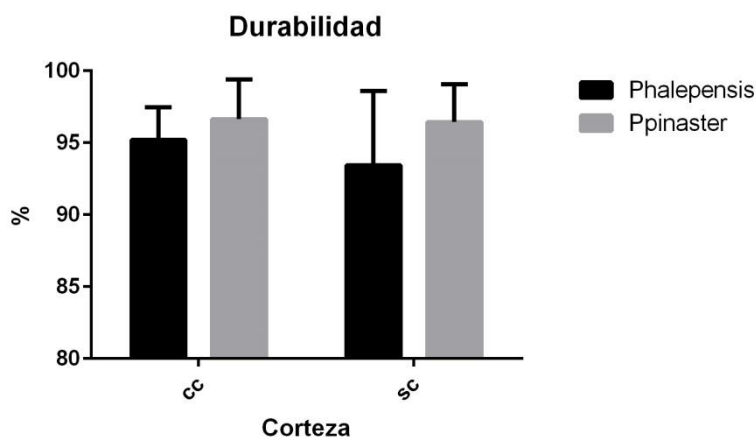
Figura 125. Análisis densidad según especies y fracción de origen.

Los resultados coinciden con Lestander et al. (2012) que afirman que la densidad a granel depende mayormente de la composición del material de origen.

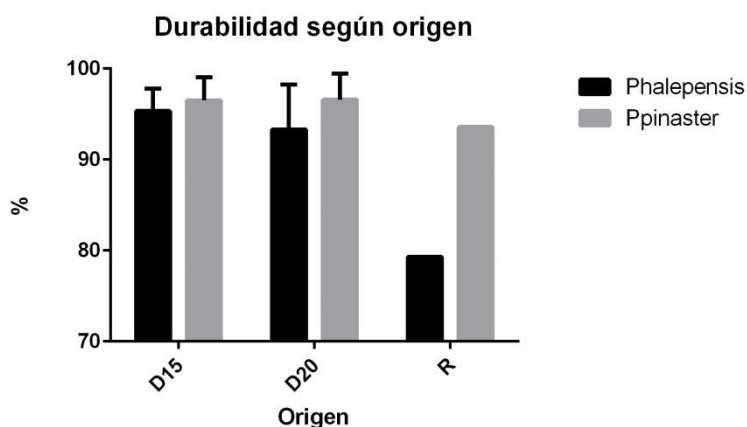
**d) Variable “durabilidad mecánica”**

El análisis estadístico inferencial de la variable durabilidad mecánica tan sólo muestra una influencia de la especie en la comparativa entre especie y fracción de origen (P-value= 0,049 con un nivel de confianza del 95%) (Anexo 5). Las Figuras 126 y 127 muestran gráficamente estos resultados.

Esto puede ser explicado por el control que ejerce el contenido de lignina de las diferentes especies que determina en gran medida las propiedades viscoelásticas de la madera y puede, por tanto, influir en la durabilidad de los pellets (Lehtikangas et al. 2001).



**Figura 126. Análisis durabilidad según especies y presencia de corteza**



**Figura 127. Análisis durabilidad según especies y fracción de origen.**

Con todo ello, los resultados de durabilidad coinciden de nuevo con Lestander et al. (2012) en cuyo estudio evalúan la influencia del contenido de humedad previa de las astillas y la composición de mezclas de diversas especies sobre la densidad a granel, durabilidad, humedad de los pellets y contenido en cenizas y que concluyen que al igual que la densidad a granel y las cenizas, la durabilidad depende mayormente del material de origen, es decir, depende de la especie pelletizada.

Según Rhen et al. (2005) y Lehtikangas (2001) las propiedades básicas de los pellets como el contenido en humedad, la densidad aparente y real, resistencia a la compresión y durabilidad dependen tanto de la composición del material de origen como de variables del proceso de pelletización.

Por otra parte, Kaliyan y Morey (2009) sostienen que factores relativos al propio material de origen (proteínas, fibras, lignina, extractivos, contenido en humedad, tamaño y distribución de las partículas), los procesos de acondicionamiento (acondicionamiento al vapor/al calor, adición de aditivos) y las variables de los equipos de densificación (por ejemplo, la presión de prensado) afectan a la durabilidad y resistencia de los productos densificados. De igual manera, condiciones de post-producción tales como enfriado/secado y una alta humedad de almacenamiento ejercerían influencia sobre estas variables.

#### e) Variable “cantidad de finos”

Como puede observarse en las tablas estadísticas del Anexo 5, la variable finos no se ve influenciada de manera significativa por ninguno de los factores estudiados. Para este análisis no se ha tenido en cuenta el valor anormal obtenido para PH SC 15. Las Figuras 128 y 129 muestran gráficamente estos resultados.

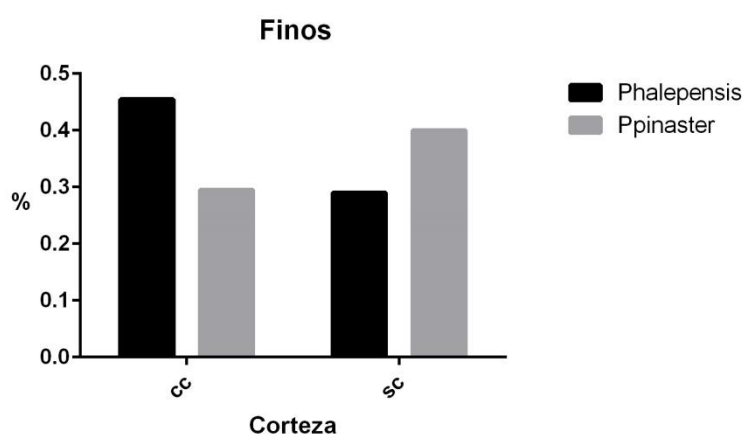


Figura 128. Análisis finos según especies y presencia de corteza.

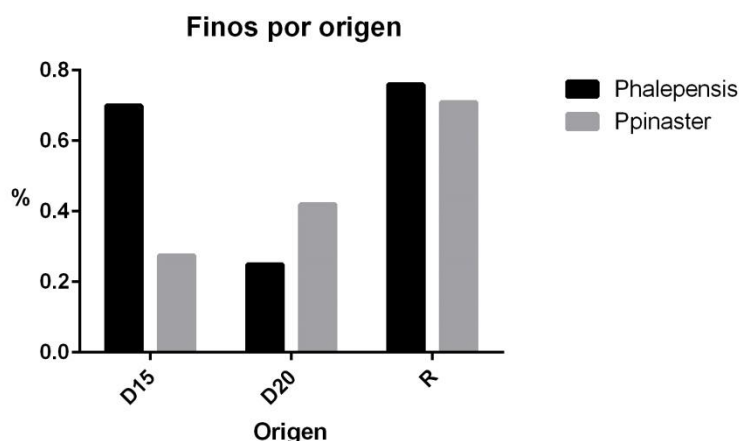


Figura 129. Análisis finos según especies y fracción de origen.

f) Variable “contenido en cenizas”

Los resultados del análisis inferencial de la variable “contenido en cenizas” indican que tanto la especie (con un P value = 0,0004) como la presencia de corteza (P value = 0,0023) determinan diferencias significativas con un 95% de nivel de confianza sobre la variable. Es decir, ambos factores influyen significativamente el resultado en contenido de cenizas de cada muestra, tal como se puede observar en las tablas del Anexo 5 y en la Figura 130.

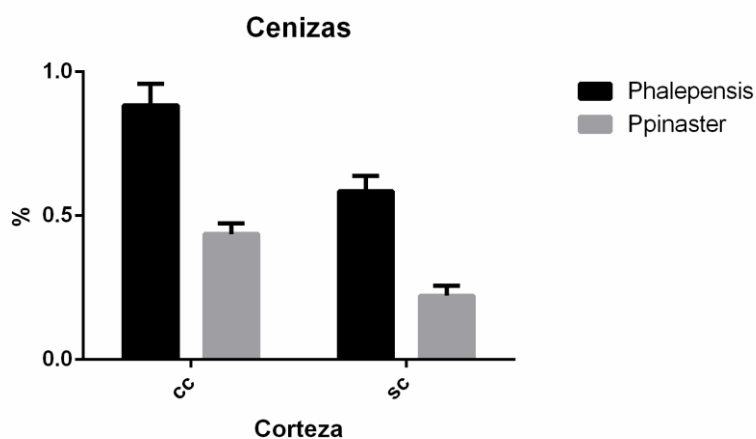
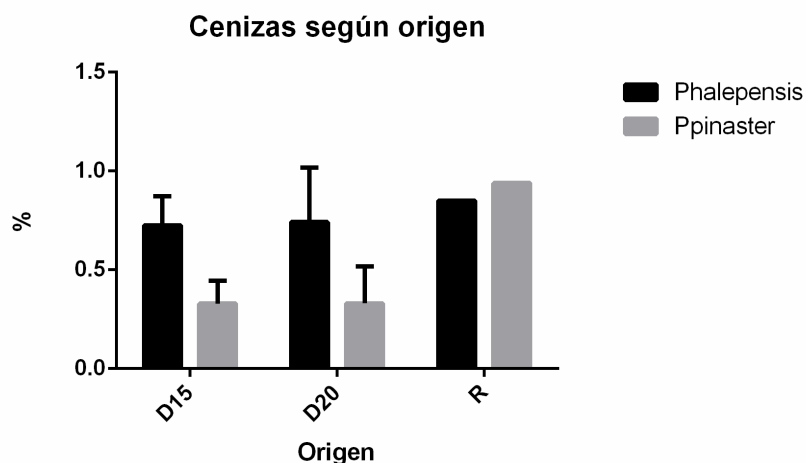


Figura 130. Análisis cenizas según especies y presencia de corteza.

Sin embargo, en la comparativa entre la influencia de la especie y/o a la fracción de origen, ninguno de ambos factores contribuye a explicar la variabilidad del contenido de cenizas, como muestra la Figura 131 y se puede comprobar en el Anexo 5.



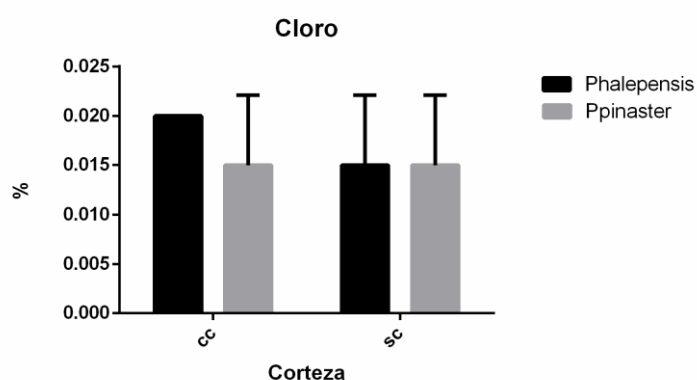


**Figura 131. Análisis cenizas según especies y fracción de origen.**

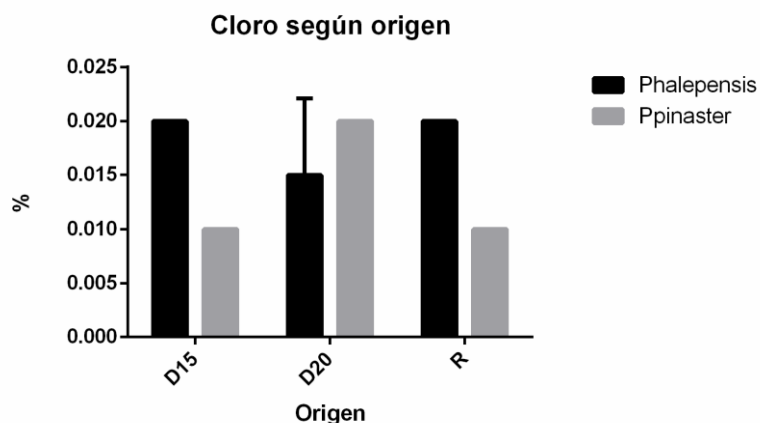
Estos resultados refrendan de nuevo lo expuesto por Lestander et al. (2012) que como se ha citado con anterioridad afirman que tanto las cenizas como la densidad a granel y la durabilidad dependen mayormente de la composición del material de origen, es decir, de la especie pelletizada.

#### **g) Variable “contenido en cloro”**

Como puede observarse en las tablas de Anexo 5 y en las Figuras 132 y 133, la cantidad de cloro no se ve influida de manera significativa por ninguno de los factores estudiados.



**Figura 132. Análisis cloro según especies y presencia de corteza.**

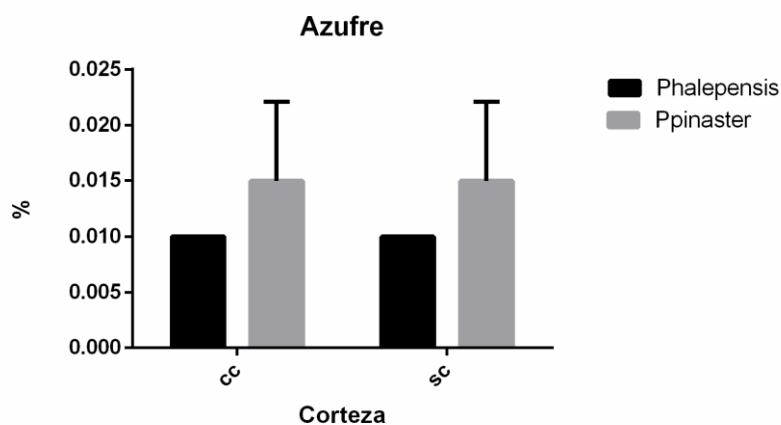


**Figura 133. Análisis cloro según especies y fracción de origen.**

Según Lehtikangas et al. (2001) la variabilidad en contenido en cloro y azufre entre árboles pueden ser grande dependiendo de la forma de la copa, el número de acículas, la rugosidad de la corteza, la dirección de los vientos dominantes, etc.

#### **h) Variable “contenido en azufre”**

La cantidad de azufre no se ve influenciada de manera significativa por ninguno de los factores estudiados según muestran las siguientes Figuras 134 y 135 y se puede comprobar en las tablas presentadas en el Anexo 5.



**Figura 134. Análisis azufre según especies y presencia de corteza.**

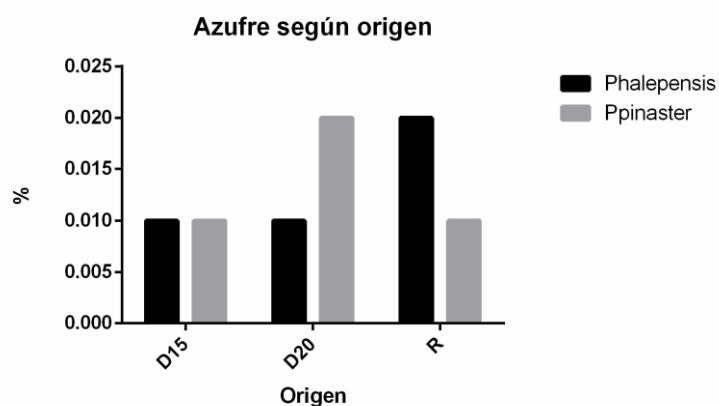


Figura 135. Análisis azufre según especies y fracción de origen.

#### i) Variable "poder calorífico"

En cuanto al análisis estadístico inferencial, como se desprende de las Figuras 136 y 137 y se puede comprobar en las tablas del Anexo 5, la variable "poder calorífico" no se ve influida de manera significativa por ninguno de los factores estudiados.

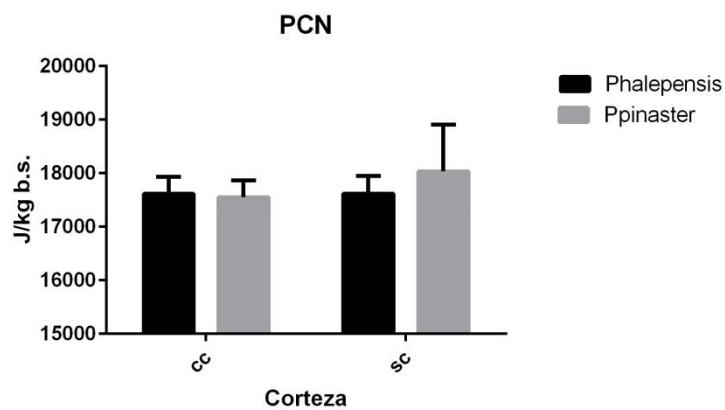


Figura 136. Análisis poder calorífico neto según especies y presencia de corteza.

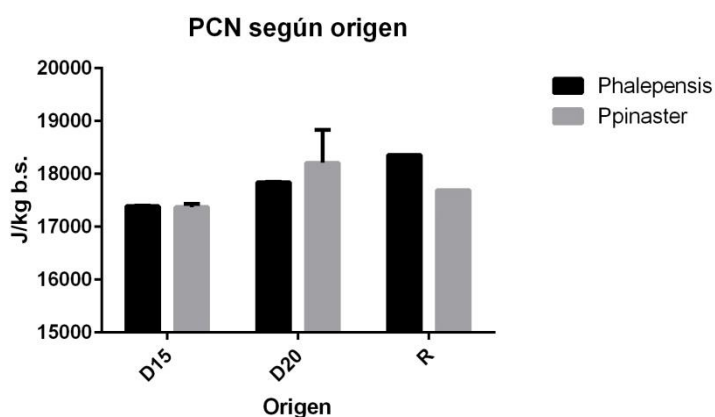


Figura 137. Análisis poder calorífico neto según especies y fracción de origen.

#### 4.4.2.3. Análisis inferencial de las relaciones entre variables

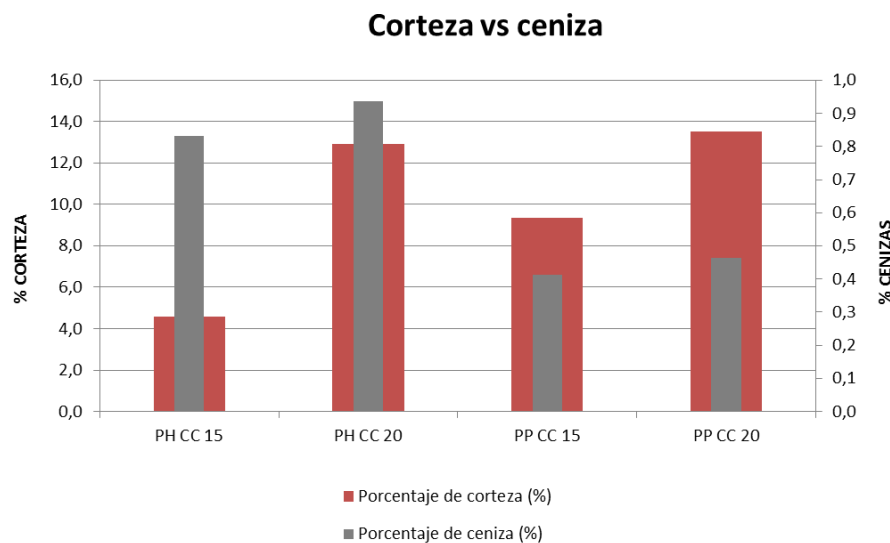
##### a) Porcentaje de corteza y contenido en cenizas

La corteza contiene considerablemente más nitrógeno y sulfuro que la madera. También presenta mayor contenido mineral y consecuentemente sobre cinco veces más alto contenido en cenizas que la madera sola (Filbakk et al. 2011). De esta manera, la presencia de corteza puede derivar en mayor contenido en cenizas durante la combustión de pellets (Pellets@las 2009).

Tabla 85. Comparativa del porcentaje de corteza y ceniza de los pellets analizados.

Muestra	Cort (%)	A (%)
PH CC 15	4,60	0,83
PH CC 20	12,92	0,94
PP CC 15	9,34	0,41
PP CC 20	13,53	0,46

Los resultados obtenidos, mostrados en la Tabla 85, corroboran estas afirmaciones al observarse un mayor contenido en cenizas conforme aumenta el contenido en corteza (Figura 138), aunque cabe señalar que el contenido en cenizas depende en gran magnitud de la especie como señala el análisis estadístico realizado en el anterior apartado.

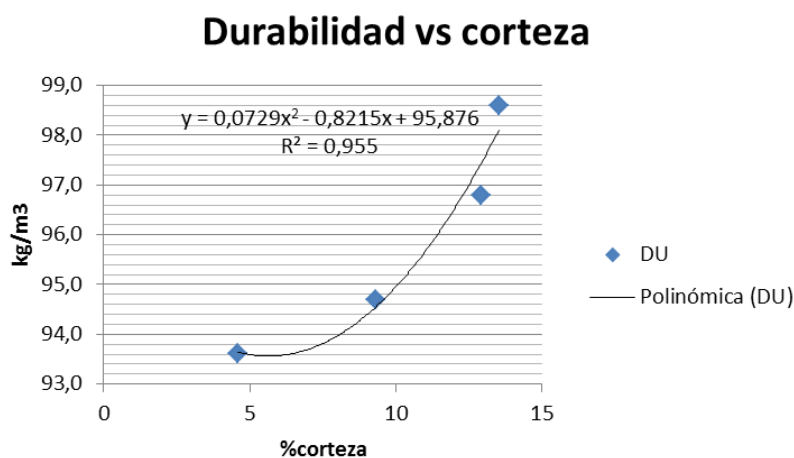


**Figura 138. Gráfica comparativa del porcentaje de corteza vs el contenido en cenizas.**

#### b) Durabilidad mecánica y porcentaje de corteza

La corteza, en comparación a la madera, presenta un contenido considerablemente mayor de lignina y de extractivos que esta (Fibakk et al. 2011). De acuerdo Lehtikangas (2001) con mayores concentraciones de lignina y extractivos tiene un efecto positivo sobre los mecanismos de cohesión durante el pelletizado de los pellets.

El estudio de la relación entre la durabilidad y el porcentaje de corteza a partir de los pellets analizados arroja un  $R^2$  de 0,95 como muestra la Figura 139, lo que apoya las anteriores afirmaciones.



**Figura 139. Regresión de la durabilidad mecánica vs el contenido en cenizas.**

## c) Durabilidad mecánica y cantidad de finos

Los finos se generan durante la fase de fabricación, manejo y transporte de los pellets debido a su manipulación que puede dar lugar a su desgaste y por tanto a la generación de pequeñas partículas conocidas como finos. La durabilidad describe la cantidad de finos generada por los pellets tras haber sido sometidos a agitación mecánica o neumática (Lehtikangas et al. 2011). Así pues es de esperar que a más durabilidad del pellet exista una menor generación de finos debido a su más alta resistencia mecánica. Por tanto con el siguiente análisis se pretende abordar esta relación a partir de los pellets obtenidos por especie como muestra la Figura 140.

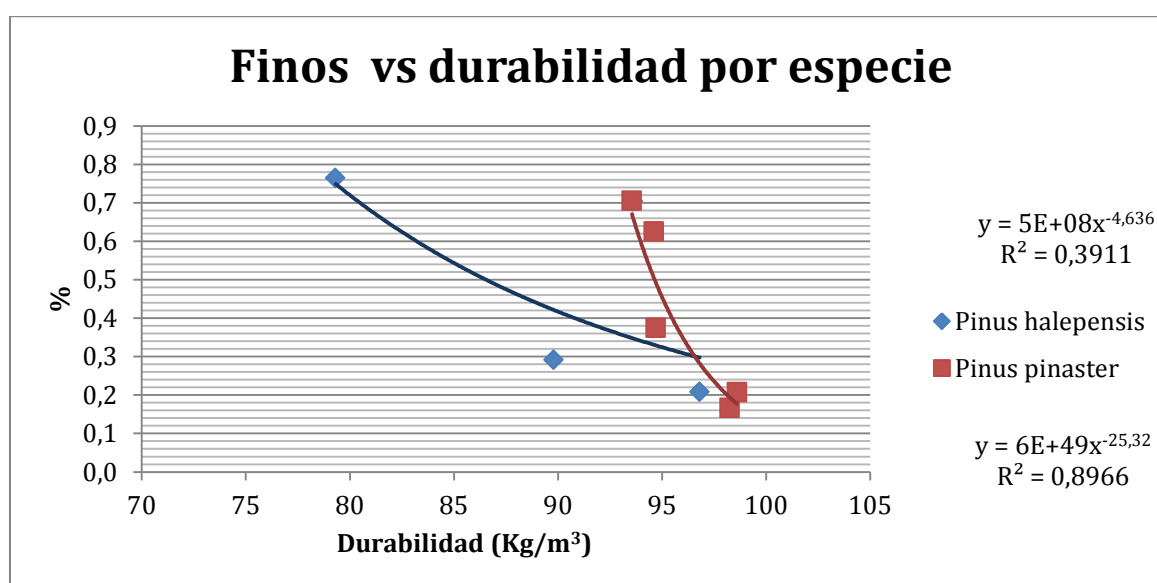
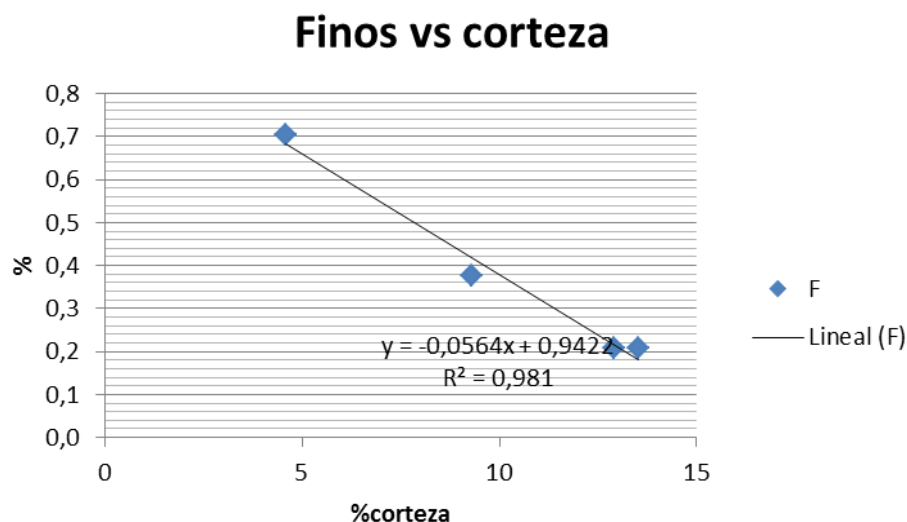


Figura 140. Regresión de finos vs durabilidad por especie.

Los resultados indican una alta correlación entre cantidad de finos y durabilidad para el caso del *Pinus pinaster* con un  $R^2$  cercano al 0,9. Sin embargo, los datos de *Pinus halepensis* no permiten concluir una relación directa entre ambas variables para esta especie seguramente debido a los valores anómalos obtenidos para la muestra PH SC 15 como se ha indicado con anterioridad, aunque cabe esperar que exista una relación inversamente proporcional conforme indica la literatura. Sin embargo, cabe señalar que en el presente estudio ambas variables son cuestionables debido al enfriamiento.

#### d) Cantidad de finos y porcentaje de corteza

El estudio de la relación entre la cantidad de finos y el porcentaje de corteza a partir de los pellets analizados da un  $R^2$  de 0,98 como muestra la Figura 141, lo que coincide con Filbakk (2011) que afirma que la cantidad de finos es decreciente con el incremento de porcentaje de corteza en las mezclas.



**Figura 141. Regresión de finos vs porcentaje de corteza.**

En resumen y de acuerdo con Lehtikangas et al. (2001), aunque existen relaciones claras entre variables como se muestra en este apartado, en general se desconoce la influencia de cada parámetro de calidad y el efecto que tienen los parámetros de fabricación sobre las variables estudiadas.

Por ejemplo, sobre el uso de corteza para la producción de pellets Filbakk et al. (2011) fabricaron distintas muestras de pellets con y sin corteza y en porcentajes variables en contenido de esta, señalando que los pellets puros de corteza poseen mejores propiedades mecánicas en comparación con pellets puros de madera y que aquellos con diversas concentraciones de corteza. Aunque las diferencias halladas no fueron significativas y para el caso de la durabilidad mecánica esta se sitúa en la misma categoría de calidad según la normativa (EN 14961-2) para todas las muestras. Por otra parte, las densidades a granel de los pellets formados por mezclas de madera-corteza fueron superiores a las densidades de aquellos puros de madera o corteza. Y como resultado también refrendado en el presente estudio, el contenido de cenizas aumentó con la cantidad de corteza en los pellets.

#### 4.4.2.4. Mezclas

En la Tabla 86 se detallan los porcentajes elegidos de cada muestra con el fin de incluir el máximo porcentaje de muestra con corteza sin sobrepasar el contenido en cenizas máximas teórico que se obtendría con los pellets elaborados a partir de esta mezcla.

**Tabla 86. Porcentajes calculados para la elaboración de pellets a partir de mezclas del material.**

ESPECIE	MUESTRA (SC-CC)	% SC	% CC
PH	SC 15 - CC 15	65	35
	SC 20 - CC 20	65	35
	SC 15 - RAMAS	70	30
	SC 20 - RAMAS	50	50
PP	CC 15 - RAMAS	55	45
	SC 15 - RAMAS	35	65
	CC 20 - RAMAS	50	50
	SC 20 - RAMAS	35	65

Los porcentajes de las muestras de *Pinus halepensis* muestran que para aquellos casos en que se mezcla astilla procedente de fuste descortezado, se puede incluir un 35% en base seca de astilla de fustes sin descortezar, mientras que para el caso de mezclar estos fustes descortezados con astillas procedentes de residuos selvícolas (ramas) habría que tener en cuenta las cenizas de la fracción de astillas descortezadas (SC 15 o SC 20) para poder incluir más o menos ramas, con un máximo de un 30% de ramas para SC 15 y un máximo de 50% en peso en base seca de ramas para SC 20.

Para el caso de mezclas de astillas de ramas de *Pinus pinaster* con astillas procedentes de árboles descortezados (SC 15 y SC 20) admiten un máximo de 65% en base seca de ramas, es decir, más que en el anterior caso de *Pinus halepensis* (máximo 50%), mientras que si lo que se mezcla son fustes sin descortezar con ramas dependerá de la fracción de fuste tomada, admitiendo un máximo de 50% en base seca de ramas para el caso de mezclar con fustes de 20 cm de DAP (CC 20) y de 45% para el caso de fustes de 15 cm de DAP (CC 15).

En el estudio de Lestander et al. (2012) en que mezclaban entre sí tres especies, dos de coníferas y una de frondosa en distintas proporciones, encontró que la composición de los pellets no influyó significativamente en variables como la densidad a granel o el contenido en humedad, pero sí lo hizo sobre variables como el contenido en cenizas. Por lo tanto, en el presente caso, al utilizar una prensa destinada a elaborar pellets de laboratorio, tan sólo las cenizas se consideran como factor limitante para obtener una buena calidad de pellets, ya que el resto de factores podría ser mejorado con otras condiciones de producción de pellets industrial (instalación de la enfriadora, mayor presión y temperatura en la pelletizadora, etc.).



Es por esta razón que, tras la elaboración de los pellets con mezclas en los porcentajes ya mencionados, se estudia el porcentaje de cenizas. Los análisis de humedad y contenido en cenizas dan los resultados mostrados en la Tabla 87.

**Tabla 87. Resultados de cenizas y humedad de los pellets a partir de mezclas del material.**

ESPECIE	MUESTRA (SC-CC)	% SC	% CC	Mad	A %
PH	SC 15 - CC 15	65	35	10,47	0,695
	SC 20 - CC 20	65	35	9,62	0,684
	SC 15 - RAMAS	70	30	10,00	0,690
	SC 20 - RAMAS	50	50	17,46	0,699
PP	CC 15 - RAMAS	55	45	9,33	0,650
	SC 15 - RAMAS	35	65	10,53	0,697
	CC 20 - RAMAS	50	50	15,71	0,701
	SC 20 - RAMAS	35	65	12,00	0,680

Los resultados demuestran la corrección de los porcentajes de las mezclas elegidos ya que en ningún caso el contenido en cenizas de los pellets supera el 0,7% máximo admitido por la normativa para la obtención de calidad ENPLUS A1 y tomada como objetivo para las muestras.



## ***CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES***

---

En este capítulo se recopilan las conclusiones a las que se ha llegado a través del análisis y discusión de los resultados en cada apartado de este trabajo de investigación, dando cumplimiento a los objetivos marcados.

### **5.1. Potencial de biomasa agroforestal en Provincia de Valencia: distritos bioenergéticos**

La cantidad de biomasa forestal presente en la Provincia de Valencia es elevada, situándose sobre 28t/ha, de las cuales, una tercera parte puede ser considerada biomasa forestal residual.

La posibilidad real que se podría extraer en la Provincia de Valencia, teniendo en cuenta parámetros restrictivos (excesivas pendientes del terreno, espacios protegidos, etc.) para que se dé un aprovechamiento sostenible en el tiempo, se sitúa en torno a 0,1 t/ha y año. Tomando como base esta cantidad y sumando la posibilidad anual de podas procedentes de cultivos agrícolas leñosos, es posible un aprovechamiento conjunto de ambas a nivel local en las zonas de suministro definidas con fines energéticos de modo autosuficiente.

Por tanto, estas zonas, formadas por un grupo limitado de municipios limítrofes, conforme a las estimaciones de biomasa realizadas, son capaces de autoabastecerse a partir del aprovechamiento de sus recursos endógenos (forestales y agrícolas) para su utilización como recurso energético. Tras el análisis integral de todas las variables que influyen directamente en el aprovechamiento sostenible y en la logística avanzada entre monte y punto central de valorización, necesarios para un suministro sostenido en cantidad y calidad de biomasa, se identifican los siguientes distritos bioenergéticos en la provincia de Valencia: Meseta Utiel-Requena, Alt Túria, Vall d'Ayora, Túria Mitjà, Serra d'Enguera, Serra d'Utiel, La Mola de Cortes i La Vall d'Albaida.

## **5.2. Directrices de gestión, aprovechamiento y logística de biomasa agroforestal**

### **5.2.1. Planificación del suministro**

Para un aprovechamiento integral de la biomasa residual de origen forestal y agrícola a nivel de unidad de gestión supramunicipal es necesaria una correcta cuantificación de los recursos forestales y agrícolas totales disponibles y susceptibles en la práctica de ser utilizados, una ordenación de los mismos y una correcta y detallada planificación de su recolección o aprovechamiento a medio-largo plazo en cuanto áreas de aprovechamiento, orden del mismo, previsión de la estacionalidad del suministro y cantidades y calidades a aprovechar.

### **5.2.2. Aprovechamiento**

Para la fase de ejecución de los aprovechamientos forestales se necesita obtener datos detallados de cantidades y calidades por rodales, características de las masas forestales, fisiografía, accesibilidad, localización de cargaderos, distancias a planta, etc. y detallar los sistemas de aprovechamiento a implantar por cada una de estas unidades de aprovechamiento forestal dependiendo del estado de la masa a aprovechar y la decisión sobre el destino del uso final de la biomasa (gasificación, cogeneración, combustión, elaboración de biocombustibles sólidos, etc.)

En cuanto a la recogida de restos de podas agrícolas se han de asegurar cantidades mínimas por zonas y puntos de acopio de la biomasa así como de recogida de la misma.

### **5.2.3. Logística de aprovisionamiento**

En esta fase se requiere un estudio previo de la localización y dimensionamiento de cargaderos y zonas de acopio de biomasa agrícola en base al cual se deben estudiar los costes reales de las distintas opciones de transporte y logística necesaria para trasladar la biomasa de campo a planta.

#### **5.2.4. Transformación energética en planta**

Dependiendo de la opción de aprovechamiento de bioenergía que se elija a nivel de unidad de gestión, se necesita un diseño y ejecución de un proyecto de planta con características concretas en cuanto a dimensionamiento, inversión, maquinaria y equipos, tipo de biomasa, etc. para el destino elegido.

Teniendo en cuenta la finalidad de autoabastecimiento de energía renovable a nivel local a partir de la biomasa, los destinos preferentes deberán ser la implantación de una planta de pellets que puede dar servicio a hogares a nivel local y/o la construcción de una planta industrial de transformación de astillas para generación de calor y/o energía eléctrica que puede abastecer tanto a edificios públicos como a pequeños núcleos urbanos mediante *district heating* o red eléctrica local de existir en la unidad de gestión. En cualquier caso, tras los resultados obtenidos en esta investigación, la valorización térmica se debe priorizar sobre la valorización eléctrica en las actuales condiciones de mercado y de viabilidad económica de los proyectos industriales.

#### **5.2.5. Distribución y uso de la energía a nivel local**

Siguiendo las conclusiones del apartado anterior, dependiendo de la opción elegida, se debe paulatinamente ir sustituyendo calderas de gasoil por calderas de pellets (para lo que se requieren estudios previos de potencialidad de implantación, costes, posibles ayudas públicas y diversos servicios comerciales), aprovechar los excedentes de pellets para su comercialización a nivel suprazonal, es decir a nivel comarcal, regional y de ser posible a mercados mayores, y/o diseñar el aprovechamiento de calor en edificios públicos mediante calderas o sistemas de calor centralizados (*district heating*), así como la posibilidad de subir a red los excedentes de electricidad generados no consumidos a nivel local.

En el momento actual en el que todavía no se ha desarrollado la demanda de bioenergía y la cantidad del recurso es limitado, interesan modelos que aseguren la viabilidad técnica y económica de la inversión, como las fábricas de pellets a escala local/comarcal que podrían abastecerse fácilmente de las zonas cercanas del biocombustible forestal, empleando el agrícola como complementario.

El aprovechamiento del biocombustible forestal en plantas de elaboración de biocombustibles sólidos de alto valor añadido (pellets o también briquetas), ubicadas cerca de las zonas forestales de producción y con capacidad de suministro de materia prima, se plantea como la mejor alternativa para la puesta en valor este recurso, impulsando el incipiente mercado de los biocombustibles de base agroforestal en la zona, aumentando la independencia energética y facilitando el consumo de energía renovable en la sociedad.

Otras cadenas de valor, como la generación de energía térmica/eléctrica mediante combustión o cogeneración, principalmente, requieren de grandes cantidades de suministro, por lo se

necesitaría garantizar estas cantidades y complementarlas con diversos tipos de biomasa además de la forestal (alperujo de la aceituna, residuos orgánicos de industrias agroalimentarias, fracción orgánica de residuos sólidos urbanos, etc.).

### 5.3. Masas forestales representativas y prioritarias

Más de una cuarta parte de la superficie forestal arbolada de la provincia de Valencia está ocupada por *Pinus halepensis* en estado de fustal-latizal con una fracción de cabida cubierta de entre el 40-69%. A nivel fisiográfico estos estratos se sitúan a altitudes medias de 600 m sobre el nivel del mar y están dominados por orientaciones este-suroeste, con pendientes predominantes de en torno al 15%.

Las parcelas seleccionadas han cumplido con los requisitos para ser catalogadas como características de este estrato y por la predominancia del mismo, han sido evaluadas así pues como parcelas representativas para el trabajo de investigación.

Considerando la prioridad por representatividad en cuanto a superficie ocupada, trabajos posteriores deberían centrarse en el siguiente tipo de masa dominante en el mismo territorio, que es el de monte bravo o regenerado natural post-incendio de *Pinus halepensis*.

### 5.4. Sistemas optimizados de aprovechamiento y logística

#### 5.4.1. Sistemas comparados

La productividad de biomasa obtenida a partir de los sistemas de aprovechamiento es equiparable para el sistema de aprovechamiento integrado de fustes y restos y para el sistema de aprovechamiento de árbol completo, dado que en el primer sistema tan sólo se queda en campo la copa de luz de los árboles. Por tanto, la cantidad de biomasa que puede obtenerse con uno u otro sistema es prácticamente la misma a igualdad de intensidad de aprovechamiento.

El rendimiento del apeo es más alto en el caso del aprovechamiento por el sistema de árbol completo con respecto al sistema integrado. En cuanto al desembosque, en este caso el rendimiento es más alto para el sistema integrado, debido a una mayor cantidad de biomasa que es capaz de transportar el autocargador en cada ciclo de transporte hasta cargadero. Esto se debe a que la biomasa fraccionada en fuste y residuos (ramas y copa de sombra) ocupa un menor volumen sobre la caja del autocargador frente al árbol completo. Por último, para el caso del astillado el sistema de árbol completo posee un ligero mayor rendimiento frente al sistema

---

integrado. No obstante, la variabilidad es tan alta entre las parcelas dentro de cada sistema de aprovechamiento que ninguna de estas diferencias en rendimientos de cada fase se muestra significativa a la luz de los resultados estadísticos.

En el caso de los consumos, el consumo de la motosierra y de la astilladora por tonelada es mayor en el sistema de aprovechamiento integrado que en el sistema de árbol completo. Sin embargo, en su conjunto el sistema de árbol completo consume más combustible, debido a un mayor consumo del autocargador que necesita más ciclos para desemboscar la biomasa.

En cuanto al impacto medioambiental, los resultados nos permiten concluir que el tránsito de la maquinaria en los procesos del sistema de aprovechamiento de árbol completo causa mayores daños, tanto a la vegetación remanente como al suelo y al sotobosque, sobre todo debido a la necesidad de mayor espacio de maniobrabilidad en el desembosque. No obstante, para obtener resultados más concluyentes, sería necesario realizar un seguimiento de los impactos generados en el tiempo, de manera que se pueda comprobar la afcción real de los aprovechamientos a medio plazo.

La rentabilidad de los aprovechamientos es mayor en el caso del sistema integrado debido a menores costes respecto al sistema de árbol completo, principalmente motivados por un menor tiempo de uso del autocargador, junto a unos mayores beneficios a causa de unos mayores ingresos por la venta de una parte de la astilla de fuste generada, que es de mayor calidad y por tanto mejor remunerada. Pese a todo ello, la rentabilidad económica es negativa si se vende la astilla en cargadero, mientras que empieza a ser positiva con su venta en planta, sea cual sea su sistema de aprovechamiento, siendo mayor la rentabilidad a menor humedad y a mayor calidad del material. El caso de la rentabilidad financiera es similar, pero más agudizado, siendo tan sólo rentable la venta de astillas provenientes del sistema integrado en planta a una humedad inferior al 30%.

En lo que respecta a emisiones de gases de efecto invernadero, debido a un mayor consumo de combustible en el sistema de árbol completo, éste resulta ligeramente más contaminante en cuanto a Kg de CO<sub>2</sub> equivalentes por tonelada de biomasa producida.

Por último, en cuanto a balances energéticos, ambos sistemas producen biomasa que contiene mayor energía que la necesaria para llevar a cabo su aprovechamiento, en cualquier caso en un factor mayor a diez. Por tanto, la baja energía que se necesita para movilizar la biomasa forestal se traduce en un gran potencial de reemplazamiento de combustibles no renovables por biocombustibles procedentes del monte. Sin embargo, en términos de entrada y salida de energía (input-output), un análisis más detallado como un inventario de ciclo de vida (LCI, *life cycle inventory*) considerado por el método de análisis del ciclo de vida (LCA, *life cycle assesment* según ISO 14040:2006) puede considerarse tras esta experiencia como necesario para poder proporcionar una mejor base científica para la premisa de que la biomasa como fuente de energía tiene mucho menor impacto ambiental sobre su ciclo de vida total que los combustibles fósiles.

Tras la valoración conjunta de productividad, rendimientos, rentabilidad, impactos medioambientales sobre el medio forestal y en emisiones, así como en balance energético, en el presente trabajo de investigación se puede concluir de forma global que el sistema de

aprovechamiento integrado optimiza frente al sistema de árbol completo, a nivel productivo, económico y ecológico, el aprovechamiento de biomasa en masas repobladas de latizal alto de *Pinus halepensis* en la provincia de Valencia. Sin embargo, hay que señalar que estos sistemas de aprovechamiento son muy sensibles al rendimiento de la maquinaria y a las variables que definen la masa forestal. Especialmente relevante se puede considerar la fase de desembosque de la biomasa, ya que en el trabajo del autocargador se concentran muchos costes, consumos e impactos sobre el medio. Futuras investigaciones y desarrollos tecnológicos se deberían centrar en optimizar la logística interna de la biomasa desde el punto de apeo hasta el punto de astillado en este tipo de claras.

Finalmente, podemos concluir que es necesaria más investigación sobre el efecto de otras variables no consideradas en este estudio, como son el efecto de mayores superficies de aprovechamiento, otras combinaciones de maquinaria y otros criterios selvícolas de aprovechamiento y su influencia sobre los costes, la productividad, los impactos, balances energéticos, emisiones y la calidad de la biomasa obtenida a través de los dos sistemas de referencia de aprovechamiento integrado y de árbol completo.

### **5.4.2. Recomendaciones prácticas en planificación, organización y operaciones**

Tras el desarrollo de la planificación, organización y ejecución de los trabajos se debe concluir, en primer lugar, que es absolutamente necesaria una comunicación fluida con el capataz forestal, con el fin de transmitir y que éste entienda exactamente lo que se espera obtener en los trabajos experimentales y de qué modo se toman los datos. Por otra parte, su presencia también se estima como absolutamente necesaria a modo de control y seguimiento para que el equipo de trabajo no incurra en desviaciones. Hay que tener planificado cualquier posible desvío del programa y alternativas para que se pueda seguir con el estudio de tiempo en el aprovechamiento. Tras la experiencia en este trabajo de investigación, se puede concluir que protocolos de actuación detallados se hacen necesarios para el registro de cualquier acción (toma de datos de tiempo, de daños, etc.)

Para posibilitar la comparación de parcelas y sistemas de aprovechamiento es necesaria una homogeneidad de estación, masa forestal y parámetros fisiográficos, así como a una homogeneidad en la intensidad de los aprovechamientos y en los criterios seguidos para el replanteo de las parcelas. Si estos criterios no se cumplen, dada la diversidad del medio forestal, de la masa y posiblemente de la subjetividad en algunos casos de la persona que replantea las parcelas (si no es que además son varias personas), es muy difícil obtener conclusiones concluyentes/definitivas sobre los aprovechamientos, ya que éstos responderán a distintas realidades.

A pesar de que el muestreo se hizo siguiendo metodología contrastada evaluando la necesidad de homogeneidad de las parcelas y de la intensidad de aprovechamiento y llegando a un número de tres parcelas por sistema analizado, se concluye que para obtener resultados



estadísticamente más fiables, una mayor replicabilidad hubiera sido necesaria y es recomendable para futuros trabajos de investigación que sigan la metodología desarrollada y aplicada.

## **5.5. Calidad de biocombustibles sólidos**

### **5.5.1. Calidad de astillas**

De los aprovechamientos forestales se han podido obtener tres grupos de astillas con distintas calidades. Con un secado previo para reducir la humedad por debajo del 35%, las muestras de astillas que presentarían una calidad superior, catalogada como ENPLUS A2, serían las muestras provenientes de la fracción de fuste del aprovechamiento mediante el sistema integrado. Tras ellas, se encontrarían las astillas provenientes de árbol completo con una calidad ENPLUS B1. Por último, las astillas provenientes de la fracción de ramas del aprovechamiento mediante sistema integrado no superarían los requisitos establecidos por la norma para poder clasificarlos. El principal parámetro que discrimina entre unas calidades u otras es en este caso, a parte del secado, el contenido de cenizas intrínseco de la biomasa, que es superior en las astillas de ramas, seguidas por las astillas de árbol completo y por último por las astillas procedentes de fustes.

Por todo ello podemos concluir que es posible obtener astillas de suficiente calidad procedente de estos sistemas de aprovechamiento biomásico (fustes y árbol completo), siempre que se controle la humedad y la presencia de cenizas.

### **5.5.2. Calidad de pellets**

#### **5.5.2.1. Planta piloto**

Tras el desarrollo de toda la investigación, en primer lugar, se debe concluir que para la selección de los equipos necesarios para el proceso de fabricación de pellets hay que tener en cuenta las características del material que se quiere pelletizar (especies, densidad, humedades, tamaño de partículas, etc.) y las calidades que se quieren alcanzar para elegir los equipos que mejor se adapten a los requisitos, posibilidades y objetivos de la planta. Así, en el caso de la presente tesis doctoral, con el diseño de una línea de fabricación a escala de laboratorio se han podido obtener pellets de calidad suficiente para su evaluación comparativa. No obstante, se ha considerado necesario la mejora en el sistema de enfriado

que no pudo ser instalado para obtener pellets de calidad alta, permitiendo así una mejor evaluación absoluta de la calidad final del pellet.

En segundo lugar, fruto de la experiencia acumulada, se vió necesaria la instalación de ventilaciones y extractores de humos y polvos para la seguridad del funcionamiento de la planta piloto. Las tomas de corriente y el espaciado necesario para instalar líneas automáticas de alimentación, así como espacio suficiente para el material a pelletizar han de ser tenidos en cuenta antes de iniciar la instalación de los equipos.

### **5.5.2.2. Fabricación de pellets**

Tras los ensayos de fabricación de todas las muestras de pellets en este trabajo de investigación, se concluye como necesario un acondicionamiento de las astillas a introducir en la línea de producción, de modo que la humedad sea lo más constante posible. En cualquier trabajo de este tipo se requiere de un calentamiento previo de la pelletizadora para que alcance temperaturas óptimas de pelletizado, lo que permite conseguir productos finales comparables entre sí. Un enfriamiento óptimo es imprescindible para la obtención de pellets de calidad. Así mismo, tal como se ha podido asegurar en el desarrollo de la investigación, la conservación en lugares adecuados de los pellets también es importante para mantener sus propiedades hasta la realización de los ensayos.

### **5.5.2.3. Control de calidad**

Excluyendo los resultados de durabilidad mecánica debido a un enfriamiento no adecuado y una muestra con valores anormales para la cantidad de finos, los resultados permiten concluir que la calidad de los pellets obtenidos es alta, siendo el principal factor determinante o discriminatorio la cantidad de cenizas que contienen. Incluso los pellets procedentes de residuos biomásicos (pellets elaborados a partir de astillas de ramas) alcanzan una calidad A2, con lo que se puede concluir que es factible la elaboración de pellets a partir de fustes descortezados y sin descortezar de las especies *Pinus halepensis* y *Pinus pinaster*, así como de su fracción de ramas, lo que implica que la provincia de Valencia, en la cual estas especies son predominantes, posee abundantes recursos biomásicos que pueden ser transformados en productos energéticos de alto valor añadido.

En cuanto a la influencia de la especie, fracción de procedencia de las astillas de fustes o ramas y la presencia o no de corteza sobre las distintas variables estudiadas a través de los ensayos de calidad realizados, los resultados muestran que tanto densidad a granel, durabilidad mecánica y contenido en cenizas dependen de la especie pelletizada, mientras que la presencia de corteza influye significativamente tan sólo en el contenido en humedad de los pellets y en el contenido en cenizas. Según los resultados, ninguna de las variables se ve

---

afectada por la fracción de procedencia de las astillas, por lo que de nuevo se refrenda la conclusión de que los residuos forestales son aptos para la elaboración de pellets de calidad.

Del mismo modo, cabe señalar que existe una relación directamente proporcional y estadísticamente significativa entre el porcentaje de corteza y el contenido de cenizas y la durabilidad mecánica, mientras que existe una relación inversamente proporcional entre durabilidad mecánica y la cantidad de finos generados (demostrada para el caso de pino rodeno) y entre esta cantidad de finos y porcentaje de corteza.

Por tanto, se puede concluir que la cantidad de corteza presente en el pellet de *Pinus halepensis* y de *Pinus pinaster*) no disminuye de forma significativa casi todas sus variables de calidad, aunque cabe controlar la cantidad de cenizas añadidas que su presencia conlleva.

Tras el desarrollo de la presente investigación y a pesar de todo el conocimiento científico acumulado durante los últimos años, cabe señalar que no se dispone en la actualidad de conocimiento suficiente sobre otros parámetros que también podrían tener influencia sobre la calidad de los pellets, como el contenido de resinas, la influencia del contenido en humedad inicial de las astillas en el momento de la elaboración del pellet y sobre cómo influyen las condiciones de la prensa pelletizadora (temperatura y presión) y las variables que intervienen en el proceso a escala industrial de fabricación de pellets.

También cabe señalar que la dificultad para la separación de madera y corteza impidió conocer con exactitud el contenido de corteza en las ramas, lo que hubiera proporcionado información más detallada sobre su influencia.

Este estudio demuestra que mejorar la calidad de los pellets es posible con un mayor conocimiento sobre la biomasa utilizada. Por tanto, se necesita de más investigación en este ámbito para optimizar los procesos de pelletización a nivel industrial.

En cuanto a la elaboración de pellets a partir de biomasa con corteza, cualquier diámetro de fuste de la especie de *Pinus pinaster* tolera mayores porcentajes en peso seco en comparación al *Pinus halepensis*. Es decir, mientras que el *Pinus pinaster* puede tolerar de entre un 45 a un 65%, el *Pinus halepensis* no tolera más de un 35 a un 50% de material con corteza dependiendo del diámetro del fuste descortezado.

Esto implica que es posible utilizar material proveniente de ramas o fustes no descortezados en la elaboración de los pellets, por lo que se puede concluir que existen márgenes de ahorro en el proceso industrial de fabricación del pellet o abastecimiento de biomasa, ya que se puede evitar descortezar la biomasa que llega a planta o, incluso, esta planta se puede proveer directamente de biomasa no descortezada (incluyendo residuos forestales), hasta los límites indicados en los resultados, permitiendo alcanzar una calidad superior de ENPLUS A1.

## 5.6. Limitaciones del estudio

Con el fin de obtener un marco válido para la correcta interpretación de los resultados y conclusiones, a continuación se detallan los criterios tomados, los condicionantes y los límites de estudio que encuadran la investigación llevada a cabo en la presente tesis.

Los criterios tomados para la definición de lo que se considera como biomasa forestal residual así como agrícola residual son claves ya que afectan de manera directa a la cuantificación. Así mismo, hay que considerar que, en el caso de la biomasa forestal, el estado de los árboles, la calidad de estación y el turno de aprovechamiento afectará directamente a la cantidad de biomasa residual que una masa es capaz de producir. Del mismo modo, para la obtención de la cantidad de biomasa agrícola residual se utilizan coeficientes que dependen altamente de la intensidad y el tipo de poda y que también variarán empíricamente con el marco de plantación, condiciones edafológicas, hídricas, etc. Por todo ello, se considera que las cantidades de biomasa obtenidas se encuentran condicionadas por muchas variables que no ha sido posible controlar a una escala de estudio regional como la utilizada.

Respecto a la zonificación del territorio en zonas de gestión y posible ubicación de las plantas, cabe señalar que las unidades de gestión son orientativas de unidades autosuficientes en cuanto a cantidad de biomasa y no consideran un análisis detallado de la logística de transporte a través de las vías de comunicación que requeriría de aplicación de modelos de optimización logística además de un conjunto de decisiones y restricciones más complejas, por lo que en la aplicación práctica, la magnitud de distritos bioenergéticos podrían variar. Se hace notar que en la consideración de la disponibilidad de biomasa no se ha incluido la titularidad de las masas y voluntad o posibilidad de explotación, por lo que hay que señalar que estas unidades representan unidades potenciales y no reales. Por otra parte, la definición del tipo de planta a instalar y su tamaño determina a su vez las necesidades de suministro y calidades de biomasa a obtener, por lo que es necesario recordar que las unidades de gestión se enmarcan dentro de una serie de criterios previamente decididos.

En cuanto a los resultados obtenidos de los aprovechamientos forestales cabe indicar que estos están sometidos a numerosas variables como la homogeneidad de la masa forestal de las parcelas experimentales, la distancia de desemboque y a cargadero, la intensidad y homogeneidad en el aprovechamiento, la desvoltura, habilidad y experiencia de los operarios, la operatividad de la maquinaria y las condiciones climatológicas y meteorológicas en que estos aprovechamientos se desarrollaron. Se considera que se podría obtener una mayor robustez en los resultados realizando un mayor número de repeticiones de los tratamientos, es decir, aprovechando un número mayor de parcelas por tratamiento sobre en masa totalmente uniforme con menores coeficientes de variación entre sus parámetros dasométricos, aunque cabe reconocer que la realidad forestal, fuera de las plantaciones, presenta una elevada variabilidad.

Por otra parte, la utilización de otro tipo de maquinaria o de la misma maquinaria con distintas potencias y capacidades u operatividad hará variar los resultados, por lo que estos están ligados a las condiciones especificadas. Del mismo modo, con el fin de comparar sistemas se ha utilizado

---

en ambos la misma tecnología, no siendo esta quizás la más apropiada para para aprovechamiento de árbol completo.

Cabe señalar también que la superficie de aprovechamiento influye directamente sobre los resultados, y en este caso las superficies han sido muy limitadas. Por otra parte, el control y marcaje de los árboles a apear así como la necesidad de mantener ciertas variables controladas entre ambos sistemas por parte de la investigación ha hecho que quizás no se desarrollaran los aprovechamientos con la naturalidad que se realizarían en condiciones no experimentales y esto afecta directamente a los resultados obtenidos.

Se podría mejorar la precisión de los resultados contabilizando el tiempo entre la operación de apeo y de procesado en el caso del sistema integrado para conocer mejor las causas de las diferencias que aparecen entre uno y otro sistema. Así mismo, en la operación de desembosque el autocargador cargó a la vez fustes y residuos por lo que no se conoce el tiempo que se necesita para extraer una tonelada de uno u otro material por separado. Por otra parte, la biomasa se depositó en tres pilas en cargadero junto a la pista forestal, una de fustes provenientes del sistema integrado, otra de restos de biomasa y otra de árboles completos. Esto ha impedido conocer con exactitud la cantidad exacta de biomasa obtenida por cada parcela, habiendo tenido que recurrir a una división proporcional a la cantidad teórica a obtener de los árboles marcados para conocer dicha cantidad real. Por último, durante el astillado no se midió el tiempo de astillado por separado de fustes y restos de biomasa para el sistema integrado por lo que se desconocen las diferencias en tiempo entre un material y otro. El material tuvo que ser depositado al borde de la pista por una falta de coordinación entre la operación de astillado y la de transporte por lo que se considera que las astillas podrían haberse contaminado con restos de tierra pese a las medidas tomadas para impedirlo durante la recolección de las muestras.

En cuanto a la medición de los consumos, estos se realizaron considerando el momento de carga y recarga de los depósitos junto con su capacidad, por lo que los consumos son estimados y no exactos debido a una carencia en tecnologías de medición.

La evaluación del impacto ambiental causado sobre el suelo y la vegetación se realiza de forma visual, no existiendo un estudio de compactación del suelo o de medición exhaustiva de marcas de rodadura o profundidades y extensión de daño sobre los pies remanentes o medición de superficie de sotobosque eliminado. Por otra parte, cabe señalar que se desconoce el origen preciso del daño, que quizá pueda estar asociado al apeo motor manual y caída direccional de los árboles o quizá al desembosque, aunque por igualdad de acción en la fase de apeo, se asocia este daño al desembosque.

No se ha tenido en cuenta para el análisis de coste el estudio empírico de la logística externa ni la evolución en el contenido en humedad que influenciaría tanto los costes de transporte como el precio de venta de las astillas y por tanto la rentabilidad económica y financiera de los aprovechamientos.

En cuanto a las emisiones de gases de efecto invernadero, estas se limitan a la propia movilización de la biomasa sin contemplar un análisis completo del ciclo de vida que incluiría las emisiones necesarias para producir la maquinaria de aprovechamiento y de la planta de transformación como las emisiones derivadas de la combustión final de la biomasa, igualmente los balances energéticos no contemplan la fabricación de la maquinaria ni la instalación y fabricación del equipamiento de la planta.

La calidad de las astillas según los distintos orígenes (astillas de árbol completo, fuste o ramas) junto con la demanda tienen un fuerte impacto en el precio lo que implica según ello una mayor conveniencia de un sistema frente a otro en cuanto a ingresos.

Por último, es importante señalar que la producción de pellets se ha realizado en una planta piloto de fabricación de pellets recién instalada, por lo que las condiciones de producción no han podido ser optimizadas. Igualmente esta planta fue diseñada a escala de laboratorio por lo que no reproduce exactamente las condiciones de presión, temperaturas, refrigeración, etc., de una línea de producción en uso, por lo que los resultados respecto a los de plantas de transformación industrial pueden verse afectados. Una mayor cantidad de muestras por cada una de las variables estudiadas proporcionaría resultados más robustos en cuanto a influencia de las variables de origen, corteza y especie sobre la calidad del pellet y sobre la interacción existente entre las variables de calidad.

### 5.7. Futuras investigaciones

A continuación se detallan líneas de investigación de gran interés para el aprovechamiento integral de la biomasa que podrían dar continuidad y aún mayor profundidad a la investigación realizada:

- Contraste de la cuantificación de biomasa forestal residual teórica con parcelas agrícolas y forestales de control para una mayor aproximación empírica de la cantidad de biomasa residual disponible.
- Estudio del efecto de la titularidad, la legislación vigente, la disponibilidad de recursos de los propietarios y el modo óptimo de la organización para el aprovechamiento de la biomasa sobre la disponibilidad real de biomasa.
- Estudio del coste de aprovechamiento según distancia a planta considerando el tipo de transporte (biomasa en bruto o previamente astillada), el medio de transporte, la calidad y fluidez de las vías de comunicación, etc.
- Estudio de la posible necesidad de centros logísticos como puntos de apoyo para una mejor logística, todo ello según la tipología de planta de biomasa a ubicar, sus necesidades y requerimientos en calidad de biomasa.
- Evaluación del sistema óptimo entre dos sistemas de aprovechamiento (integrado y de árbol completo) en que se utilizaran las tecnologías más apropiadas para su desarrollo, comparando así su máximo potencial.
- Evaluación y contraste de los tiempos, consumos y rendimientos de los trabajos de aprovechamiento de uno y otro sistema fuera del control exhaustivo experimental, para observar la realidad de los rendimientos en condiciones de operación diaria.
- Análisis elemental del tiempo dedicado a cada proceso durante el apeo, es decir, tiempo efectivo dedicado al apeo y al procesado de los árboles separadamente para conocer con exactitud las razones de las diferencias en rendimientos en la fase de apeo entre el sistema integrado y de árbol completo. Igualmente, sería interesante conocer el tiempo que requiere la carga de fustes y la carga de biomasa residual por separado en el sistema integrado y contabilizar el tiempo de desplazamiento dentro de la parcela.

- Estudio de la evolución del contenido de humedad de la biomasa a lo largo del transporte y de su almacenamiento en cargadero o planta y su efecto sobre la cadena de valor de la biomasa en condiciones mediterráneas.
- Estudio detallado del impacto sobre la vegetación, la compactación del suelo y la erosión producida con uno u otro sistema de aprovechamiento.
- Estudio de los efectos del sistema de aprovechamiento sobre la contaminación de las astillas obtenidas.
- Investigación sobre la generación de pellets a partir de mezclas con otros biocombustibles agroforestales como otras especies leñosas o matorral.
- Estudio de la influencia de los parámetros de funcionamiento de la línea de fabricación de pellets (presión, temperatura, tiempos de enfriado, etc.) sobre la calidad de los mismos.





### 6.1. Científico-técnica

- Acar HH, Dinç B (2001). An investigation of winter harvesting on steep terrain in forestry. *Turk J Agric For* 25: 139-147.
- Acuna M, Anttila P, Sikanen L, Prinz R, Asikainen A (2012). Predicting and Controlling Moisture Content to Optimise Forest Biomass Logistics. *Croatian Journal of Forest Engineering* 33(2): 225-238.
- Adebayo A, Han H, Johnson, L (2007). Productivity and cost of cut-to-length and whole-tree harvesting in a mixed-conifer stand. *For Prod J* 57: 59-69.
- AEBIOM (2007a). Procurement of forest residues. European Biomass Association Brussels.
- AEBIOM (2007b). Pellets for small-scale domestic heating systems. European Biomass Association Brussels.
- AEBIOM (2008). A Pellet Roadmap for Europe. European Biomass Association Brussels.
- AEBIOM (2012). European Bioenergy Outlook 2012. European Biomass Association. Brussels.
- AFOVAL (2008). La Comunitat Valenciana desaprovecha el 81,5% de la biomasa forestal de sus bosques. *Agroterra*. Disponible en: <http://www.agroterra.com/blog/actualidad/la-comunidad-valenciana-desaprovecha-el-81-5-de-la-biomasa-forestal-de-sus-bosques/19533>
- Agencia Fitch (2014). Electricity Tariff Deficits Peaking in Spain and Portugal. Disponible en: [https://www.fitchratings.com/gws/en/fitchwire/fitchwirearticle/Electricity-Tariff-deficits?pr\\_id=882074](https://www.fitchratings.com/gws/en/fitchwire/fitchwirearticle/Electricity-Tariff-deficits?pr_id=882074)
- AIDIMA (2010). No editado. Análisis de la potencialidad del aprovechamiento biomásico en la Comunitat Valenciana.
- Ala-Fossi A (2005). Forest Fuel Production in Finland. Contribution from FFRI. 5Eures Project Meeting, METLA Joensuu Disponible en: [http://elearn.ncp.fi/materiaali/kainulainens/5eures/biomass\\_production\\_transport/supply\\_chains\\_and%20technologies/material/Forest\\_fuel\\_supply\\_chains\\_and\\_technologies\\_AnttiAla-Fossi.pdf](http://elearn.ncp.fi/materiaali/kainulainens/5eures/biomass_production_transport/supply_chains_and%20technologies/material/Forest_fuel_supply_chains_and_technologies_AnttiAla-Fossi.pdf)
- Alakangas E (2005). Properties of wood fuels used in Finland. Technical Research Centre of Finland, VTT. Processes, project report PR02/2030/05. Jyväskylä, 90p + app. 10p.
- Alakangas E (2006). Production technique of logging residue chips in Finland. VTT Energy.
- Alakangas E, Sauranen T, Vesisenaho T (1999). Production Techniques of Logging Residue Chips in Finland: Training Manual. VTT Energy, Jyväskylä.

- Allué E, Nadal J, Estrada A, García-Arguelles P (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.
- Almagro C (2000). Estudio sobre la trituradora Meri en Extremadura. EU.I.T. Forestal (no publicado). Disponible en: [www.orgaccmMorg/xTEIMAS/TEIM-17\\_DESENVOLVEMENTO/ALMACEN/teimX-1708.htm](http://www.orgaccmMorg/xTEIMAS/TEIM-17_DESENVOLVEMENTO/ALMACEN/teimX-1708.htm) 5/7
- Almagro C, Tolosana E, Ambrosio Y, Fernández B, Vignote S (2012). El estado actual de la gestión de los residuos forestales en España. Organización Galega de Comunidades de Montes Veciñais en Man Común.
- Ambrosio Y (2003). Modelos de tiempos, rendimientos y costes de las operaciones semi-mecanizadas de aprovechamientos de claras de masas de *Pinus sylvestris* L. Tesis doctoral (no publicada). ET.S.I.I Montes (UPM). Madrid.
- Ambrosio Y (2005). Estudios de tiempos de cosechadoras forestales en una serie de aprovechamientos de primera clara en masas de *Pinus radiata* y *Pinus sylvestris* en el distrito forestal VII de Galicia Congreso Forestal de Portugal 2005. Lisboa.
- Ambrosio Y, Tolosana E (2007). El control de tiempos y rendimientos en los trabajos forestales. El programa Kronos. Ciencia y Técnica. 1er Trimestre 2007. Nº 87, pp. 14-20.
- Andersson B (1994). Cut-to-length and tree-length harvesting systems in central Alberta: A comparison. Tech. Rept. NO TR-108. FERIC Saint-Jean, Pointe-Claire, QC, Canada. 32 pp.
- Andersson B, Falk S (eds.) (1984). Forest Energy in Sweden: Report from Seven Years of Whole Tree Utilization Research. Swedish University of Agricultural Sciences, Garpenberg. 1984.
- Andersson G (1999). New technique for forest residue handling. Proceedings of the 1st Forest Engineering Conference: Harvesting 6 pp.
- Andersson G, Nordén B, Jirjis R, Åstrand C (2000). Composite residue logs cut wood-fuel costs (SkogForsk Results NO 1, 2000). The Forestry Research Institute of Sweden, Uppsala.
- APPA (2009). Estudio del Impacto Macroeconómico de las Energías Renovables en España. Asociación de Productores de Energías Renovables. Disponible en: [http://www.appa.es/descargas/InformeAppa\\_web.pdf](http://www.appa.es/descargas/InformeAppa_web.pdf)
- APROPELLETS (2012). El mercado del pellet español. *Energética XXI* • Nº 119 Abril 2012. p.103.
- Araújo TM, Higuchi N, Carvalho JA Jr (1999). Comparison of formulae for biomass-content determination in a tropical rain forest site in the state of Pará, Brazil. *For Ecol Manage* 117:43-52
- Arno J, Masip J (2003). Cost horari de la maquinària forestal. Edició i producció: Institut d'Edicions de la Diputació de Barcelona. Diputació de Barcelona, Xarxa de Municipis. Àrea d'Infraestructures, Urbanisme i Habitatge Oficina Tècnica de Prevenció Municipal d'Incendis Forestals. Quaderns d'Informació Tècnica 7. 95 pp.

- 
- Arshadi M, Gref R (2005). Emission of volatile organic compounds from softwood pellets during storage. *Forest Products Journal* 55: 132–135.
- Arshadi M, Gref R, Geladi P, Dahlgvist SA, Lestander T (2008). The influence of raw material characteristics on the industrial pelletizing process and pellet quality. *Fuel Processing Technology*, 89(12): 1442.
- ASEMFO (2010). El papel de la biomasa forestal primaria en el nuevo PER 2011-2020. Asociación Nacional de Empresas Forestales. Madrid.
- Asikainen A, Kuitto PJ (2000). Cost factors in wood fuel procurement. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 30(1/2): 79–87.
- Asikainen A, Pulkkinen P (1998). Comminution of logging residues with Evolution 910R chipper, MOHA chipper truck, and Morbark 1200 tub grinder. *Journal of Forest Engineering* 1998, 9(1): 47–53.
- Asikainen A, Ranta T, Laitila J (2001). Large-scale forest fuel procurement. In: Pelkonen, P., Hakkila, P., Karjalainen, T. & Schlamadinger, B. (Eds.). *Woody Biomass as an Energy Source. Challenges in Europe* EFI Proceedings 39: 71-78.
- ASINEL (1982). *La biomasa y sus aplicaciones energéticas*. Madrid
- Asner GP, Powell GVN, Mascaró J, Knapp DE, Clark JK, Jacobson J (2010). High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(38): 16738–16742.
- Assarsson A (1969). Some reactions during chip storage and how to control them. *Pulp and Paper Magazine of Canada* 1969, 70(18):74–79.
- AVEBIOM (2012a). Recomendaciones del sector de la bioenergía para generar empleo. I Bioenergy World Café. Disponible en <http://www.ambientum.com/pdf/recomendaciones-sector-bioenergia-y-empleo.pdf>
- AVEBIOM (2012b). Rotunda contribución de la biomasa al crecimiento de España. Conecta Bioenergía Valladolid, 22-24 de Octubre 2012.
- AVEBIOM (2014). Se dispara el consumo de biomasa para uso térmico en España. Conecta Bioenergía 1ª Edición. Newsletter Junio 2014. Disponible en: [http://www.expobiomacom/index.cfm?id\\_menu=168023734&id\\_submenu=10673&id\\_idioma=ES](http://www.expobiomacom/index.cfm?id_menu=168023734&id_submenu=10673&id_idioma=ES)
- AVEN (2000). Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2001-2010. Conselleria de Indústria, Comerç i Energía. Disponible en: [http://energia.ivace.es/attachments/004\\_ahorro\\_eficiencia\\_resumen.pdf](http://energia.ivace.es/attachments/004_ahorro_eficiencia_resumen.pdf)
- AVEN (2011). Situación de la Biomasa Energética en la Comunitat Valenciana: Estado Actual y Futuro. Agencia Valenciana de la Energía. Ponencia de Joaquín Mas en Conferencia PROFORBIOMED, 17 de noviembre de 2011. Valencia.
- Ayres RU, (1978). *Resources, Environment and Economics: Applications of the Materials/Energy Balance Principle*. New York, New York, USA

- Bacher M (1999). Literaturstudie Bestandesschäden. FVA Baden-Württemberg, Abteilung Arbeitswirtschaft und Forstbenutzung, Versuchsbericht 6: 1-11.
- Back EL (2008). The bonding mechanism in hardboard manufacture, *Holzforschung* 41 (1987) 247-258.
- Bäfver L, Renström C (2013). Fraction distribution as a quality parameter of energy wood, from the perspective of combined heat and power plants and heating plants. Arbetsrapport. Skogforsk.
- Baraza C, Merino H (2009). Ensayos y resultado del aprovechamiento de biomasa forestal en las masas forestales de las comarcas turolenses de Gúdar-Javalambre y Maestrazgo. Presentación oral en el 5º Congreso Forestal Español, Ávila.
- Behjou FK, Majnounian B, Dvorak J, Namiranian M, Saeed A, Feghhi J (2009). Productivity and cost of manual felling with chainsaw in Caspian forests. *J Forest Sci.* 55(2):96-100.
- Beltrán RS (2012). Comunicación oral. Junta de Extremadura.
- Bergen K, Colwell J, Sapio F (2000). Remote sensing and forestry: collaborative implementation for a new century of Forest information solutions. *Journal of Forestry*, 98(6): 4-9.
- Biomass Energy Center (2011). Combustion of biomass fuels. Disponible en: [http://www.biomassenergycentre.org.uk/portal/page?\\_pageid=77,103200&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](http://www.biomassenergycentre.org.uk/portal/page?_pageid=77,103200&_dad=portal&_schema=PORTAL)
- Biomass Energy Resource Center (2006). Wood chip fuel specifications and procurement strategies for New Mexico s.l.: Biomass Energy Resource Center.
- Bjöherden R, Thompson J (2000). An international nomenclature for forest work study. Finland 190-215p.
- Björheden R (1991). Basic time concepts for international comparisons of time study reports. *Journal of Forest Engineering* 2(2):33-39.
- Bracmort K, Gorte RW (2012). Biomass: Comparison of Definitions in Legislation Through the 111th Congress. Washington D.C. UNT Digital Library.
- Bradfield J, Levi MP (1984). Effects of species and wood bark ratio on pelleting of southern woods. *Forest Products Journal* 34: 61-63.
- Bradfield J, Levi MP, (1984). Effect of species and wood to bark ratio on pelleting of southern woods. *Forest Products Journal*, 34: 61-3.
- Brand MA, Bolzon de Muñiz GI, Ferreira Quirino W, Britod JO (2011). Storage as a tool to improve Wood fuel quality. *Biomass and Bioenergy* 35 (7): 2581-2588.
- Brandel G (1990). Volume functions for individual trees. Scots pine, Norway spruce and birch Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Yield Research, Garpenberg, 183 pp.
- Brock SM, Jones KD, Miller G (1986). Felling and skidding costs associated with thinning a commercial appalachian hardwood stand in Northern West Virginia N.JAF. 3:159-163.

- 
- Brünig EF, Mayer H, (1980). Waldbauliche terminologie. IUFRO Gruppe Ökosystem. Institut für Waldbau, Universität für Bodenkultur. Wien.
- Burgers JA, (2002). Soil and long-term site productivity values. In: Richardson, J, R. Björheden, P.Hakkila, AT. Lowe, CT. Smith, 2002 Bioenergy from Sustainable Forestry – Guiding Principles and Practice. Kluwer, The Netherlands.
- Bush T, Mergner S, Lechner H (2012). Global Pellet Demand Rises. Pöyry Management-Consulting Canadian Biomass. March-April 2012. Disponible en: [http://www.canadianbiomassmagazine.ca/index.php?option=com\\_content&task=view&id=3253&Itemid=132](http://www.canadianbiomassmagazine.ca/index.php?option=com_content&task=view&id=3253&Itemid=132)
- Butora A, Schwager G (1986). Holzernteschäden in Durchforstungsbeständen. Eidgenössische Anstalt für das Forstliche Versuchswesen, Bericht Nr. 288. Birmendorf.
- Çalışkan E (2012). Productivity and cost analysis of manual felling and skidding in Oriental spruce (*Picea orientalis* L.) forests. Ann. Forest Res. 55(2):297-308.
- Camp A (2002). Damage to residual trees by four mechanized harvest systems operating in small-diameter, mixed-conifer forests on steep slopes in Northeastern Washington: a case study. Western Journal of Applied Forestry 17: 14–22.
- Camps M, Marcos F (2002). Los biocombustibles. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- Canadell J, Riba M, y Andrés P (1988). Biomass equations for *Quercus ilex* L. in the Montseny Massif, Northeastern Spain. Forestry. Vol. 61 (2): 138-147.
- Canga E, Prada M, Majada J (2009a). Rendimientos y costes en un aprovechamiento de biomasa en un pinar de Asturias (Norte de España). Presentación oral en el II Congreso de Agroingeniería, Lugo.
- Canga E, Prada M, Majada J (2009b). Modelización de la biomasa arbórea y evaluación de rendimientos y costes en una clara de *Pinus pinaster* para la obtención de biomasa en Asturias. Presentación oral en el 5º Congreso Forestal Español, Ávila.
- Cannell MGR (1982). World forest biomass and primary production data. Academic, London.
- Carrasco García. 2008. Plan de Aprovechamiento Energético de la biomasa en las comunidades del Bierzo y Laciana (León). Madrid: CIEMAT. Ministerio de Educación y Ciencia.
- Carreñas C (2004). Tratamientos selvícolas en Almería. Ciclo de conferencias sobre selvicultura Universidad de Huelva, 16 de abril de 2004.
- Castro M, Sánchez C, (1997). Biocombustibles. PROGENSA, Sevilla.
- CE (1997). Energía para el futuro: fuentes de energía Renovables. Libro Blanco para una Estrategia y un Plan de Acción Comunitario. Comisión Europea.
- CE (1997). Libro Blanco para una Estrategia Común y un Plan de Acción para las Energías Renovables.
- CE (2005). Plan de acción sobre la biomasa. Comunicación de la Comisión, de 7 de diciembre de 2005, [COM (2005) 628 final-Diario Oficial C 49 de 28.2.2006].

- CE (2006). Libro Verde de la Comisión [Comunicación de la Comisión, de 8 de marzo de 2006 COM (2006) 105 final]. «Estrategia europea para una energía sostenible, competitiva y segura» (no publicado en el Diario Oficial).
- CE (2007). Commission Decision of 18 July 2007 establishing guidelines for the monitoring and reporting of greenhouse gas emissions pursuant to Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council (notified under document number C(2007) 3416) (2007/589/EC) July 2007.
- CE (2013). EU Energy in Figures. Statistical Pocketbook 2013. Luxembourg: Publications Office of the European Union 2013. European Commission. 252 pp.
- CE (2013a). Overview of the Common Agriculture Policy reform 2014-2020. December 2013. Comisión Europea. Bruselas. Disponible en: [http://ec.europa.eu/agriculture/policy-perspectives/policy-briefs/05\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/agriculture/policy-perspectives/policy-briefs/05_en.pdf)
- CE (2013b). A new EU Forest Strategy: for forests and the forest-based sector. Communication from the Commission (20.9.2013) to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Comisión Europea. Bruselas.
- CE (2014). Biomass Potential. Agriculture and Rural Development. European Commission. Bruselas. Disponible en: [http://ec.europa.eu/agriculture/bioenergy/potential/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/agriculture/bioenergy/potential/index_en.htm)
- CE (2014). Biomass potential. Bioenergy. Agriculture and rural development. Comisión Europea. Bruselas. Disponible en [http://ec.europa.eu/agriculture/bioenergy/potential/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/agriculture/bioenergy/potential/index_en.htm)
- Cerdá E (2012). La biomasa en España: una fuente de energía renovable con gran futuro. Fundación Ideas. 72 p.
- Chen PYS, Haygreen JG, Graham MA (1989). An evaluation of wood/coal pellets made in a laboratory pelletizer. Forest Products Journal 39:53-58.
- CIRCE (2006). Evaluación del potencial de biomasa residual en los ecosistemas forestales y los medios agrícolas en la provincia de Huesca. Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos. 37p.
- Clark JH (2007). Perspective Green Chemistry for the second generation biorefinery sustainable chemical manufacturing based on biomass. J Chem Technol Biotechnol, 82: 603.
- Clark P (2015). La caída del precio del petróleo amenaza a los biocombustibles. Sección Financial Times. Disponible en: [www.cronista.com](http://www.cronista.com)
- Coates E (2012). An evaluation of wood fuel production parameters from Irish Sitka spruce first thinnings. PhD thesis, Waterford Institute of Technology.
- Colegio de Ingenieros de Montes (2004). Cuadro de Precios Unitarios de la Actividad Forestal. Edición 2004.
- CONAMA (2010). Situación actual de la biomasa y tendencias de futuro. Documento del Grupo de Trabajo nº 24 de CONAMA 10. 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)

- Curran PJ, Dungan JL y Gholz HL (1992). Seasonal LAI in Slash Pine Estimated with Landsat TM, Remote Sensing of Environment , 35: 279-298.
- Danielsson B (1999). En marknadsgenomg Tang frTan SPG Proceedings of the conference: Pellets 99. Stockholm: SVEBIO, 1999.
- De La Mata A (1997). Aplicación de la tecnología GP.S. al cálculo del rendimiento de la maquinaria. I Congreso Forestal Hispano Luso. II Congreso Forestal Español. Pamplona.
- Delgado JB, Giraldo GA (1995). Energy possibilities from forest residues in the region of Castilla y León in Spain. Biomass and Bioenergy 8: 21-28.
- Delgado R, Galiana F, Gil A (2011). Inventari forestal. Universitat Politècnica de València
- Desrochers L, Puttock D, Ryans M (1993). The economics of chipping logging residues at roadside: A study of three systems. Biomass and Bioenergy, 5: 401-411.
- Di Blasi C, Tanzi V, Lanzetta M (1997). A study on the production of agricultural residues in Italy. Biomass & Bioenergy 12 (5): 321-331.
- Dias J, Azevedo JLT. (2002). Evaluation of biomass residual in Portugal mainland. Proceedings of the Conference on New and Renewable Energy Technologies for Sustainable Development, 24-26 June 2002, Ponta Delgada, Azores, Portugal, 215-228 pp.
- Dibdiakova J, GjølsjØ S, Wang L (2014). Solid biofuels from forest biofuels specification and quality assurance Report from Skog og Landskap 8/2014. Norwegian and Forest Landscape Institute.
- Diputació de Barcelona (2009). Plan Estratégico de Biomasa Forestal de la ADF Montseny  
Ponent 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)
- Diputación de Cádiz (2012). Análisis del potencial de biomasa de la Provincia de Cádiz con fines energéticos. Proyecto Timber.
- Dixon RK, Brown S, Houghton RA, Solomon AM, Trexler MC, Wisniewski J (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. Science 263: 185-190.
- Dobson MC (2000). Forest Information from Synthetic Aperture Radar. Journal of Forestry 98 (6): 41-43.
- Dong J, Kaufmann RK, Myneni RB, Tucher CJ, Kauppi P, Liski J, Buermann W, Alexeyev V, Hughes MK (2003). Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: Carbon pools, sources and sinks. Remote Sensing of Environment, 84: 393-410.
- Dopazo-Amoedo R, Vega-Nieva DJ, Ortiz-Torres L, Martínez-Chamorro E (2009). El aprovechamiento de biomasa residual y de cultivos energéticos: experiencias recientes y modelos de producción de biomasa forestal en montes gallegos. 5ª Conferencia Forestal Española. Montes y Sociedad: Saber qué hacer. Sociedad Española de Ciencias Forestales. 21-25 septiembre 2009, Ávila.

- Drake JB, Dubayah RO, Knox RG, Clark DB, Blair JB (2002). Sensitivity of large-footprint lidar to canopy structure and biomass in a neotropical rainforest. *Remote Sensing of Environment* 81: 378–392.
- Dubayah RO, Sheldon SL, Clark DB, Hofton MA, Blair JB, Hurtt GC (2010). Estimation of tropical forest height and biomass dynamics using lidar remote sensing at La Selva, Costa Rica *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 115.
- E4 (2008). Plan de Acción de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética 2008-2012. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Ministerio de Industria, Energía y Turismo. Madrid.
- EEA (2006). How much energy can Europe produce without harming the environment? Report N°7/2006. Environmental Energy Agency. Copenhagen, Denmark. 67 p. I
- Egan AF (1999). Residual stand damage after shovel logging and conventional ground skidding in an Appalachian hardwood stand. *Forest Prod. J* 49(6):88-92.
- Eklundh L, Hall K, Eriksson H, Ardö J, Pilesjö P (2001). Investigating the use of Landsat thematic mapper data for estimation of forest leaf area index in southern Sweden. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(3): 349-362.
- Eliasson L, von Hofsten H, Spinelli R, Johannesson T (2014). Effects of sieve size on chipper productivity, fuel consumption and chip size distribution for open drum chippers. 5th Forest Engineering Conference together with the 47th International Symposium on Forestry Mechanisation FEC/FORMEC-201: “Propelling the forest value chain”. Gerardmer 23-26 september 2014.
- ENCE (2011). Nota de prensa [http://cincodias.com/cincodias/2011/12/30/empresas/1325255994\\_850215.html](http://cincodias.com/cincodias/2011/12/30/empresas/1325255994_850215.html)
- ENERSILVA (2007). Promoción del uso de la biomasa forestal con fines energéticos en el Suroeste de Europa (2004-2007). Proyecto Enersilva. 44 p.
- 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)
- EPA (2012). Report to Congress on Black Carbon. Department of the Interior, Environment, and Related Agencies Appropriations Act. USA. Environmental Protection Agency, USA. Disponible en: <http://www.epa.gov/blackcarbon/2012report/Cover.pdf>
- E.PRESS VALENCIA (2014). La Generalitat ha ordenado ya 97.000 ha de monte público. Nota de prensa publicada el 28.08.2014. Levante EMV. Valencia.
- Eriksson P (2000). SkogForsk review of systems for logging residues handling in Sweden. *New Zealand Journal of Forestry Science* 30(1/2): 88–93.
- Esteban LS, Carrasco J (2001). Evaluation of crown biomass production in thinnings of cluster pine (*Pinus pinaster* Ait.) in the Spanish northern plateau. First World Conference on Biomass for Energy and Industry. Ed by Kyritsis, AA, et al. Vol. II, 2002-2005.



- Esteban LS, García R, Cabezón R, Carrasco J (2007). Plan de aprovechamiento energético de la biomasa en las comarcas de El Bierzo y Laciana (León). CEDER - CIEMAT. 125 p.
- Esteban L.S, García R, Carrasco, J. (2008). Biomass Resources and Costs in Spain and Southern EU Countries. Towards a Common Methodology and Assessment.. En Schmid, J., Grimm, H.P., Helm, P. y Grassi, A. (Ed.): Proceedings of the 16th European Biomass Conference and Exhibition. Florence, ETA-Renewable Energies.
- EUBIONET II (2006). Current situation and future trends in biomass fuel trade in Europe. Country report Spain-Andalusia. Intelligent Energy Europe.
- EUBIONET II (2007). Biomass fuel trade in Europe Summary Report VTT-R-03508-07. Intelligent Energy Europe.
- Eurobserv'er (2011). Solid Biomass Barometer. Comisión Europea. Consultado 22 mayo 2012. Disponible en <http://www.eurobserv-er.org/downloads.asp>
- EUSKADI FORESTAL (2006). Biomasa forestal: de residuo a recurso aprovechable. N<sup>o</sup> Abril 2006. 22-25 pp.
- Factor Pelet (2010). Precios de los pellets. Comunicación oral. Factor Pelet sl. Madrid.
- Fang JY, Wang ZM (2001). Forest biomass estimation at regional and global levels, with special reference to China's forest biomass. Ecol. Res. 16, 587-592.
- FAO (1997). The role of wood energy in Europe and OECD, WETT- Wood Energy Today for Tomorrow. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma: FOPW, Forestry Department.
- FAO (2000). Forest Resources of Europe, CIS, North America, Australia, Japan and New Zealand (industrialized temperate/boreal countries), UN-ECE/FAO Contribution to the Global Forest Resources Assessment 2000, Main Report United Nations, New York, Geneva.
- FAO (2001). Global forest resource assessment 2000. FAO Forestry Paper 140. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma.
- FAO (2003). WISDOM, Wood Integrated Supply/Demand Overview Mapping. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma.
- FAO (2010a). Criteria and indicators for sustainable woodfuels. FAO Forestry Paper N<sup>o</sup> 160. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma. 103 p.
- FAO (2010b). Global Forest Resource Assessment 2010. Main Report. FAO Forestry Paper 163. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma.
- FAO (2011). Joint Wood Energy Enquiry. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponible en: <http://www.unece.org/forests/jwee.html>
- FAO (2012). Comité forestal, 21<sup>o</sup> período de sesiones. Resultado de Río+20 en medidas prácticas dendroenergía para un futuro sostenible. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma.
- FAO (2013). Wood energy. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponible en: <http://www.fao.org/forestry/energy/en/>

- FAO (2014). State of the World's forests. Enhancing the socioeconomic benefits from forests. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma.
- FAOSTAT (2012). Estadísticas FAO por país. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponible en <http://faostat.fao.org>
- Fazakas Z, Nilsson M, Olsson H (1999). Regional forest biomass and wood volume estimation using satellite data and ancillary data Agricultural and Forest Meteorology, 98-99: 417-425.
- Fengel D, Wegener G (1984). Wood-chemistry, ultrastructure, reactions. Walter de Gruyter, Berlin and New York.
- Fernández J (2009). Biocombustibles sólidos modernos: Producción y aplicaciones. Hojas divulgadoras num 2128. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino.
- Fernández-Manso O, Fernández-Manso A, Quintano C (2014). Estimation of aboveground biomass in Mediterranean forests by statistical modelling of ASTER fraction images. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 31: 45-56.
- Fernández-Puratich H, (2012). Valoración integral de la biomasa leñosa agroforestal a lo largo del gradiente altitudinal en condiciones mediterráneas. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València.
- FESERMAGA (2003). Análisis de la posibilidad de las principales especies maderables gallegas. Federación empresarial de Serradores e Rematantes de Madeiras de Galicia.
- Filbakk T, Jirjis R, Nurmi J, Høibø O (2011). The effect of bark content on quality parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) pellets, Biomass and Bioenergy 35 (2011) 3342-3349.
- Finell M, Arshadi M, Gref R, Scherzer T, Knolle W, Lestander T (2008). Laboratory-scale production of biofuel pellets from electron beam treated Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) sawdust. Radiation Physics and Chemistry, 78: 281-287.
- Fisher J, Jackson S, Biewald B (2012). The Carbon Footprint of Electricity from Biomass A Review of the Current State of Science and Policy. Synapse Energy Economics. Massachusetts, USA 65 pp.
- Foddy GM, Boyd DS, Cutler M (2003). Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. Remote Sensing of Environment, 85: 463-474.
- Folkema MP (1977). Whole-Tree Chipping with the Morbark Model 22 Chipharvestor. Forest Engineering Research Institute of Canada, Pointe Claire and Vancouver.
- FORESTA (2011). La biomasa forestal: una oportunidad social, ambiental y económica El gobierno dispara contra las energías renovables. Asociación y Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Forestales nº53.
- Forestal Maestrazgo (2013). Especificaciones de requisitos de calidad y precio de venta de las astillas. Comunicación oral. Forestal Maestrazgo s.l.
- Forestry Commission (1974). Forest Record Terrain Classification 114 pp. UK.

- 
- Francescato V, Antonini E, Mezzalana G (2004). L'energia del legno. Nozioni, concetti e numeri di base. Regione Piemonte.
- Francescato V, Antonini E, Zuccoli-Bergomi, L (2008). Wood Fuels Handbook. Production, quality requirements, trading. AEBIOM AIEL. Italian Agriforestry Energy Association.
- Frühwald A (2007). Technologies and Economics of Energy Generation from logging residues and wood processing waste, International Conference on Wood-based Bioenergy, Hannover.
- Garañeda RJ, Bengoa L. (2005) «Estudio de disponibilidad de biomasa en seis zonas de Castilla y León», en S.E.C.F. (Ed.): La ciencia forestal: respuestas para la sostenibilidad. 4º Congreso Forestal Español. Zaragoza, Sociedad Española de Ciencias.
- García-Martín A, Pérez-Cabello F, De la Riva-Fernández J (2006). Evaluación de los recursos de biomasa forestal residual mediante imágenes satélite Landsat y SIG Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica. GeoFocus (artículos), nº 6, pp.205-230.
- Gautam SH, Pulkki RE, Shahi C, Leitch M (2012). Fuel quality changes in full tree logging residue during storage in roadside slash piles in northwestern Ontario. Journal of Biomass and Bioenergy 42: 43-50.
- Ghaffarian MR, Naghdi R, Ghajar I, Nikooy M (2012). Time prediction models and cost evaluation of cut-to-length (MADERA CORTA) harvesting method in a mountainous forest. Small Scale Forestry DOI 10.1007/s11842-012-9204-4.
- Ghaffarian MR, Shobani H (2007). Cost production study of motor-manually felling and processing of logs. Forest Sci. 3:69-76.
- Ghaffariyan MR, Acuna M, Brown M (2014). Biomass harvesting resimurphyue supply chain optimisation and verifying the effect of major parameters affecting the supply chain cost in Western Australia. AFORA, University of the Sunshine Coast. 5th Forest Engineering Conference together with the 47th International Symposium on Forestry Mechanisation. FEC/FORMEC-201: "Propelling the forest value chain". Gerardmer 23-26 September 2014.
- Gingras JF (1994). A comparison of full-tree versus cut-to-length systems in the Manitoba model forest. SR-92. Forest Eng. Inst. of Canada, Pointe-Claire, Quebec, Canada. 16 pp.
- Goetz S (2000). Recent advances in remote sensing of biophysical variables. An overview of the special issue. Remote Sensing of Environment, 79 pp. 145-146.
- Gómez Mampaso V (1992). Maquinaria forestal. Rendimientos-costos. Curso agro forestal 1992/93. Inédito.
- González I (1988). Tablas ponderales para la estimación de la biomasa de rebollo (*Quercus pyrenaica* Willd.) en la provincia de León. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Serie Recursos naturales, 50, 56 pp. Madrid.
- González Molina (2005). Introducción a la selvicultura. Universidad de León, Secretariado de Publicaciones, 2005. 309 p.

- González Moreno J (2000). Estudio de rendimientos del tratamiento de residuos forestales en Sierra de Filabres (Almería). EU.I.T. Forestal (no publicado).
- Goulding CJ, Twaddle A (1990). Harvesting whole trees with processing and log allocation (in the forest) to conventional and energy products. *Biomass* 22: 145–158.
- Gracia CA, Ibañez JJ, Vayreda J, Pons X, Terradas J (Eds.) (1997). Un nuevo concepto de inventario forestal. XI World Forestry Congress, Antalya, 1.
- Grover PD, Mishra SK, (1996). Biomass briquetting: technology and practices. Regional wood energy development program in Asia, field document nº 46. Bangkok, Thailand: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Haarlas R, Harstela P, Mikkonen E, Mäkelä J (1984). Metsätyöntutkimus. Helsingin yliopiston metsäteknologian laitoksen tiedonantoja 46:50 pp.
- Hakkila P (1962). Polttopuuhakkeen kuivuminen metsässä (Forest seasoning of wood intended for fuel chips) *Communications Instituti Forestalis Fennicae* 54-4
- Hakkila P (1989). Utilization of residual forest biomass. Springer Series in wood Science. Helsinki: Springer-Verlag.
- Hakkila P (1991). Crown mass of trees at the harvesting phase. *Folia For.* 773: 1–24.
- Hakkila P (2002). Operations with reduced environmental impact. In: Richardson, J, R. Björheden, P.Hakkila, AT. Lowe, CT. Smith. *Bioenergy from Sustainable Forestry – Guiding Principles and Practice* Kluwer, The Netherlands.
- Hakkila P (2004). Developing technology for large scale production of forest chips. Wood Energy Technology Programme 1999-2003. Technology Programme report 6/2004. Final report. Helsinki. 99 pp.
- Hakkila P, Kalaja H (1983). Puuja kuorituksen palauttamisen tekniikka. Summary: The technique of recycling wood and bark ash. *Folia Forestalia* 552. 37 s.
- Hall P (2003). Sustainable production of Woody biomass for energy. XII World Forest Congress, 2003, Québec City, Canadá. (inédito).
- Hall P, Gigler JK, Sims REH (2001). Delivery systems of forest arisings for energy production in New Zealand. *Biomass and Bioenergy* 21: 391–399.
- Han HS, Lee HW, Johnson LR (2004). Economic feasibility of an integrated harvesting system for small-diameter trees in southwest Idaho *Forest Prod. J* 54(2):21-27.
- Harstela P (1993). Forest work science and technology, Part I. *Silva Carelica* 25. 113 p.
- Hartsough BR, Drews ES, McNeel FJ, Durston TA, Stokes BJ (1997). Comparison of mechanized systems for thinning ponderosa pine and mixed conifer stands. *For. Prod. J* 47(12):59-68.
- Heding N (1999). Energy woods from forests and plantations. IEA Bioenergy Task 18 Technical Notes 1: 10–11.
- Heikkilä J, Laitila J, Tanttu V, Jari Lindblad J, Sirén M, Asikainen A (2006). Harvesting alternatives and cost factors of delimbed energy wood. *Forestry Studies| Metsanduslikud Uurimused* 45: 49–56pp.

- 
- Heikkilä J, Sirén M, Aijälä O (2007). Management alternatives of energy wood thinning stands. *For. Ecol. Manage.* 31: 255-266.
- Hohle AME (2010). Energy consumption by energy wood supply. OSCAR Conference in Forest Operation Research in the Nordic Baltic Region, October 20-22, Honne, Norway.
- Huang J (2014). Low ash content bio-materials for pellet plant. Disponible en: <http://www.biofuelmachines.com/Low-ash-content-bio-materials-for-pellet-plant.html>
- Hudson B, Hudson B (1999). Technical developments in wood fuel harvesting. *Proceedings of the 1st Forest Engineering Conference: Harvesting.* 7 pp.
- Hudson B, Hudson B (2000). Wood fuel supply chain in The United Kingdom. *New Zealand Journal of Forestry Science* 30(1/2): 94–107.
- Hudson JB (1995). Integrated harvesting systems. *Biomass and bioenergy* 9 (1-5): 141-151.
- Hunter A, Boyd J, Palmer H, Allen J, Browne M (1999). Transport of forest residues to power stations. *Proceedings of the 1st Forest Engineering Conference: Harvesting,* 9 pp.
- IDAE (1999). Plan de Fomento de las Energías Renovables en España. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Madrid.
- IDAE (2007). Energía de la biomasa. Manuales de energías renovables 2. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Madrid.
- IDAE (2008). Biomasa. Experiencias con biomasa agrícola y forestal para uso energético. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Madrid.
- IDAE (2010). Plan de Acción Nacional de Energías Renovables de España 2011-2020. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Madrid.
- IDAE (2011a). Plan de energías renovables 2011-2020. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Ministerio de Industria y Energía. Madrid. 824 pp.
- IDAE (2011b). Análisis del consumo energético del sector residencial en España. Secretaría General Departamento de Planificación y Estudios. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Ministerio de Industria y Energía. Madrid. 76 pp.
- IDAE, Aranzada GF, Argongra-ETSI de Montes, ITG Agrícola (2011). Evaluación del potencial de energía de la biomasa. Estudio Técnico PER 2011-2020. Ministerio de Industria y Energía. Madrid.
- IEA (2004). Biofuels for Transport: An International Perspective. International Energy Agency. 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 (2011). Clean energy progress report. International Energy Agency. Paris, Francia. OECD/IEA 72 p.
- IEA (2013). IEA statistics. International Energy Agency. <http://www.iea.org/statistics/>

- IFN2 (1996). Segundo Inventario Forestal Nacional Español. Ministerio de Agricultura. Gobierno de España.
- IFN3 (2008). Tercer Inventario Forestal Nacional Español. Ministerio de Agricultura. Gobierno de España.
- ILO (1979). Introduction to work study. Third edition. International Labour Office, Geneva. 442 p.
- Innova Ingeniería (2011). Comunicación oral e imágenes. Innova Ingeniería s.l. Disponible en: <http://www.innova-ing.com/tratamiento-de-granos/ver/enfriadores>
- INTI (2008). Pellets de madera para usos energéticos. Saber Cómo nº 60. Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Argentina. Disponible en: <http://www.inti.gob.ar/sabercomo/sc60/inti9.php>
- IPCC (1996). Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático(Intergovernmental Panel on Climate Change): Tecnologías, políticas y medidas para mitigar el cambio climático. Disponible en <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/srtp-sp.pdf>
- IPCC (2006). Guidelines for National Greenhouse Inventories. Agriculture, Forestry and Other Land Use, Intergovernmental Panel of Climate Change, Japan.
- IPCC (2007). Intergovernmental Panel on Climate Change, Mitigation of Climate Change. Working group III, Chapter 4 of the 4th Assessment report. Intergovernmental Panel of Climate Change. Disponible en <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4-wg3-chapter4.pdf>
- IVACE (2013). Estratègia Energètica de la Comunitat Valenciana 2014-2020. Generalitat Valenciana. Disponible en: <http://www.chap.gva.es/documents/599445/1412062/Foro+Crecimiento+Sostenible.IVACEpdf/8279c207-74fd-4dfb-9ec9-e5bdfc34af37>
- Jamil JM (2012). Anàlisi de gestió, aprofitament i valorització integral de biomassa residual generada en les zones verdes de la ciutat de València. Trabajo Final de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. 82 p.
- Jenkins JC, Chojnacky DC, Heath LS, Birdsey R (2004). Comprehensive database of diameter-based biomass regressions for North American tree species. United States Department of Agriculture, Forest Service, General technical report NE-319: 1-45.
- Joanati, Rodríguez, Vayreda (2001). Pla de Biomassa, Àmbit Forestal. Conveni de col.laboració entre el Centre de Recerca Ecològica i Recursos Forestals (CREAF), el Centre Tecnològic Forestal de Catalunya (CTFC) i l'Institut Català de l'energia. Generalitat de Catalunya, Departament d'Indústria, Comerç i Turisme.
- Johnson DM, Jenkins TL, Fengli Z (2012). Methods for optimally locating a forest biomass-to-biofuel facility. Biofuels 3(4): 489-503.
- Johnson WC, Sharpe DM (1983). The ratio of total to merchantable forest biomass and its application to the global carbon budget. Can. J For. Res. 1: 372-383.

- 
- Joosten R, Schumacher J, Wirth C, Schulte A (2004). Evaluating tree carbon predictions for beech (*Fagus sylvatica* L.) in western Germany. *For. Ecol. Manage.* 189:87–96
- Kaliyan N, Morey RV (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and bioenergy* 33: 337-359.
- Kallio M, Leinonen A (2005). Production Technology of Forest Chips in Finland. Project Report PRO2/P2032/05. Ed. VTT Processes. Helsinki.
- Kamm B, Kamm M (2004). Principles of biorefineries. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 64:137-145.
- Kärhä K (2007). Machinery for forest chip production in Finland in 2007. Metsäteho OY Research Results. Helsinki.
- Kärhä K, Jouhio A, Mutikainen A, Mattila S (2009). Mechanized energy wood harvesting from early thinnings. *Jour. For. Engine* 16(1): 15-25.
- Kariniemi A (2003). Metsäkonetyön ymmärtäminen uuteen aikakauteen. *Metsäteho* 2/03: 4–5.
- Karjalainen T, Kellomäki S (1996). Greenhouse gas inventory for land use changes and forestry in Finland based on international guidelines. *Mitigation Adapt. Strategies Global Climate* 1: 51–71.
- Kauppi PE, Mielikäinen K, Kuusela K (1992). Biomass and carbon budget of European forests, 1971–1990. *Science* 256: 70–74.
- Kellogg L, Bettinger P, Robe S, Steffert A (1992). Mechanized harvesting: A compendium of research. Forest Res. Lab., Oregon State Univ, Corvallis, Oregon. 401 pp.
- Kellogg LD, Spong B (2004). Production and costs of cut-to-length thinning: Experience from the Willamette young stand project. Forest Res. Lab., Oregon State Univ, Corvallis, Oregon. 23 pp.
- Ketterings QM, Coe R, Van Noordwijk M, Ambagau Y, Palm CA (2001). Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting aboveground biomass in mixed secondary forests. *For. Ecol. Manage* 146: 199-209.
- Klass DL (1998). Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals. Academic Press, San Diego.
- Kluender RA, Stokes BJ (1996). Felling and skidding productivity and harvesting cost in Souttiet pine forests. In: CWF/IUFRO Conference, WSI 3423.
- Kofman PD, Kent T (2007). Harvesting and processing forest biomass for energy production in Ireland - The ForestEnergy 2006 programme. COFORD, National Council for Forest Research and Development, Dublin.
- 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. 676 pp.

- Korhonen K, Maltamo M (1990). Männyn maanpäällisten osien kuivamassat Etelä-Suomessa. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja, Joensuun tutkimusasema 371, pp. 1–29 (Appendix 12).
- Korpilahti A (1998). Finnish forest energy systems and CO<sub>2</sub> consequences. *Biomass and Bioenergy*, 15: 293–297.
- Kraxner F, Nilsson S, Obersteiner M (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.
- Kuiper L, Oldenburger J (2006). The harvest of forest residues in Europe. Report on bus ticket n° D15A Biomassa-upstream Stuurgroep. Probos. Disponible en <http://www.biomassa-upstream.nl/pdf/reportBUSD15A.pdf>
- Kuptz D, Hartmann H (2014). Energy efficient production of high quality wood chips using energy round wood. 5th Forest Engineering Conference together with the 47th International Symposium on Forestry.
- Laasasenaho J (1982). Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. *Commun. Inst. For. Fenn.* 108: 1–74.
- Laina R, Tolosana E, Martínez-Ferrari R (2008). Whole Tree Chipping Systems in Coppice Natural Stands and Young Pine Plantations in Castilla y Leon (Central Spain). Presentación oral. World Bioenergy Congress. Estocolmo.
- Laitakari E (1935). Koivun juuristo (The root system of birch). *Acta For. Fenn.* 41: 1–168.
- Laitat E, Karjalainen T, Loustau D, Lindner M (2000). Towards an integrated scientific approach for carbon accounting in forestry. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 4, 241–251.
- Laitat E, Lebègue C, Perrin D, Pissart G (2003). Séquestration du carbone par les forêts selon l'affectation des terres. *Ministre de l'Agriculture et de la Ruralité, Ministère de la Région Wallonne, Division de la Nature et des Forêts, FuSa. Gxp.*
- Laitila J (2005). Cost Structure of Supply Chains in Finland. Northern Woodheat Symposium. Joensuu, Finland. 23 pp.
- Laitila J, Heikkilä P, Anttila (2010). Harvesting Alternatives, Accumulation and Procurement Cost of Small-Diameter Thinning Wood for Fuel in Central Finland. *Silva Fennica* 44 (3):465–480
- Laitinen T, Föhr J, Karttunen K, Immonen M, Ranta T (2014). Container logistic innovations in forest-energy sector: Markets, future service concepts and technical Improvements. LUT Scientific and Expertise Publications Raportit ja selvitykset – Reports, 28.
- Lamers P, Junginger M, Hamelinck M, Faaij A (2012). Developments in international solid biofuel trade—An analysis of volumes, policies, and market factors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 3176–3199.
- Lanford B, Stokes B (1996). Comparison of two thinning systems. Part 2. Productivity and costs. *Forest Products Journal* 46: 47–53



- 
- Lanford BL, Stokes BJ (1996). Comparison of two thinning systems, Part 2: Productivity and costs. *Forest Prod. J* 46(12):47-53.
- LeDoux CB, Huyler NK (2001). Comparison of two cut-to-length harvesting systems operating in eastern hardwoods. *Inter. J of Forest Eng.* 12(1):53-59.
- Lefsky MA, Turner DP, Guzy M, Cohen WB (2005). Combining lidar estimates of aboveground biomass and Landsat estimates of stand age for spatially extensive validation of modelled forest productivity. *Remote Sensing of Environment* 95:549–558.
- Lehtikangas P (2001). Quality properties of pelletized sawdust, logging residues and bark. *Biomass and Bioenergy* 20 (5): 351–360.
- Lehtonen A, Mäkipää R, Heikkinen J, Sievänen R, Liski J (2004) Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. *For. Ecol. Manage.* 188:211–224.
- Lestander TA, Finell M, Samuelsson R, Arshadi M, Thyrel M (2012). Industrial scale biofuel pellet production from blends of unbarked softwood and hardwood stems—the effects of raw material composition and moisture content on pellet quality. *Fuel Processing Technology* 95: 73–77.
- LIFE +07 Best4VarioUse (2012). Layman’s report. LIFE07ENV/D/000240. Disponible en: [http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=LIFE07\\_ENV\\_D\\_000240\\_LAYMAN.pdf](http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=LIFE07_ENV_D_000240_LAYMAN.pdf)
- LIFE +09 Bioenergy and Fire Prevention (2011). LIFE09 ENV/ES/000450. Disponible en: <http://bioenergy-project.eu/>
- Linerós M, Espinosa M, Jiménez A (2003). Daño a los árboles remanentes por sistema harvester-forwarder en raleo comercial de *Pinus radiata* D. Don. Bosque (Valdivia) [online]. 2003, vol.24, n.1, pp. 87-9 . Disponible en: [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0717-92002003000100007&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-92002003000100007&lng=es&nrm=iso)
- Liodakis S, Agiovlasis IP, Kakardakis T, Tzamtzis N, Vorisis D (2011). Determining hazard risk indices for Mediterranean forest species based on particle flammability properties. *Fire Safety Journal* 46 (3): 116–124
- Liski J, Kauppi P (2000). Carbon cycle and biomass. In: FAO (ed.). *Forest resources of Europe, CIS, North America, Australia, Japan and New Zealand (industrialized temperate/boreal countries)*. UN-ECE/FAO Contribution to the Global Forest Resources Assessment 2000, Main Report (in press). United Nations, New York and Geneva. p. 155–171.
- Liski J, Korotkov AV, Prins CFL, Karjalainen T, Victor DG, Kauppi PE (2002). Increased carbon sink in temperate and boreal forests. *Clim Chang.*
- López E, Ambrosio Y, Vignote (2006). Tiempos y rendimientos de dos sistemas de aprovechamiento de madera de *Populus* sp. En Castilla y León (España). *Ciencia Forestal de México*. Núm. 99. Vol. 39. 2006. Mexico.

- López I (2013). Forest biomass of the Mediterranean quality and end users. PROFORBIOMED. Disponible en: [http://proforbiomed.eu/sites/default/files/Forest\\_biomass\\_end\\_users.pdf](http://proforbiomed.eu/sites/default/files/Forest_biomass_end_users.pdf)
- Lortz D, Kluender L, McKoy W, Stokes B, Klepac J (1997). Manual felling time and productivity in southern pine forests. *Forest Prod. J* 47(10):59-63.
- Lu D, Mausel P, Brondízio E, Moran E (2004). Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin. *Forest Ecology and Management*, 198, pp. 149-167.
- Lundborg A (1997). Reducing the nitrogen load: Whole-tree harvesting. *Ambio* 26: 387–393.
- Lundborg A (1998). A sustainable forest fuel system in Sweden. *Biomass and Bioenergy* 15: 399–406.
- Madrigal J, Hernando C, Guijarro M (2012). El aprovechamiento energético de la biomasa forestal y la prevención de incendios. SELVIRED-FIRESMART. 23 noviembre 2011. INIA-CIFOR. 14 p.
- Magagnotti N, Spinelli R (2012) (Eds.). Good practice guidelines for biomass production studies. COST Action FP-0902. CNR-IVALSA 52 pag.
- MAGRAMA (2010). Avance Anuario de Estadística Forestal 2010. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid.
- Makkonen O (1954). Metsätöiden vertailevan aikatutkimuksen periaate Metsäteho, *Julkaisu* 32: 3–18. Helsinki.
- Malac BF (1976). The effect of whole-tree chipping on site preparation and regeneration. *TAPPI Journal* 59(7): 82– 84.
- Mallinis G, Koutsias N, Makras A, Karteris M (2004). Forest parameters estimation in a European Mediterranean landscape using remotely sensed data. *Forest Science*, 50, num 4. pp. 450-460.
- Manner J, Nordfjell T, Lindroos O (2013). Effects of the number of assortments and log concentration on time consumption for forwarding. *Silva Fennica* vol. 47 num. 4 article id 1030. 19 p.
- Manner J, Palmroth L, Nordfjell T, Lindroos O (2014). Forwarding work study with automatic data recording. FEC-FORMEC Conference proceedings. Gerardmer, 23-26th September, 2014.
- Mantau U et al. (2010). EUwood - Real potential for changes in growth and use of EU forests. Final report. Hamburg/Germany, June 2010. 160 p
- Mantau, Steierer, Hetsch, Prins (2008) Wood resources availability and demands 2005 – Part I National and regional wood resource balances, Background paper to the UN-ECE/FAO. Workshop and wood balances. Geneva.
- Marcos F (2001). Biocombustibles sólidos de origen forestal. AENOR. Madrid.

- 
- Marinescu M, Bush T (2009) Wood to Energy: Use of the Forest Biomass for Wood Pellets. Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.
- Marklund LG (1988). Biomassafunktioner för tall, gran och björk i Sverige.
- MARM (2007). Estrategia Española para el desarrollo del uso de la biomasa forestal residual. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino .
- Martí E (2011). Estudio sobre el Aprovechamiento Integral de Biomasa Residual en Enguera. Trabajo Final de Carrera. Universidad Politécnica de Valencia. Gandía. 84 p.
- Martín Pinto A, Jiménez-Shaw C (2011). La biomasa forestal: factores necesarios para el despegue de este sector Revista Montes 106: 27-31.
- Martínez Fernández AB (2013). Aprovechamiento de leñas y maderas con fines energéticos en tres fincas privadas asociadas a PROFOMUR, entre los municipios de Caravaca de la Cruz y Cehegín en la Región de Murcia. Disponible en: [http://selvicultor.net/redfor/wp-content/uploads/3\\_Martinez\\_Phalepensis\\_Murcia\\_V2.pdf](http://selvicultor.net/redfor/wp-content/uploads/3_Martinez_Phalepensis_Murcia_V2.pdf)
- Martínez J, Oliver-Villanueva (2014). Territorio Forestal Valenciano, ahora o nunca. Boletín Informativo Bosc Valencia nº7 Mayo 2014. Plataforma Forestal Valenciana.
- Martínez S (2009). Evaluación de la biomasa como recurso energético renovable en Cataluña. Tesis doctoral. Universitat de Girona
- Martínez-Abarca B (2013). Estudio: cantidad y costes de aprovechamiento de la biomasa existente en el T.M de Carcaixent y el estudio de viabilidad para la ejecución de una Planta de Biomasa. Trabajo Final de Carrera. Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Politécnica Superior de Gandía.
- Merino-García A (2008). Extracción de biomasa en los suelos forestales, principales variables a tener en cuenta para evitar la degradación del suelo. Actas de la II Reunión sobre Suelos Forestales. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 25: 23-32.
- Meuleman B, Kuiper L, Nabuurs GJ (2005). Effect: EU forest for renewable energy to mitigate climate, Ecofys, Utrecht.
- MFE (2007). Mapa Forestal de España. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de España. Madrid.
- Mickler RA, Earnhardt TS, Moore JA (2002). Regional estimation of current and future biomass. Environmental Pollution, 116, pp. S7-S16.
- Misra S, Attree SM, Leal I, Fowke LC (1993). Effect of Abscisic Acid, Osmoticum, and Desiccation on Synthesis of Storage Proteins during the Development of White Spruce Somatic Embryos. Annals of Botany 71(1): 11-22.
- MixBioPells (2011). Market implementation of extraordinary biomass pellets (2010-2012). Disponible en: <http://www.mixbiopells.eu>
- Miyata ES (1980). Determining fix and operating costs of logging equipment. US Department of Agriculture Forest Service, General Technical Report NC-55, 16p. U.S. Department of Agriculture Forest Service, North Central Forest Experiment Station, St. Paul, Minnesota.

- Miyata ES (1981). Logging system cost analysis. Comparison of methods used operating costs of logging equipment, U.S.D.A Forest Service, General Technical Report NC-55. St. Paul, Minnesota (USA).
- MMAMRM (2010). Estrategia Española para el desarrollo del uso energético de la biomasa forestal residual. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid.
- Moixent Forestal (2012). Tecnologías para el aprovechamiento de *Pinus*. Comunicación oral.
- Moglia JG, Giménez AM, Bravo S (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 N° 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.
- Montero G, Grau JM, Ruiz-Peinado R, Ortega CY, Cañellas I (2000). Tablas de producción para *Pinus halepensis* Mill. En: Abellanas B, Madrigal A y Orozco E (Eds.). Actas de la Reunión sobre Selvicultura del Pino Carrasco. SECF. Albacete, 28-30/9/1999. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 10:183-188.
- Montero G, Ruiz-Peinado R, Muñoz M (2005). Producción de biomasa y fijación de CO<sub>2</sub> por los bosques españoles. Monografías INIA: Serie Forestal, n°13. 270 pag. Madrid.
- Montes N, Gauquelin T, Badri W, Bertaudiere V, Zaoui EH (2000). A non-destructive method for estimating above-ground forest biomass in threat-ened woodlands. *Forest Ecology and Management* 130: 37-46.
- Morey J (1975). Conservation and economical harvesting of wood fiber by using the whole tree *TAPPI Journal* 1975, 58(5):94-97.
- Mousavi R, Nikouy M, Uusitalo J (2011). Time consumption, productivity and cost analysis of the motor manual tree felling and processing in the Hycarnian Forest of Iran. *J. Forest. Res.* 22(4):665-669.
- Murphy G (2005). Determining sample size for harvesting cost estimation. *New Zealand Journal of Forestry Science* 35: 166-169.
- Musselman K, Hocker Jr. HW (1981). Caloric values of eight New Hampshire forest tree species. *Canadian Journal of Forest Research* 11: 409-12.
- Muukkonen P, Heiskanen J (2005). Estimating biomass for boreal Forest using ASTER satellite data combined with standwise forest inventory data. *Remote Sensing of Environment*, 99, pp. 434-447.
- Nielsen, N.P.K., D. Gardner, J, and C Felby, (2010), "Effect of extractives and storage on the pelletizing process of sawdust", *Fuel*, 89: p. 94-98.
- Nilsson D, Bernesson S. Pelletering och brikettering av jordbruksråvaror e en systemstudie [Processing biofuels from farm raw materials e a systems study]. Report 001. Uppsala, Sweden: Department of Energy and Technology, Swedish University of Agricultural Sciences, 2008 [in Swedish, summary in English].

- 
- Nordhagen E (2014). Wood fuel chip quality properties in fuel wood chips in Norway. FEC/FORMEC-2014: Forest Engineering Conference: "Propelling the forest value chain" September 23-26, 2014 Gerardmer, France.
- Nurmi J (1993). Heating values of the above ground biomass of small-sized trees. Acta Forestalia Fennica 236. 30p.
- Nurmi J (1997). Heating values of mature trees. Acta Folia Fennica 256. 28p.
- Nurmi J (1999). Energy from the forest in Finland. IEA Bioenergy Task 18 Technical Notes 1: 4–8.
- Nurmi J (2007). Recovery of logging residues for energy from spruce (*Picea abies*) dominated stands. Biomass Bioenergy 31: 375–80.
- Nurmi J, Kokko A (Eds.) (2001). The effects of intensified biomass recovery on forest. Finnish Forest Research Institute, Research Papers, 816. 80 pp.
- Nuutinen Y, Väätäinen K, Heinonen J, Asikainen A, Röser D (2008). The accuracy of manually recorded time study data for harvester operation shown via simulator screen. Silva Fennica 42(1): 63–72.
- OCDE (2014). Enabling Investment in Sustainable Energy Infrastructure. OCDE-POST 2015 Reflections. Element 4, paper 2.
- Öhman M, Boman C, Hedman H, Nordin A, Boström A (2004). Slagging tendencies of wood pellet ash during combustion in residential pellet burners. Biomass & Bioenergy vol.:27 iss: 6 pag:585 -596
- Öhman M, Nordin A (1998). A new method for quantification of Fluidized bed agglomeration tendencies: a sensitivity analysis. Energy and Fuels 1998, 12:90–94.
- Oliver-Villanueva JV (2013). Bioenergía desaprovechada. Boletín Informativo Bosc Valencia nº2 Noviembre 2013. Plataforma Forestal Valenciana.
- Oliver-Villanueva JV (2014). El sector forestal en la Comunitat Valenciana. Conferencia inaugural del I Congreso Forestal de la Comunitat Valenciana. Alcublas 23-24.10.2014. Actas pág 5-9. Plataforma Forestal Valenciana y Universitat de Valencia.
- Olofsson L (1975). Värmevärdet för olika delar av tall, gran och björk. Summary: heating values for different parts of pine, spruce and birch. Department of Operational Efficiency. Research Notes 1975, 90: 39.
- ONCB (2014). Estimaciones del Observatorio Nacional de Calderas de Biomasa. AVEBIOM Conecta Bioenergía 1ª Edición. Newsletter Junio 2014. Disponible en: [http://www.expobiomasa.com/index.cfm?id\\_menu=168023734&id\\_submenu=10673&id\\_idioma=ES](http://www.expobiomasa.com/index.cfm?id_menu=168023734&id_submenu=10673&id_idioma=ES)
- ONU (2011a) Sustainable Energy for All Initiative. Organización de Naciones Unidas. Disponible en: [http://www.un.org/wcm/webdav/site/sustainableenergyforall/shared/Documents/SG\\_Sustainable\\_Energy\\_for\\_All\\_vision\\_final\\_clean.pdf](http://www.un.org/wcm/webdav/site/sustainableenergyforall/shared/Documents/SG_Sustainable_Energy_for_All_vision_final_clean.pdf)

- ONU (2011b). The European Forest Sector Outlook Study II 2010-2030, Geneva Timber and Forest Special Paper - ECE/TIM/SP/28. Organización de Naciones Unidas .Ginebra, Suiza. 111 p.
- Ortega L (2014). Nota de prensa “Alerta roja, pinares en peligro”. Periódico El País, 9 noviembre 2014. [http://ccaa.elpais.com/ccaa/2014/11/09/valencia/1415550229\\_408834.html](http://ccaa.elpais.com/ccaa/2014/11/09/valencia/1415550229_408834.html)
- Ortiz L, Tejada A, Vázquez A, y Piñeiro G (2003). Aprovechamiento de la Biomasa Forestal producida por la Cadena Monte-Industria. Parte III: Producción de elementos densificados. Revista CIS-Madera. Disponible en: <http://www.cismadeira.es/galego/downloads/biomasa3.pdf>.
- PAEE (2011). Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020 (PAEE). Segundo Plan de Acción Nacional de Eficiencia Energética de España 2011-2020. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Madrid.
- Palenius I (1976). The state of whole-tree utilization in Scandinavia. TAPPI Journal 1976, 59(7): 72-74.
- PANER (2005). Plan de Acción Nacional de Energías Renovables de España 2005-2010. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía IDAE Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Madrid 2005. Disponible en: [http://www.idaEes/uploads/documentos/documentos\\_PER\\_2005-2010\\_8\\_de\\_gosto-2005\\_Completo.\(modificacionpag\\_63\)\\_Copia\\_2\\_301254a0.pdf](http://www.idaEes/uploads/documentos/documentos_PER_2005-2010_8_de_gosto-2005_Completo.(modificacionpag_63)_Copia_2_301254a0.pdf)
- PANER (2010). Plan de Acción Nacional de Energías Renovables de España 2011-2020. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Madrid 2010. 173 pp.
- Pardé J (1961). Dendrométrie Ecole Nationale des Eaux et Forêts. Nancy. Ed. Louis-Jean Gab.
- Parresol BR (1999). Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. For. Sci. 45, 573- 593.
- PAS (2008). Publicity Available Specification 2050. Specification for the Assessment of the Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Goods and Services. BSI British Standards, London.
- Passalacqua F (2004). Pellets in Southern Europe. The State of the Art of Pellet Utilization in Southern Europe. New perspectives of pellets from agri-residues. State of the art of pellets utilization. 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 10-14 May 2004, Rome, Italy.
- Patenaudea G, Hillb RA, Milne R, Gaveaud DLA, Briggsa BBJ, Dawsona BBJ (2004). Quantifying forest above ground carbon content using LiDAR remote sensing. Remote Sens. Environ 93:368-380.
- PATFOR (2009). Documento consultivo del Plan de Acción Territorial Forestal de la Comunitat Valenciana. Generalitat Valenciana. Conselleria de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente.
- 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.

- 
- PBCyL (2010). Plan Regional de Ámbito Sectorial de la Bioenergía de Castilla y León. Disponible en:  
[http://www.itacyl.es/opencms\\_wf/opencms/system/modules/es.jcyl.ita.extranet/elements/galleries/galeria\\_downloads/administracion/PBCyL\\_DocumentoPrincipal\\_12012011.pdf](http://www.itacyl.es/opencms_wf/opencms/system/modules/es.jcyl.ita.extranet/elements/galleries/galeria_downloads/administracion/PBCyL_DocumentoPrincipal_12012011.pdf).
- PDR CV (2006). Programa de Desarrollo Rural 2007-2013 de la Comunitat Valenciana. Generalitat Valenciana.
- PDR CV (2013). Programa de Desarrollo Rural de la Comunitat Valenciana 2014-2020. Generalitat Valenciana Disponible en:  
[http://www.agricultura.gva.es/documents/170659/127086201/PDR+CV+2014-2020\\_version+preliminar.pdf/02b9d3bf-84dc-4791-9fd9-46666512c4f4](http://www.agricultura.gva.es/documents/170659/127086201/PDR+CV+2014-2020_version+preliminar.pdf/02b9d3bf-84dc-4791-9fd9-46666512c4f4)
- PDR-CV (2006). Programa de Desarrollo Rural de la Comunitat Valenciana 2007-2013. Generalitat Valenciana
- PDRS (2010). Primer Programa de Desarrollo Rural Sostenible 2010-2014. Secretaría de Estado de Cambio Climático. Secretaría de Estado de Medio Rural y Agua. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid.
- PELLCERT (2012). IEE project PELLCERT. Fact sheet. Disponible en: [http://www.enplus-pellets.eu/wp-content/uploads/2012/01/ES\\_fact-sheet\\_Jan20121.pdf](http://www.enplus-pellets.eu/wp-content/uploads/2012/01/ES_fact-sheet_Jan20121.pdf)
- Pellet@las (2009a). Development and promotion of a transparent European Pellets Market Creation of a European real-time Pellets Atlas Pellet market country report. SPAIN ETA Florence Renewable Energies, srl.
- Pellet@las (2009b). English Handbook for Wood Pellet Combustion. English translation of Force Technology "Træpillehandbogen, 2002", Pellets@las, 2009.
- Peltola A (2003). IT-time for mechanised forest work study. 2<sup>nd</sup> Forest Engineering Conference 12-15<sup>th</sup> May 2003, Växjö, Sweden. Skogsforsk Arbetsrapport 536: 107-112.
- PEPNB (2011). Plan estratégico del patrimonio natural y de la biodiversidad 2011-2017. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MMAMRM). Gobierno de España. Madrid 2011. Disponible en:  
[http://www.magramAgob.es/es/biodiversidad/publicaciones/Libro\\_Plan\\_Estrategico\\_PNB\\_tcm7-202703.pdf](http://www.magramAgob.es/es/biodiversidad/publicaciones/Libro_Plan_Estrategico_PNB_tcm7-202703.pdf)
- PER (2005). Plan de Energías Renovables de España 2005-2010. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Agosto 2005. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Madrid. Disponible en:  
[http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_Resumen\\_PER\\_2005-2010\\_\(8-de\\_agosto-2005\)sge2\\_DINA4\\_version\\_buena\(4-08-05\)\\_493fc9ab\\_c25d12d9.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Resumen_PER_2005-2010_(8-de_agosto-2005)sge2_DINA4_version_buena(4-08-05)_493fc9ab_c25d12d9.pdf)
- Pérez Dueñas L (2010). Bioenergías para la producción de electricidad: optimización económica. Biomasa 2 12:29. INFOPOWER. 4 p.
- Pérez-Laorga Arias E (2013). Ordenación de montes para la producción de biomasa y demás usos. Actuaciones ante el cambio climático en la Comunitat Valenciana Servicio de

- Ordenación y Gestión Forestal. Conferencia final del proyecto Climat Regions: Actuaciones ante el cambio climático en la Comunitat Valenciana. 8 de marzo de 2013.
- Pérez-Soba, Díez Del Corral I, Solá Martín MA (2003). Regulación legal de los aprovechamientos de pastos y leñas en los montes públicos aragoneses. Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón.
- Perpiñá Castillo C (2012). Metodologías para la ubicación de plantas de biomasa mediante modelos de localización basados en programación lineal y evaluación multicriterio en el entorno de los Sistemas de Información Geográfica. Instituto de Ingeniería Energética. Universidad Politécnica de Valencia.
- Pflugmacher D, Cohen WB, Kennedy RE, Yang ZQ (2014). Using Landsat-derived disturbance and recovery history and lidar to map forest biomass dynamics. *Remote Sensing of Environment* vol 151: 124-137pp.
- PFV (2014). Territorio Forestal Valenciano. Nuevos retos con el PDR CV 2014-2020. 1<sup>er</sup> Congreso Forestal Valenciano: Gestión y restauración de ecosistemas forestales tras los incendios: nue y avances para el Desarrollo Rural. 23 y 24 octubre. Alcablas.
- PGOF (2002). Plan General de Ordenación Forestal de la Comunitat Valenciana. Consellería de Territorio y Vivienda. Generalitat Valenciana.
- Phua M, Saito H (2003). Estimation of biomass of a mountainous tropical Forest using Landsat TM data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29, num 4, pp. 429-440.
- Picchio R, Neri F, Maesano M, Savelli S, Sirna A, Blasi S, Baldini S, Marchi E (2011). Growth effects of thinning damage in a Corsican pine (*Pinus laricio* Poiret) stand in central Italy. *Forest Ecology and Management* 262: 237-243.
- PIE (2011). Plan de Infraestructuras Estratégicas de la Comunitat Valenciana 2010-2020. Generalitat Valenciana. Disponible en <http://www.cit.gva.es/cast/iniciativas-y-proyectos/plan-infraestructura/>
- Poblete H, Sánchez J (1991). Tableros con corteza de *Pinus radiata*. *Bosque* 12 (1): 17 - 26.
- PONSEE (2005). The cut-to-length harvesting system, [www.ponsse.com/english/group/MADERA\\_CORTA/index.php](http://www.ponsse.com/english/group/MADERA_CORTA/index.php)
- Prada A, Vázquez MJ, Soliño M (2006): Electricidad verde. La biomasa en los montes de Galicia. CIEF Centro de Investigación Económica y Financiera. Fundación Caixa Galicia.
- Prades C, Rubio JJ (1997). Evaluación de la productividad potencial de los autocargadores ligeros de transmisión hidrostática. *Rev. Investigación Agraria: Sistemas de Recursos Forestales*. Vol 6 (1 y 2) 1997, pp. 215-225. Madrid.
- 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.
- PROFORBIOMED (2012). Situation Report on Forest Biomass Use in Mediterranean region. Proyecto MED de Promoción de la Biomasa Residual Forestal en la Cuenca Mediterránea. Programa MED de la UE. Disponible en: [http://proforbiomed.eu/sites/default/files/Situation%20report\\_all\\_7\\_8\\_2012\\_0-1.pdf](http://proforbiomed.eu/sites/default/files/Situation%20report_all_7_8_2012_0-1.pdf)



- 
- Pukkila A (1959). Työntutkimus. Otava, Helsinki. 318p.
- Pulkki R. (2014). Cut to length, tree-length or full tree harvesting? Lakehead University Faculty of Forestry. Canada. Disponible en: [http://flash.lakeheadu.ca/~repulkki/madera\\_corta\\_ft.html](http://flash.lakeheadu.ca/~repulkki/madera_corta_ft.html)
- Puttock D (1995). Estimating cost for integrated harvesting and related forest management activities. *Biomass and Bioenergy* 8: 73–79.
- Ranta T, Halonen P, Alakangas E (2001). Production of forest chips in Finland. OPET Report 6. OPET Finland & VTT. 58 pp.
- Reese H, Nilsson M, Sandström P, Olsson H (2002). Applications using estimated of forest parameters derived from satellite and forest inventory data. *Computers and Electronics in Agriculture* 37: 37-55.
- Reichle DE (Ed) (1982). *Dynamic properties of forest ecosystems*. Cambridge University Press, London.
- Relova I, Vignote S, Leon MA, Ambrosio Y (2009). Optimisation of the manufacturing variables of sawdust pellets from the bark of *Pinus caribaea* Morelet: particle size, moisture and pressure, *Biomass and Bioenergy* 33 (2009) 1351–1357.
- Rhen C, Gref R, Sjöström M, Wästerlund I (2005). Effects of raw material moisture content, densification pressure and temperature on some properties of Norway spruce pellets, *Fuel Processing Technology* 87: 11–16.
- Richards FJ (1959). A flexible growth functions for empirical use. *J Exp. Bot.*, 10: 290-300.
- Richardson J, Björheden R, Hakkila P, Lowe AT, Smith CT. (Eds.) (2002). *Bioenergy from Sustainable Forestry. Guiding Principles and Practice*. Series: Forestry Sciences. Vol. 71, XIV, 344 p.
- Riechmann J, Sempere J (2003). *Cuidar la Tierra: Políticas agrarias y alimentarias sostenibles para entrar en el siglo XXI*. Barcelona, España. Icaria. 611 p.
- Rigol M, Bartrol J (2005). *La biomassa com a Font de matèries primeres i d'energía : estudi de viabilitat al Montseny i Montnegre-corredor*. Fundació Albertis. Instituto de Medio Ambiente (IMA) de la Universidad de Girona (UdG) e Instituto de Ciencia y Tecnología Ambiental (ICTA) de la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB).
- Rivas-Martínez S (1987). *Memoria del mapa de series de vegetación de España*. Ministerio de Agricultura.
- Robohm KF, Apelt J (1986). Einflug der pneumatischen Tankwagenentleerung auf Bruch- und Mehlbildung bei Mischfutterpellets, Teil 2, *Kraftfutter*, 1): 15- 16.
- 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: Universidad e Servizo de Publicacións e Intercambio Científico. 128 p. ISBN 978-84-9887-319-1.

- Röser D, Erkkilä A, Mola-Yudego B, Sikanen L, Prinz R, Heikkinen A, Kaipainen H, Oravainen H, Hillebrand K, Emer B, Väätäinen K (2010). Natural drying methods to promote fuel quality enhancement of small energywood stems. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 186.
- Röser D, Mola-Yudego B, Sikanen L, Prinz R, Gritten D, Emer B, Väätäinen K y Erkkilä A (2011). Natural drying treatments during seasonal storage of wood for bioenergy in different European locations. *Biomass & Bioenergy* 35(10): 4238-4247.
- Routa J, Sikanen L (2014). Precision Measurement of Forest Harvesting. Residue Moisture Change and Dry Matter Losses by Constant Weight Monitoring. Presentación en 5<sup>th</sup> Forest Engineering Conference together with the 47th International Symposium on Forestry Mechanisation FEC/FORMEC-201: "Propelling the forest value chain". Gerardmer 23-26 september 2014.
- Salas-Bringas C, Filbakk T, Skjevraak G, Lekang O, Høibø O-I, Schüller RB (2010). Compression rheology and physical quality of wood pellets pre-handled with four different conditions. *Annual Transactions of the Nordic Rheology Society*, Vol. 18.
- Salvador R, Pons X (1998a). On the applicability of Landsat TM images to Mediterranean Forest inventories. *Forest Ecology and Management*, 104, pp. 193-208.
- Salvador R, Pons X (1998b). On the reliability of Landsat TM for estimating forest variables by regression techniques: a methodological analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, pp. 1888-1897.
- Samset I (1990). Some observations of time and performance studies in forestry. Communication 43.5. Norwegian Forest Research Institute. As, 80 pp.
- Samuelsson R, Thyrel M, Sjöström M, Lestander TA (2009). Effect of biomaterial characteristics on pelletizing properties and biofuel pellet quality. *Fuel Processing Technology*, 90(9): p. 1129.
- Sánchez-García S, Canga E, Tolosana E, Majada J (2015). A spatial analysis of woodfuel based on WISDOM GIS methodology: multiscale approach in Northern Spain. *Apply Energy* (under review).
- Sanz F, Piñeiro G (2004). Atlanwood: Proyecto de cooperación técnica para el desarrollo de las aplicaciones industriales de la madera de *Pinus pinaster*. CIS Madeira 13: 6-22.
- Satoo T, Madgwick HAI (1982). Forest biomass. *Forestry Sciences*. Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publisher, The Hague.
- Scarascia-Mugnozza G, Pisanelli A (2008). Multifunctional forestry, global change and the impact on mobilizing wood resources. Cost Action E44 Final Conference in Milan on A European wood processing strategy: future resources matching products and innovations (May 30th and June 2nd-3rd 2008).
- Schlamadinger B, Apps M, Bohlin F, Gustavsson L, Jungmeier G, Marland G, Pingoud K, Savolainen I (1997). Towards a standard methodology for greenhouse gas balances for bioenergy systems in comparison with energy fossil systems. *Biomass and Bioenergy* 13 (6), 359-375.

- 
- Sedjo RA (1992). Temperate forest ecosystems in the global cycle. *Ambio* 21, 274–277.
- Serrada R, Montero G, Reque-Kilchenmann JA (2008). Compendio de Selvicultura Aplicada en España. INIA. Madrid.
- Sevillano-Marco E, Fernández-Manso A, Quintano C, Poulain M (2013). CCD CBERS and ASTER data in dasometric characterization of *Pinus radiata* D. Don (Northwestern Spain). *Cerne* 19, 103–110.
- SigPaC (2013). Sistema de información geográfica de parcelas agrícolas. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. <http://sigpac.mapa.es/feqa/visor/>
- Sikanen L, Vilppo T (2012). Small Scale Pilot Combustion Experiments with Wood Pellets – The Effect of Pellet Length. *The Open Renewable Energy Journal*, 2012, 5, 1-6
- Sikkema R (1998). Kosten van energiehout uit bestaande bossen, Stichting Bos en Hout, Wageningen.
- Sikkema R, Steiner M, Junginger M, Hiegl W, Hansen MT, Faaij A (2011). The European wood pellet markets: current status and prospects for 2020, *Biofuels Bioproducts & Biorefining-Bioppr.* 5 (2011) 250–278.
- Singh T, KostECKY MM (1986). Calorific value variations in components of 10 Canadian tree species. *Canadian Journal of Forest Research* 16:1378–81.
- Sjöström E (1981). *Wood Chemistry, Fundamentals and Applications*. Academic Press, 223 p.
- Skogsarbeten (1969). Terrängtypschema för svenskt skogsbruk. Swedish Logging Research Foundation.
- Spinelli R (2007). Chapter 1: Biomass, LAGs and the transnational project and Chapter 6: Conclusions. En Gaio G, Da Val J, Carrara L (coord.) (2007). *Guidelines for the development of a forest chips supply chain model*. San Michelle All'Adige (Italia), CNR/IVALSA.
- Spinelli R (2011). Comunicación oral en COST Action FP0902 Training School. 26<sup>th</sup> March, Brno.
- Spinelli R, Laina-Relaño R, Magagnotti N, Tolosana E (2013). Determining Observer and Method Effects on the Accuracy of Elemental Time Studies in Forest Operations. *Baltic Forestry* 19(2): 301-306.
- Spinelli R, Lombardini C, Magagnotti N (2014). The effect of mechanization level and harvesting system on the thinning cost of Mediterranean softwood plantations. *Silva Fennica* vol. 48 n<sup>o</sup> 1 article id 1003. 15 p.
- Spinelli R, Magagnotti N (2010). Comparison of two harvesting systems for the production of forest biomass from the thinning of *Picea abies* plantations. *Scandinavian Journal of Forest Research* 25 (1), 69-77.)
- Spinelli R, Nati C (2009). A low-investment fully mechanised operation for pure selection thinning of pine plantations. *Croatian J For Eng* 30(2): 89–97.
- Spinelli R, Nati C, Magagnotti N (2006). Biomass harvesting from buffer strips in Italy: three options compared. *Agroforest. Syst.* 68:113-121.

- Stampfer K, Kanzian C (2006). Current state and development possibilities of woodchip supply chains in Austria. *Croatian Journal of Forest Engineering* 27 (2): pp 135-144.
- Stuart WB, Porter CD, Walbridge TA, Oderwald RG (1981). Economics of modifying harvesting systems to recover energy wood. *Forest Products Journal* 31(8): 37-42.
- Sundberg U (1988). The emergence and establishment of forest operations and techniques as a discipline in forest science. Communication 41.8. Norwegian Forest Research Institute. As, 37 pp.
- Taylor FW (1895). A piece-rate system being a step toward partial solution of the labor problem. *Transactions of American Society of Mechanical engineers* 16: 865-903.
- Temmerman M, Rabier F, Jensen PD, Hartmann H, Böhm T (2006). Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes. *Biomass and Bioenergy*, 30:964-72.
- TFD 2008. Más allá de las iniciativas de REDD. *The Forests Dialogue*. La función de los bosques en el cambio climático. Disponible en [www.theforestsdialogue.org](http://www.theforestsdialogue.org)
- The Carbon Trust (2008). Biomass heating. A practical guide for potential users. The Carbon Trust s.l.
- The Economist (2014). Why the oil price is falling. *The Economist Newspaper Limited*. Dec 8, 2014.
- Thomas M, van Zuilichem DJ, van der Poel AFB (1997). Physical quality of pelleted animal feed. 2. Contribution of processes and its conditions. *Animal Feed Science and Technology* 1997, 64: 173-92.
- Thörnqvist T (1984). Energy change due to storage of logging residues. *Bioenergy* 84. Proceedings of conference 15-21 June 1984, Göteborg, Sweden. Vol. III Biomass conversion. 1984 pp. 564-570
- Todd SW, Hoffer RM, Milchunas DG (1998). Biomass estimation on grazed and undergrazed rangelands using spectral indices. *International Journal of Remote Sensing*, 11, num 1., pp. 95-111.
- Tolosana E (1999). El aprovechamiento forestal mecanizado en las cortas de mejora de *Pinus sylvestris* L. Modelos de tiempo, rendimientos y costes y estudio de sus efectos ambientales. Tesis doctoral (no publicada). ET.S.I.I Montes (UPM). Madrid.
- Tolosana E (2003). Planificación de las operaciones posteriores al aprovechamiento: Gestión de los residuos. Bloque 3, U.D. 2. Tema 1. ET.S.I. MONTES, 2002-2003. Madrid. Disponible en: [http://servicios.educar.mes/templates/portal/ficheros/websDinamicas/20/bl3\\_ud2\\_t1\\_planif\\_residuos.pdf](http://servicios.educar.mes/templates/portal/ficheros/websDinamicas/20/bl3_ud2_t1_planif_residuos.pdf)
- Tolosana E (2005). Estudio de tiempos, rendimientos y costes de desembosque con cable aéreo en Cataluña. Póster IV Congreso Forestal Español. Zaragoza.
- 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. Ed: MundiPrensa – FUCOVASA. 348 p. Madrid.

- 
- Tolosana E, Ambrosio Y, Laina R, Martínez R, Pinillos F (2007). Rendimientos y costes de diferentes aprovechamientos de la biomasa forestal: Las experiencias en curso en Castilla y León". Ponencia en el seminario "Oportunidades y Amenazas para la Biomasa: Experiencia en el sector del tablero", organizado por ANFTA en el Ministerio de Medio Ambiente (Madrid), el 4 de junio de 2007.
- Tolosana E, Ambrosio Y, Laina R, Martínez R (2008a). Guía de la maquinaria para el aprovechamiento y elaboración de biomasa forestal. CESEFOR. 92 p. Castilla y León.
- Tolosana E, Ambrosio Y, Laina R, Martínez R (2008b). Sistemas de aprovechamiento de biomasa en Castilla y León. Las experiencias en curso. Bol. Inf. CIDEU 5: 97-106.
- Tolosana E, Laina R (2008). Manual de buenas prácticas para el aprovechamiento de biomasa forestal en las cortas de regeneración de pinares de *Pinus sylvestris* y *Pinus pinaster*. CESEFOR.
- Tolosana E, Laina R, Martínez R, Ambrosio Y (2013a). El aprovechamiento de biomasa residual (ramas y copas) en cortas a hecho de coníferas en Soria (España). 6ª Conferencia Forestal Española. Montes: Servicios y desarrollo rural. Sociedad Española de Ciencias Forestales. 10-14 junio 2013 Vitoria-Gasteiz.
- Tolosana E, Laina R, Martínez R, Martín M (2013b). Sistemas de aprovechamiento para uso energético de productos de claras retrasadas mecanizadas sobre plantaciones de coníferas en terreno suave en Castilla y León (España). 6ª Conferencia Forestal Española. Montes: Servicios y desarrollo rural. Sociedad Española de Ciencias Forestales. 10-14 junio 2013 Vitoria-Gasteiz.
- Torres-Rojo JM (2004). Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina al año 2020. Roma, Italia. SEMARNAT/FAO 104 p.
- TRAGSA (2011). Tarifas Grupo Tragsa. Edición 2011.
- TRAGSATEC (2000). Aprovechamiento de la Biomasa en la Comunidad Autónoma de Galicia. INEGA
- Tsioras P, Liamas D (2010). Hauling damages in a mixed beech-oak stand. Proceedings of FORMEC 2010 "Forest Engineering: Meeting the Needs of the Society and the Environment", July 11-14, 2010, Padova, Italy.
- Tufts DM (1976). Whole-tree chipping. TAPPI Journal 59(7): 60-62.
- UK Forestry Commission (1995). Terrain classification. Technical Note 16/95. 5 p
- Ulrik K (2012). Seeing the Forest for the Trees – Australian Forest Biomass for Energy An Investigation of Understanding, Acceptance, Trust & Legitimacy. Thesis, University of Lund, IIEE Publications 25/2012.
- UNIÓN POR LA BIOMASA (2013). Creación de empleo para la reducción de incendios forestales. Boletín Informativo Bosc Valencia nº2 Noviembre 2013. Plataforma Forestal Valenciana.
- US Environmental Protection Agency (2007). Biomass Combined Heat and Power. Catalog of Technologies. s.l.: U.S. Environmental Protection Agency. Combined Heat and Power Partnership.

- USDA (2010). Soil Taxonomy. Eleventh Edition 2010 . The U.S. Department of Agriculture.
- Vadla K (2006). Wood properties of conifers from various sites in Northern Norway- physical- geometrical- and anatomical properties. (in Norwegian with English Summary) *Forskning fra Skog og landskap. Norwegian Forest and Landscape Institute As, Norway*, in press.
- Valente C, Spinelli R, Hillring, BG (2011). LCA of environmental and socio-economic impacts related to wood energy production in alpine conditions: Valle di Fiemme (Italy). *Journal of Cleaner Production* 19. 1931-1938.
- van Belle J-F, Temmerman M, Schenkel Y (2003). Three level procurement of forest residues for power plant. *Biomass and Bioenergy* 24: 401-409.
- Varios autores (2009). Estrategia Española para el desarrollo del Uso de la Biomasa Forestal Residual. Dirección General para la Biodiversidad. Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Medio Marino. Madrid.
- Velázquez MB (2006). Situación de los sistemas de aprovechamiento de los residuos forestales para su utilización energética. *Ecosistemas* 15 (1): 77-86.
- Velazquez-Posada A, García-Cobos J (2007). Estimación de la producción de biomasa en la provincia de Cuenca. *Tecnoma. RETEMA* nº120 Julio-Agosto
- Vignote S et al. (1999). Evaluación de los residuos forestales y agrícolas en España. Plan de fomento de la utilización de los residuos forestales y agrícolas con fines energéticos. IDAE-Tragsatec. Madrid.
- Vinterback J (2004). Pellets 2002: the first world conference on pellets. *Biomass Bioenergy* 2004,27(6):513e20. Elsevier Ltd., Oxford, UK.
- Voivontas D, Assimacopoulos D, Koukios EG (2001). Assessment of biomass potential for power production: a GIS based method. *Biomass & Bioenergy*. 20. p. 101-112.
- Vöry J (1954). Eräiden metsätöiden aikatutkimusaineistojen analyysiä. *Metsäteho*, Julkaisu 31. Helsinki.
- Wagner FG, Fiedler CE, Keegan CE (2000). Processing values of small-diameter sawtimber at conventional stud sawmills and modern high-speed, small-log in the western United States-A comparison. *Western J of Applied Forestry* 15(4): 208-212.
- Wang J, Long C, McNeel J, Baumgras J (2004). Productivity and cost of manual felling and cable skidding in Central Appalachian hardwood forests. *Forest Prod. J* 54(12):45-51.
- Waters I, Kembel S, Gingras JF, Shay J (2004). Short-term effects of cut-to-length versus full-tree harvesting on conifer regeneration in jack pine, mixedwood, and black spruce forests in Manitoba. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 1938-1945.
- WBA( 2014). Global Bioenergy Statistics 2014. World Bioenergy Association.
- Weiss P, Schieler K, Schadauer K, Radunsky, K, Englisch M (2000). Die Kohlenstoffbilanz des Österreichischen Waldes und Betrachtungen zum Kyoto-Protokoll, Series Die Kohlenstoffbilanz des Österreichischen Waldes und Betrachtungen zum Kyoto-Protokoll. Federal Environment Agency, Wien.

- 
- Werther J, Saenger M, Hartge E-U, Ogada T, Siagi Z (2000). Combustion of agricultural residues. *Progr Energy Combust. Sci.* 26:1e27.
- Wihersaari M (2005). Greenhouse gas emissions from final harvest fuelchip production in Finland. *Biomass and bioenergy* 28,435-443.
- Wilson TO (2010). Factors affecting pellet wood durability. Master Thesis in Agricultural and Biological Engineering. The Pennsylvania State University The Graduate School Department of Agricultural and Biological Engineering.
- Wirth C, Schulze ED, Schwalbe G, Tomczyk S, Weber G, Weller E, Böttcher H, Schumacher J, Vetter J (2003). Dynamik der Kohlenstoffvorräte in den Wäldern Thüringens. Abschlussbericht zur 1. Phase des BMBF-Projektes "Modelluntersuchung zur Umsetzung des Kyoto-Protokolls". Max-Planck Institute for Biogeochemistry, Jena, p 328.
- WRI (2005). EarthTrends: The environmental information Portal. World Resources Institute.
- XARXAFORESTAL (2014). Una experiència d'aprofitament de biomassa forestal per ús energètic: el cas de l'illa de Menorca. Disponible en: <http://xarxaforestal.blogspot.de/2014/09/una-experiencia-daprofitament-de.html>
- Yaoxiang L, Wang J, Miller G, McNeel J (2006). Production economics of harvesting small-diameter hardwood stands in central Appalachia. *Forest Prod. J.* 56(3):81-86.
- Yoshioka T (2011). Study on Feasibility of Harvesting, Transporting and Chipping System for Forest Biomass Resources in Japan. *Agri-Bioscience Monographs*, Vol.1, nº 1, pp. 1-60.
- Zhang G, Ganguly S, Nemani RR, White MA, Milesi C, Hashimoto H, Wang WL, Saatchi S, Yu YF, Myneni RB (2014). Estimation of forest aboveground biomass in California using canopy height and leaf area index estimated from satellite data. *Remote Sensing of Environment*. Vol 151 pp. 44-56.
- Zheng D, Rademacher J, Chen J, Crow T, Bresee M, Le Moine J, Ryu SR (2004). Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA. *Remote Sensing of Environment* 99, 402-411.
- Zianis D, Mencuccini M (2004). On simplifying allometric analyses of forest biomass. *For Ecol Manage* 187:311-332.
- Zianis D, Muukkonen P, Mäkipää R, Mencuccini M (2005). Biomass and Stem Volume Equations for Tree Species in Europe. *Silva Fennica. Monographs* 4 .The Finnish Society of Forest Science. The Finnish Forest Research Institute.
- Zinkevicius R, Steponavicius D, Vitunskas D, Cinga G (2012). Comparison of harvester and motor-manual logging in intermediate cuttings of deciduous stands. *Turk J Agric For* 36: 591-600.

## 6.2. Legislación

### 6.2.1 Europea

DIRECTIVA 2006/32/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de abril de 2006, sobre la eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos. Diario Oficial de la Unión Europea L 114/64 de 27 de abril de 2006.

DIRECTIVA 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables. Diario Oficial de la Unión Europea L 140, 5 de junio de 2009.

DIRECTIVA 2001/77/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de septiembre de 2001, relativa a la promoción de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables en el mercado interior de la electricidad. Diario Oficial de la Unión Europea L 283, 27 de octubre de 2001.

DIRECTIVA 2003/30/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 8 de mayo de 2003, relativa al fomento del uso de biocarburantes u otros combustibles renovables en el transporte. Diario Oficial de la Unión Europea L 123, 17 de mayo de 2003.

REGLAMENTO nº 1698/2005 del Consejo de 20 de septiembre de 2005 relativo a la ayuda al desarrollo rural a través del Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER). Diario Oficial de la Unión Europea L 277 de 21.10.2005, p. 1.

### 6.2.2 Española

LEY 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico. BOE, 28 de noviembre de 1997, núm. 258, pp. 35097-35126.

LEY 43/2003, de 21 de noviembre, de Montes. BOE, 22 de noviembre de 2003, núm. 280pp. 41422- 41442.

LEY 10/2006 de 28 de abril. BOE 29 de abril de 2006, núm. 102, pp. 16830 a 16839.

LEY 45/2007, de 13 de diciembre para el desarrollo sostenible del medio rural. BOE, de 14 de diciembre de 2007, núm. 299, pp. 51339-51349.

LEY 2/2011, de 4 de marzo, de Economía Sostenible, BOE de 5 de marzo de 2011, pp. 25033-25235 .

REAL DECRETO 661/2007 de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. BOE núm. 126, de 26 de mayo de 2007, pp. 22846-22886.



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, en aplicación de la LEY 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad. BOE, de 30 de septiembre de 2011, núm. 236, pp. 103071-103280.

REAL DECRETO-LEY 1/2012, de 27 de enero, por el que se procede a la suspensión de los procedimientos de preasignación de retribución y a la supresión de los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de cogeneración, fuentes de energía renovables y residuos. BOE de 28 de enero de 2012, núm. 24 pp. 8068-8072.

REAL DECRETO-LEY 20/2012, de 13 de julio, de medidas para garantizar la estabilidad presupuestaria y de fomento de la competitividad. BOE, 4 de julio de 2012, núm. 168 de 1pp. 50428-50518.

### 6.2.3 Valenciana

DECRETO 1/2011, de 13 de enero, del Consell de la Estrategia Territorial de la Comunitat Valenciana [2011/235]. DOCV núm. 6441 de 19 de enero de 2011).

LEY 3/1993, de 9 de diciembre, Forestal de la Comunitat Valenciana. DOGV núm.2.168, de 21 de diciembre de 1993.

LEY 4/2004, de 30 de junio, de la Generalitat, de Ordenación del Territorio y Protección del Paisaje [2004/6916]. DOCV núm. 4788 de 02 de julio de 2004.

LEY 10/2004, de 9 de diciembre, de la Generalitat, del Suelo No Urbanizable [2004/12638]. DOCV núm. 4900 de 10 de diciembre de 2004.

LEY 16/2005, de 30 de diciembre, de la Generalitat, Urbanística Valenciana [2005/14692]. DOCV núm. 5167 de 31 de diciembre de 2005.

Licitación núm 2014/21/16. Servicio de redacción de proyectos de ordenación de varios montes de utilidad pública de la demarcación forestal de Xàtiva. DOCV núm. 7329 de 31 de julio de 2014.

Licitación núm 2014/21/18. Redacción de proyectos de ordenación de varios montes de utilidad pública de la demarcación forestal de Segorbe (Castellón). DOCV núm. 7306 de 30 de junio de 2014.

Licitación núm 2014/21/19, Redacción de proyectos de ordenación de varios montes de utilidad pública de la demarcación forestal de Chelva. DOCV núm. 7306 de 30 de junio de 2014.

Licitación núm 2014/21/21. Redacción del Plan de Ordenación de Recursos Forestales de la demarcación forestal de Sant Mateu. DOCV núm. 7307 de 1 de julio de 2014.

ORDEN de 12 de agosto de 2008, de la Conselleria de Medio Ambiente, Agua, Urbanismo y Vivienda por la que se aprueban las bases reguladoras de un régimen de primas para la

puesta en valor de la biomasa forestal residual en terrenos forestales de la Comunitat Valenciana. [2008/10625]. DOCV núm. 5850 de 16 de septiembre de 2008.

ORDEN de 1 de diciembre de 2009, de la Conselleria de Medio Ambiente, Agua, Urbanismo y Vivienda, por la que se aprueban las bases reguladoras de un régimen de primas para la puesta en valor de la biomasa forestal residual en terrenos forestales de la Comunitat Valenciana. DOCV núm. 6168 de 18 de diciembre de 2009 pp. 45710-45730.

ORDEN 10/2010, de 9 de abril, de la Conselleria de Infraestructures i Transport, sobre la concesión de ayudas de la Agencia Valenciana de la Energía (AVEN), en el marco del Plan de Acción de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética 2008-2012 (PAE4+) en las empresas, sector de la edificación, servicios públicos, comunidades de regantes, cogeneración y diversificación energética para el ejercicio 2010.

ORDEN 13/2010, de 10 de mayo, de la Conselleria de Infraestructures i Transport, sobre la concesión de ayudas de la Agencia Valenciana de la Energía (AVEN), en materia de Energías Renovables y Biocarburantes, para el ejercicio 2010. Cofinanciación por parte del IDAE.

ORDEN 1/2013, de 14 de enero, de la Conselleria de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente, por la que se aprueban las bases reguladoras de un régimen de primas para la puesta en valor de la biomasa forestal en terrenos forestales de la Comunitat Valenciana. DOGV núm. 6947 de 21 de enero de 2013.

ORDEN 1/2013, de 31 de enero, de la Conselleria de Gobernación y Justicia, por la que se regula el Registro de Sedes Festeras Tradicionales, la declaración responsable sobre su tipología y el modelo de cartel identificativo. DOCV núm. 6963 de 12 de febrero de 2013.

RESOLUCIÓN de 28 de junio de 2013, del presidente del Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial (IVACE), por la que se convocan ayudas, en materia de energías renovables y biocarburantes, para el ejercicio 2013. [2013/7125]. Diario Oficial de la Generalitat Valenciana 7062 de 8 de julio de 2013 pp. 20105-20127.

### 6.3. Normativa

- EN 14774-1(2010). Biocombustibles sólidos. Métodos para la determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 1: Humedad total. Método de referencia.
- EN 14774-3 (2010). Biocombustibles sólidos. Métodos para la determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 3. Humedad de la muestra para análisis general.
- EN 14775 (2010). Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del contenido en cenizas.
- EN 14918 (2011). Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del poder calorífico.
- EN 14961 (2010) Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles.
- EN 15103 (2010). Biocombustibles sólidos. *Determinación de la densidad a granel.*
- EN 15149-1 (2011). Biocombustibles sólidos. Determinación de la distribución del tamaño de partícula. Parte 1. Método del tamiz oscilante con apertura de maya igual o superior a 1mm.
- EN 15149-2 (2011). Biocombustibles sólidos. Determinación de la distribución del tamaño de partícula. Parte 2: Método del tamiz vibrante con apertura de malla inferior o igual a 3,5 mm.
- EN 15210-1 (2010). Biocombustibles sólidos. Determinación de la durabilidad mecánica de pellets y briquetas. Parte 1: Pellets.
- EN 15289 (2011). Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido total de azufre y cloro.
- EN 16127 (2012). Biocombustibles sólidos. Determinación de la longitud y diámetro de los pellets.



***ANEXOS***

---









## Anexo 1. Biomasa forestal

**Tabla 1. Porcentajes obtenidos de los valores modulares de biomasa seca (Kg anhidros) de las distintas fracciones de biomasa según Montero et al. (2005). Fuente: elaboración propia.**

Especie	Biomasa Aérea					Biomasa Radical	
	Fuste	R >7cm	Ramas R 2-7cm	R <2cm	Hojas		Total
Nombre Cient.							
<i>Pinus halepensis</i>	37,0%	9,8%	8,4%	21,2%	0,0%	76,4%	23,6%
<i>Pinus nigra</i>	51,1%	5,4%	8,0%	15,9%	0,0%	80,4%	19,6%
<i>Pinus pinaster</i>	61,9%	0,9%	4,1%	10,9%	0,0%	77,9%	22,1%
<i>Pinus pinea</i>	36,4%	17,7%	11,4%	13,4%	5,6%	84,5%	15,5%
<i>Pinus sylvestris</i>	56,1%	2,5%	7,0%	7,4%	5,6%	78,6%	21,4%
<i>Populus euramericana</i>	48,9%	6,4%	6,4%	6,1%	2,3%	76,0%	24,0%
<i>Quercus ilex</i>	18,4%	24,2%	12,2%	8,7%	2,0%	65,4%	34,6%
<i>Quercus faginea</i>	25,1%	24,7%	9,9%	5,5%	3,2%	68,4%	31,6%
<i>Quercus suber</i>	32,4%	30,8%	10,5%	2,4%	1,4%	77,5%	22,5%
<i>Juniperus thurifera</i>	35,8%	7,8%	14,6%	9,3%	8,5%	76,1%	23,9%
<i>Juniperus oxycedrus</i>	-	-	-	-	-	21,8%	78,2%
<i>Ceratonia siliqua</i>	17,7%	13,1%	7,4%	7,7%	5,3%	51,2%	48,8%
<i>Olea europaea</i>	19,6%	25,0%	13,3%	9,3%	1,3%	68,6%	31,4%
<i>Fraxinus excelsior</i>	24,4%	11,7%	11,8%	9,9%	0,0%	57,8%	42,2%

**Tabla 2. Densidad básica de la madera para cada una de las especies de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de diferentes fuentes.**

Especie	Densidad básica (g/cm <sup>3</sup> )
<i>Pinus halepensis</i>	0,386
<i>Pinus nigra</i>	0,482
<i>Pinus pinaster</i>	0,455
<i>Pinus pinea</i>	0,488
<i>Pinus sylvestris</i>	0,437
<i>Populus euramericana</i>	0,362
<i>Quercus ilex</i>	0,745
<i>Quercus faginea</i>	0,634
<i>Quercus suber</i>	0,668
<i>Juniperus phoenicia</i>	0,506
<i>Juniperus oxycedrus</i>	0,505
<i>Ceratonia siliqua</i>	0,633
<i>Olea europaea</i>	0,761
<i>Fraxinus excelsior</i>	0,552

**Tabla 3. Porcentajes obtenidos de los valores modulares de biomasa seca (Kg anhidros) de las distintas fracciones de biomasa para pies con un diámetro medio de 5 cm según Montero *et al.* (2005). Fuente: Elaboración propia.**

Especie Nombre Cient.	Biomasa Aérea					Biomasa Radical	
	Fuste	Ramas			Hojas		Total
		R >7cm	R 2-7cm	R <2cm			
<i>Pinus halepensis</i>	43,6%	0,0%	7,3%	29,1%	0,0%	80,0%	20,0%
<i>Pinus nigra</i>	44,7%	0,0%	2,2%	29,8%	0,0%	76,6%	23,4%
<i>Pinus pinaster</i>	56,8%	0,0%	2,7%	13,5%	0,0%	73,0%	27,0%
<i>Pinus pinea</i>	32,4%	0,0%	13,2%	30,9%	8,8%	85,3%	14,7%
<i>Pinus sylvestris</i>	29,2%	0,0%	10,4%	27,1%	18,8%	85,4%	14,6%
<i>Populus euramericana</i>	45,0%	0,0%	2,5%	25,0%	10,0%	82,5%	17,5%
<i>Quercus ilex</i>	15,8%	0,0%	10,5%	7,9%	2,0%	36,2%	63,8%
<i>Quercus faginea</i>	31,5%	0,0%	11,1%	11,1%	7,4%	61,1%	38,9%
<i>Quercus suber</i>	35,7%	0,0%	16,7%	2,4%	2,4%	57,1%	42,9%
<i>Juniperus phoenicia</i>	-	-	-	-	-	63,8%	36,2%
<i>Juniperus oxycedrus</i>	-	-	-	-	-	62,1%	37,9%
<i>Ceratonia siliqua</i>	16,8%	0,0%	8,4%	12,0%	8,4%	45,5%	54,5%
<i>Olea europaea</i>	32,8%	0,0%	22,1%	17,2%	2,5%	74,6%	25,4%
<i>Fraxinus excelsior</i>	27,1%	0,0%	5,1%	15,3%	0,0%	47,5%	52,5%

**Tabla 4. Porcentaje de BRF en pies mayores según el estado de la masa a partir de datos de Montero *et al.* (2005). Fuente: elaboración propia.**

Especie	BRF latizal	BRF fustal
<i>Pinus halepensis</i>	76,4%	29,6%
<i>Pinus nigra</i>	80,4%	23,9%
<i>Pinus pinaster</i>	77,9%	15,0%
<i>Pinus pinea</i>	84,5%	30,3%
<i>Pinus sylvestris</i>	78,6%	20,0%
<i>Quercus ilex</i>	65,4%	22,8%
<i>Quercus faginea</i>	68,4%	18,6%

**Tabla 5. Porcentaje de BRF en pies menores. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Montero et al. (2005).**

<b>Especie</b>	<b>BRF</b>
<i>Pinus halepensis</i>	80,0%
<i>Pinus nigra</i>	76,6%
<i>Pinus pinaster</i>	73,0%
<i>Pinus pinea</i>	85,3%
<i>Pinus sylvestris</i>	85,4%
<i>Quercus ilex</i>	36,2%
<i>Quercus faginea</i>	61,1%
<i>Quercus suber</i>	57,1%



## Anexo 2. Distritos bioenergéticos

### 2.1. Alt Túría

Tabla 6. Zona de gestión Alt Túría.

Zona de gestión	Possible ubicación de la planta	Municipio	BRF (t/año)	BRA (t/año)
Alt Túría	Titaguas	Ademúz	400,55	3.171,20
		Alpuente	804,42	5.244,20
		Aras de los Olmos	818,14	3.795,20
		Calles	255,26	1.483,50
		Casas Altas	32,90	1.371,40
		Casas Bajas	49,16	1.324,30
		Castielfabib	557,50	844,20
		Chelva	2.089,24	3.843,80
		La Yesa	652,63	1.368,80
		Puebla de San Miguel	515,56	64,10
		Titaguas	999,27	2.270,50
		Torrebaja	11,20	51,00
		Tuéjar	1.432,23	2.480,10
		Vallanca	207,00	2.221,10
		<b>8.788,06</b>	<b>29.533,40</b>	



Figura 1. Situación geográfica de los municipios agrupados bajo la zona de gestión de biomasa Alt Túría.

## 2.2. La Mola de Cortes

Tabla 7. Zona de gestión La Mola de Cortes.

Zona de gestión	Posible ubicación de la planta	Municipios	BRF (t/año)	BRA (t/año)
La Mola de Cortes	Cofrentes	Cofrentes	1.048,01	4.270,40
		Cortes de Pallás	941,25	2.202,90
		Dos Aguas	25,84	1.017,40
		Jalance	852,61	2.518,40
		Jarafuel	841,71	3.175,20
		Millares	57,21	737,30
		Yátova	328,10	1.375,10
				<b>4.094,73</b>

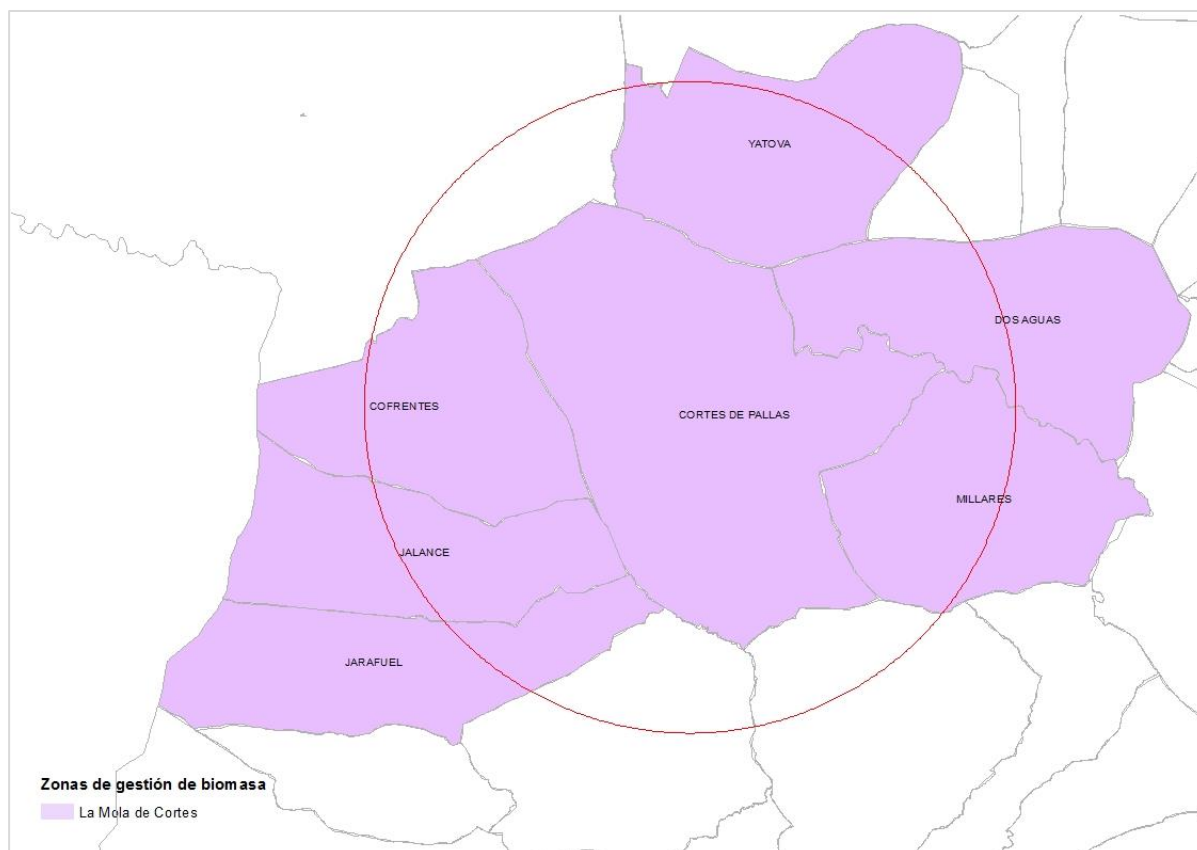


Figura 2. Situación geográfica de los municipios agrupados bajo la zona de gestión de biomasa La Mola de Cortes.

## 2.3. Vall d'Ayora

Tabla 8. Zona de gestión Vall D'Ayora.

Zona de gestión	Possible ubicación de la planta	Municipios	BRF (t/año)	BRA (t/año)
Vall d'Ayora	Ayora	Ayora	4.334,36	7.603,20
		Bicorp	949,10	1.054,90
		Quesa	417,28	946,70
		Teresa de Cofrentes	393,15	1.770,00
		Zarra	440,58	1.379,20
			<b>6.534,47</b>	<b>12.754,00</b>

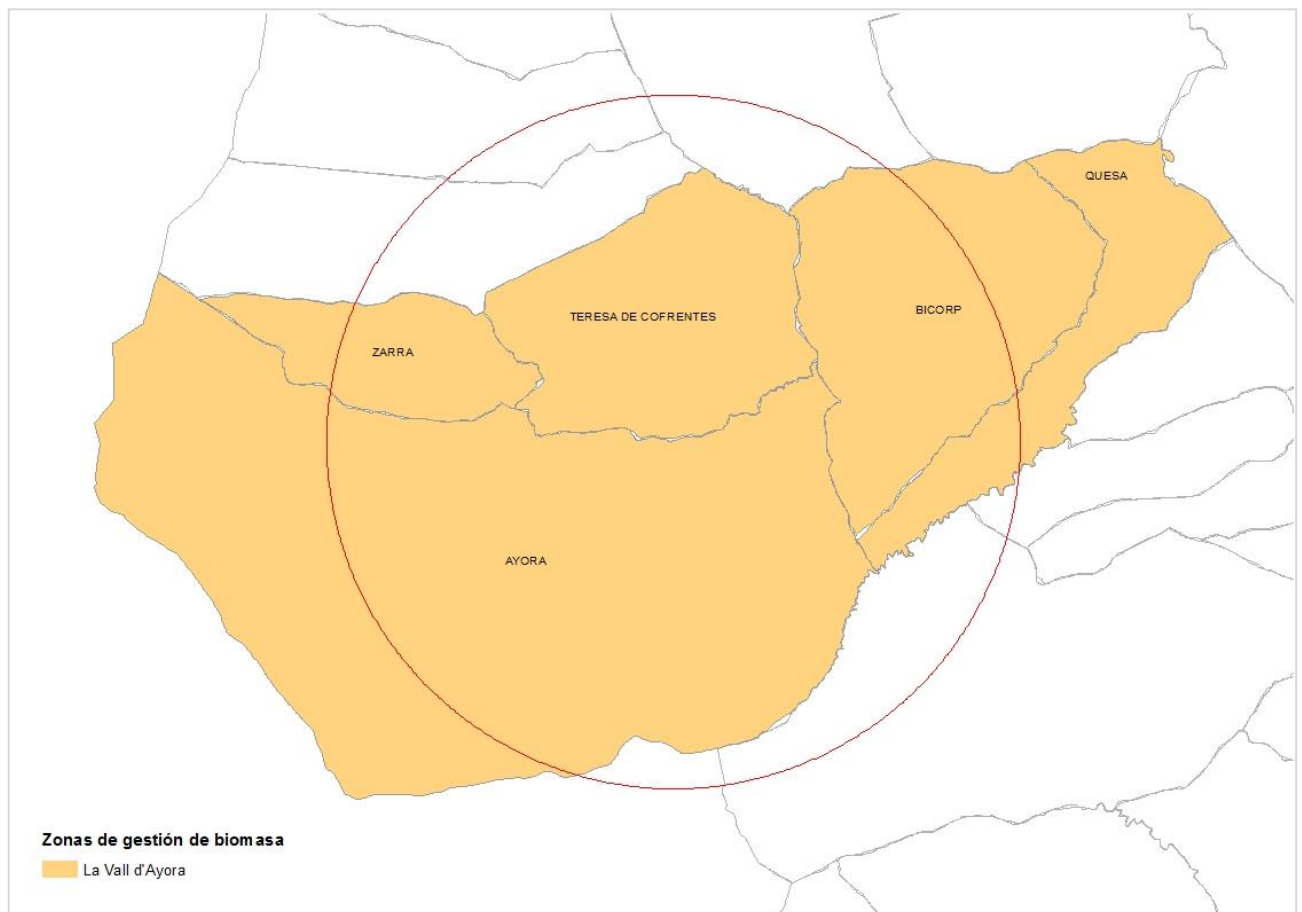


Figura 3. Situación geográfica de los municipios agrupados bajo la zona de gestión de biomasa Vall d'Ayora.

## 2.4. Meseta Utiel-Requena

Tabla 9. Zona de gestión Meseta Utiel- Requena.

Zona gestión de	Posible ubicación de la planta	Municipios	BRF (t/año)	BRA (t/año)
Meseta Utiel-Requena	Venta del Moro	Requena	7.015,41	102.791,50
		Venta del Moro	3.257,44	33.473,70
		Villagordo del Cabriel	587,33	8.560,10
			<b>10.860,18</b>	<b>144.825,30</b>

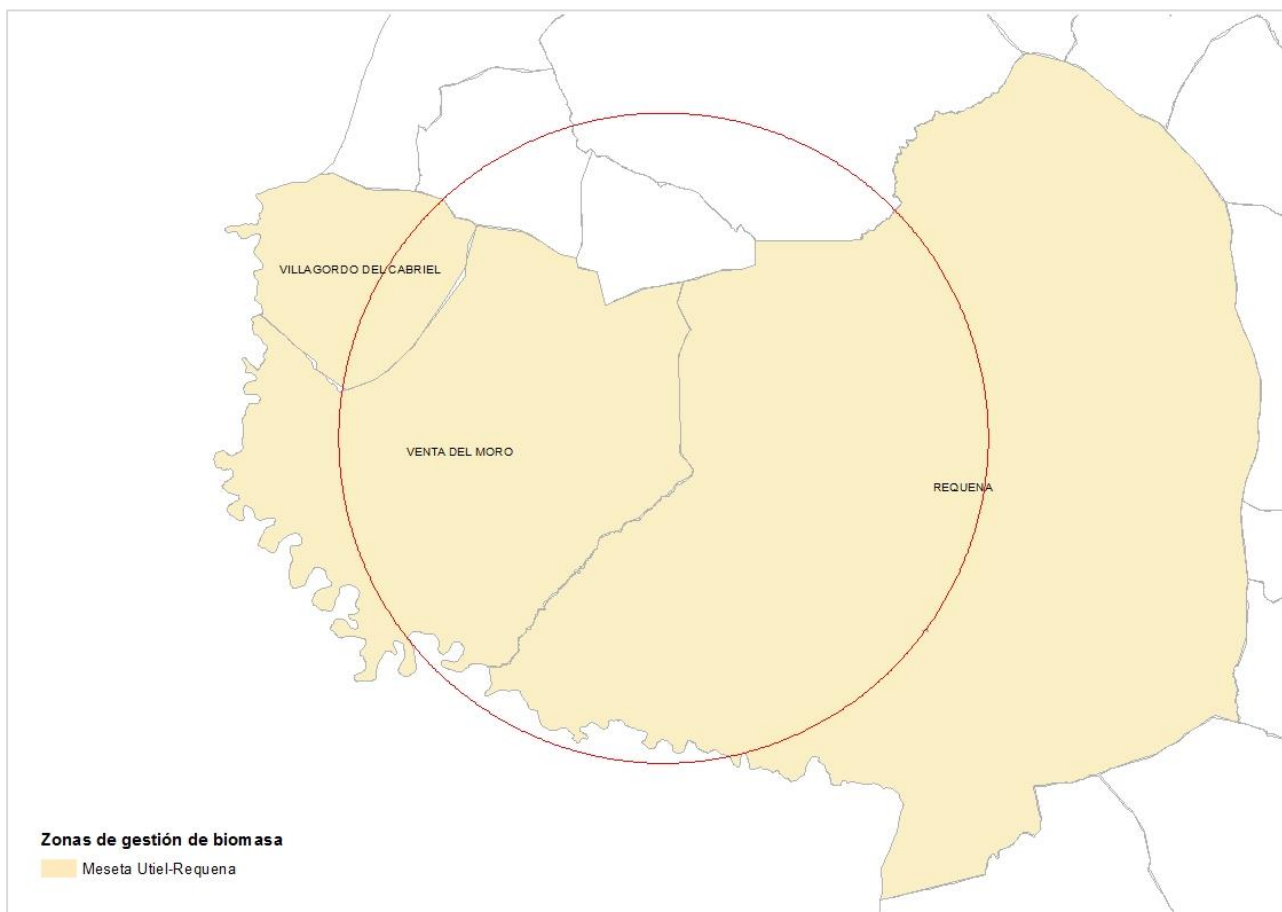


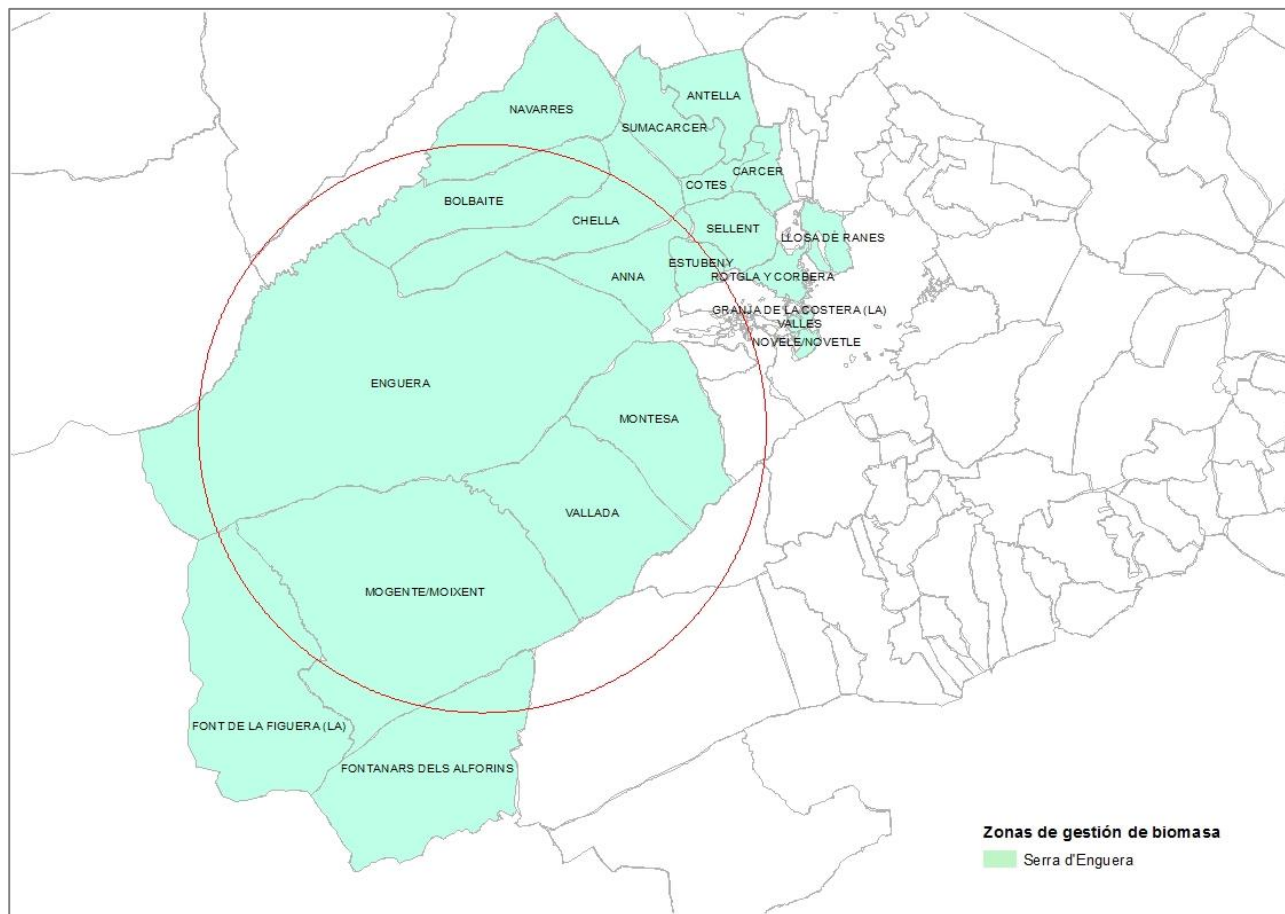
Figura 4. Situación geográfica de los municipios agrupados bajo la zona de gestión de biomasa Meseta Utiel-Requena.



## 2.5. Serra d'Enguera.

Tabla 10. Zona de gestión Serra d'Enguera

Zona de gestión	Posible ubicación de la planta	Municipios	BRF (t/año)	BRA (t/año)
Serra d'Enguera	Enguera	Alcántara del Xúquer	1,57	492,00
		Anna	25,04	1.768,40
		Antella	1,58	1.331,80
		Bolbaite	477,38	1.807,70
		Càrcer	0,74	1.194,00
		Cerdá	0,00	57,60
		Chella	404,11	2.533,20
		Cotes	0,13	557,70
		Enguera	1.488,86	4.566,70
		Estubeny	13,23	486,30
		Fontanars dels Alforins	747,04	8.203,20
		La Font de la Figuera	807,86	7.136,90
		La Granja de la Costera	0,00	120,10
		Llanera de Ranes	15,17	796,00
		Llosa de Ranes	19,69	315,80
		Moixent	616,54	5.394,50
		Montesa	18,02	2.975,80
		Navarrés	237,31	1.429,80
		Novetlé	0,26	117,10
		Rotglà i Corberà	1,54	590,50
		Sellent	8,51	979,60
		Sumacàrcer	43,93	1.152,20
Torrella	0,00	137,60		
Vallada	27,08	2.368,00		
Vallés	0,00	161,40		
			<b>4.955,59</b>	<b>46.673,90</b>



**Figura 5. Situación geográfica de los municipios agrupados bajo la zona de gestión de biomasa Serra d'Enguera.**

## 2.6. Serra d'Utiel

Tabla 11. Zona de gestión Serra d'Utiel.

Zona de gestión	Possible ubicación de la planta	Municipios	BRF (t/año)	BRA (t/año)
Serra d'Utiel	Utiel	Benagéber	1.098,21	438,70
		Camporrobles	142,82	13.016,00
		Caudete de las fuentes	77,80	9.207,00
		Fuenterrobles	19,72	10.283,60
		Sinarcas	1.529,09	6.556,30
		Utiel	1.736,93	41.241,20
			<b>4.604,57</b>	<b>80.742,80</b>

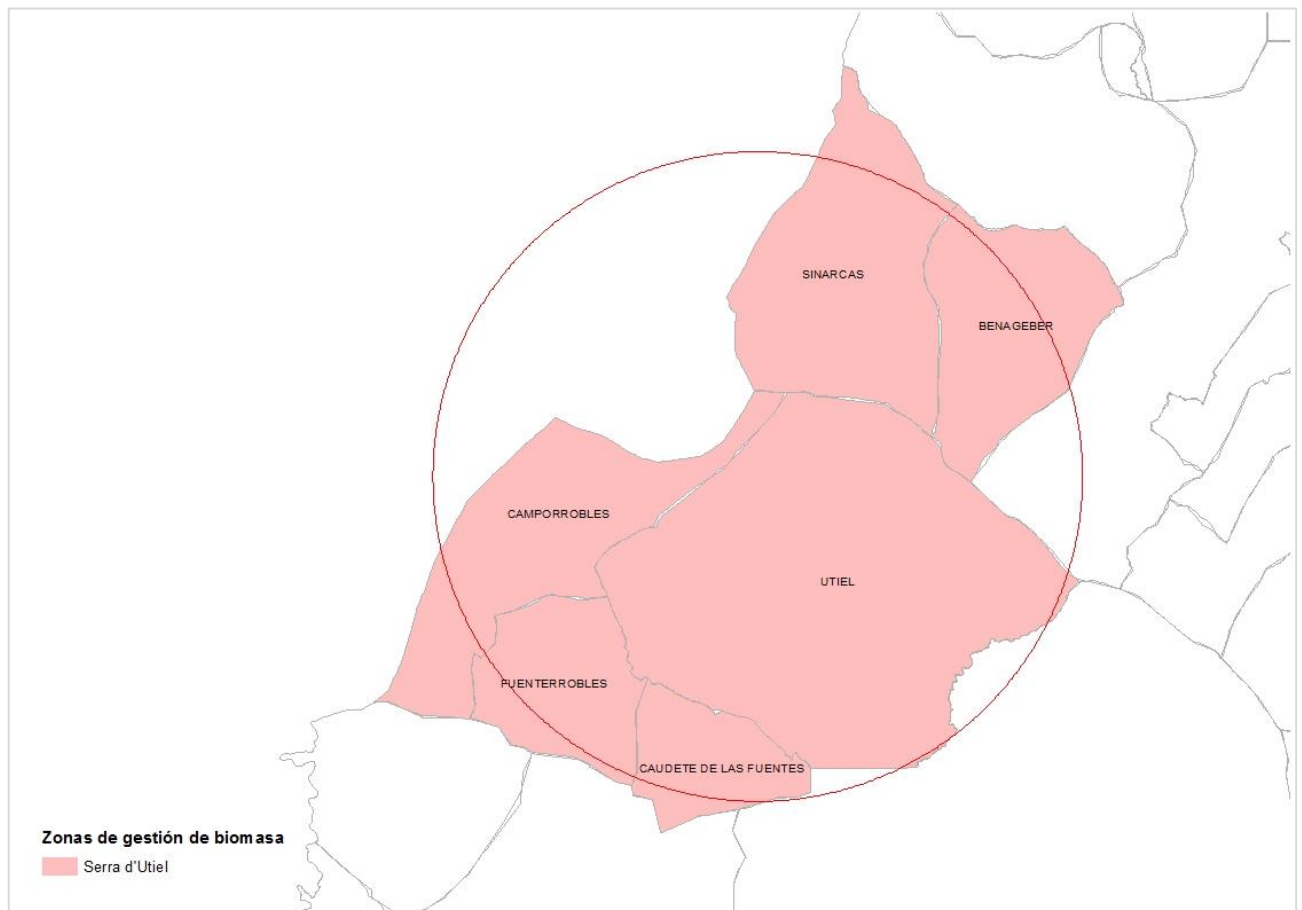
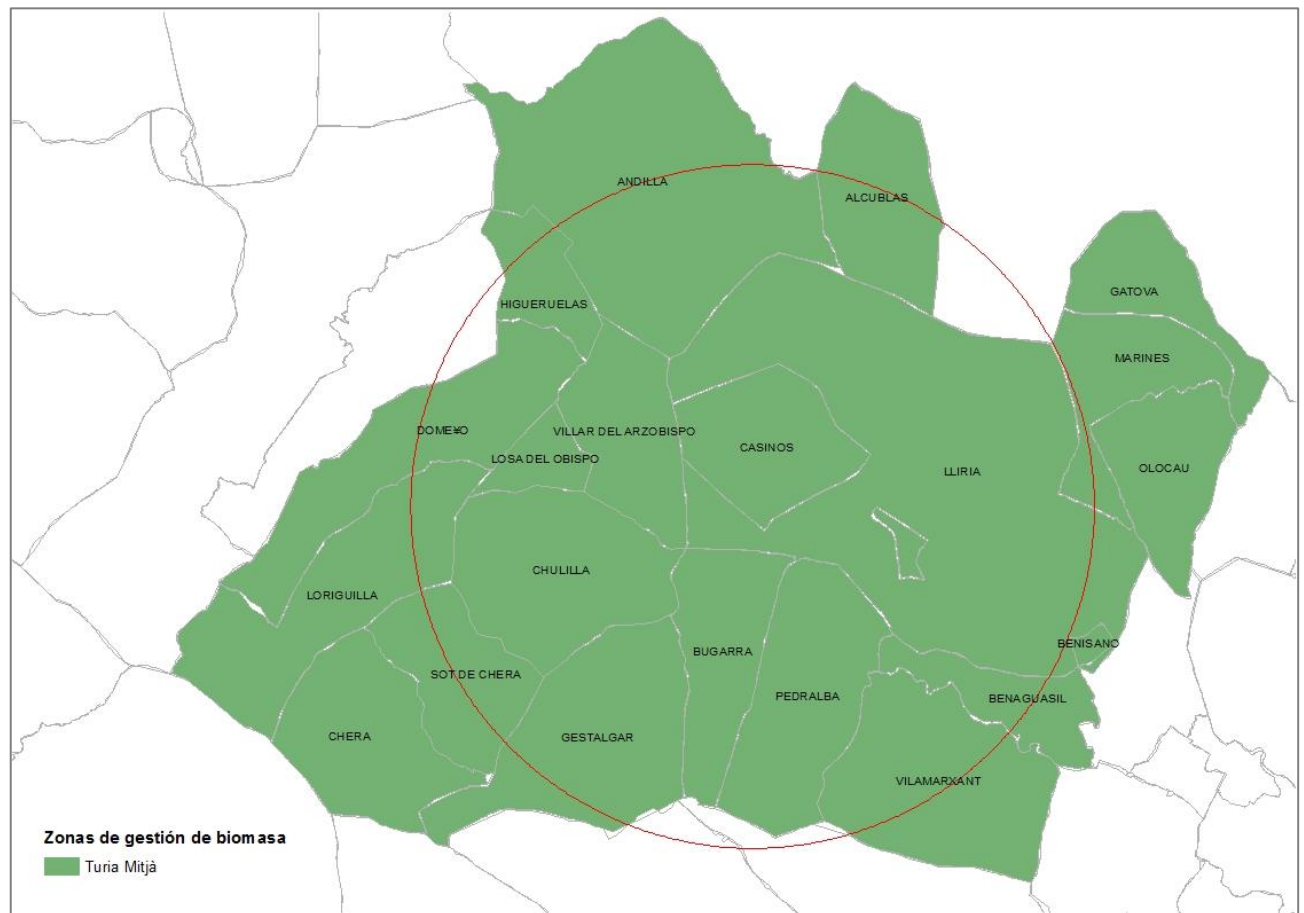


Figura 6. Situación geográfica de los municipios agrupados bajo la zona de gestión de biomasa Serra d'Utiel.

## 2.7. Túria Mitjà

Tabla 12. Zona de gestión Túria Mitjà

Zona de gestión	Posible ubicación de la planta	Municipio	BRF (t/año)	BRA (t/año)
Túria Mitjà	Casinos	Alcublas	218,86	3.020,50
		Andilla	1.221,85	3.565,80
		Benaguacil	28,86	1.864,00
		Benissanó	0,00	112,60
		Bugarra	73,14	1.011,70
		Casinos	183,59	5.369,00
		Chera	32,81	2.115,90
		Chulilla	86,51	2.421,90
		Domeño	116,49	939,60
		Gátova	125,22	2.069,40
		Gestalgar	68,91	734,20
		Higueruelas	86,23	1.323,80
		Llíria	1.717,02	16.176,10
		Loriguilla	104,35	708,00
		Losa del Obispo	8,22	529,90
		Marines	143,21	129,60
		Olocau	226,75	1.388,70
		Pedralba	81,38	4.456,20
		Sacañet	187,47	234,00
		Sot de Chera	18,70	779,10
		Vilamarxant	284,47	7.227,30
Villar del Arzobispo	6,34	4.745,50		
			<b>5.020,38</b>	<b>60.922,80</b>



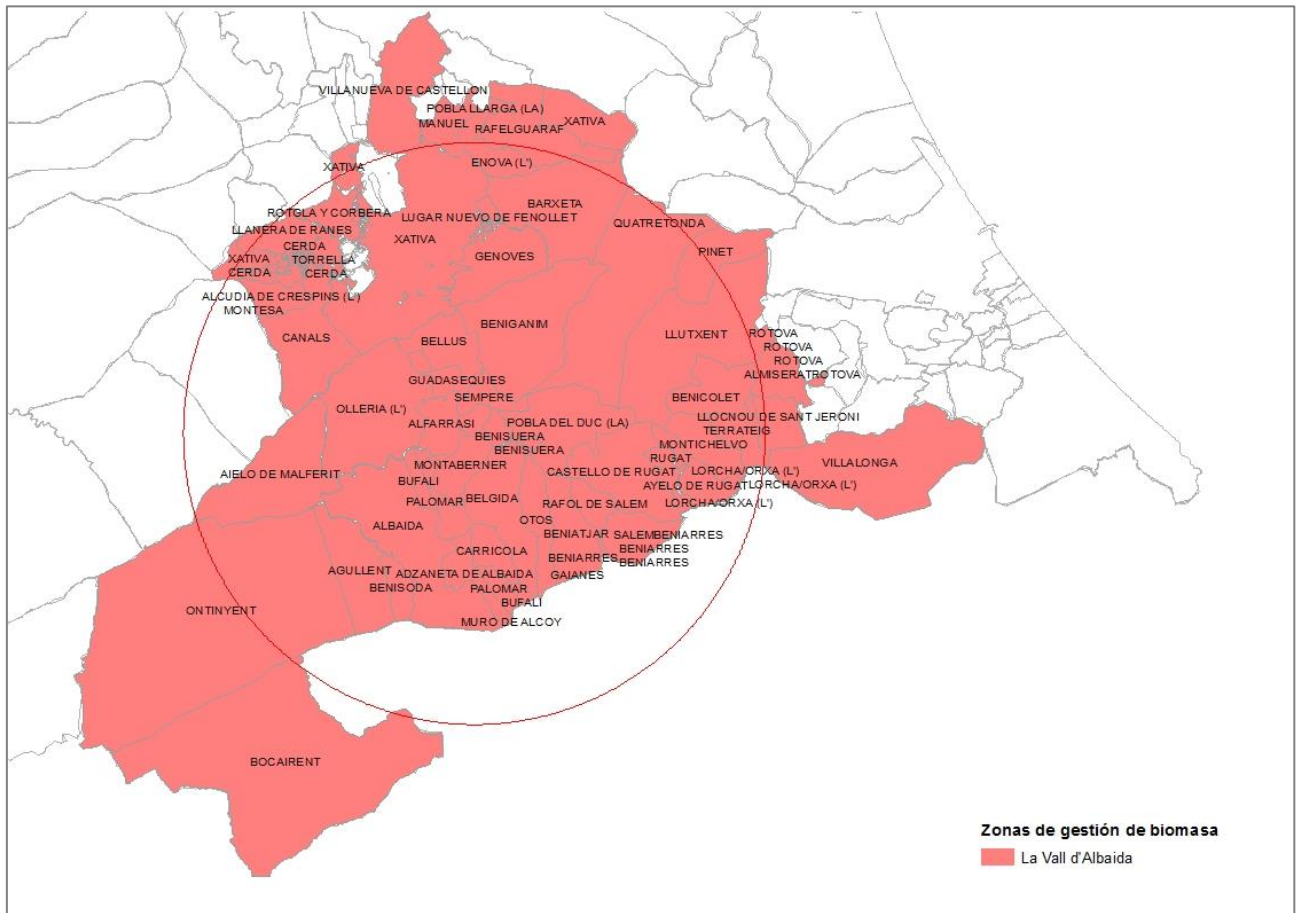
**Figura 7. Situación geográfica de los municipios agrupados bajo la zona de gestión de biomasa Túrria Mitjà.**

## 2.8. Vall d'Albaida

**Tabla 13. Zona de gestión Vall d'Albaida**

Zona de Gestión	Planta	Municipio	BRF (t/año)	BRA (t/año)
Vall d'Albaida	Montaverner	Agullent	30,00	968,70
		Aielo de Malferit	17,67	369,80
		Aielo de Rugat	6,74	142,30
		Albaida	11,86	2.143,90
		Alcúdia de Crespins (l')	5,57	272,80
		Alfarrasí	0,28	798,00
		Almiserà	24,18	379,70
		Atzeneta d'Albaida	4,30	254,30
		Barxeta	110,64	1.875,60

		Bellús	21,22	482,80
		Beniarrés	7,85	1.391,60
		Beniatjar	16,64	828,90
		Benicolet	7,79	660,00
		Benigànim	84,96	1.285,60
		Benissoda	1,56	143,80
		Benisuera	0,06	263,30
		Bocairent	727,94	1.328,50
		Bufali	1,85	233,10
		Canals	16,22	1.847,10
		Carrícola	0,00	332,40
		Castelló de Rugat	15,78	1.031,70
		Gaianes	1,33	641,60
		Genovés	23,61	1.033,30
		Guadasequies	0,14	272,20
		Llocnou d'En Fenollet	0,00	189,40
		Llocnou de Sant Jeroni	25,19	329,70
		Llutxent	16,57	1.943,60
		Lorcha/Orxa (l')	16,61	294,50
		Manuel	11,68	718,80
		Montaverner	0,00	560,90
		Montitxelvo/Montichelvo	14,61	325,10
		Muro de Alcoy	29,01	1.579,60
		Olleria (l')	57,51	1.462,60
		Ontinyent	192,31	4.994,90
		Otos	0,95	987,00
Vall d'Albaida	Montaverner	Palomar (el)	3,33	444,60
		Pobla del Duc (la)	1,88	1.173,50
		Quatretonda	66,09	1.255,40
		Rafelguaraf	25,40	1.656,60
		Rugat	3,64	179,00
		Ràfol de Salem	11,24	246,30
		Salem	20,11	285,30
		Sempere	0,00	234,30
		Terrateig	16,96	336,40
		Villanueva de Castellón	9,24	2.925,70
		Xàtiva	192,64	5.114,00
		Ènova (l')	5,22	874,70
		<b>1.858,38</b>	<b>47.092,90</b>	



**Figura 8. Situación geográfica de los municipios agrupados bajo la zona de gestión de biomasa Vall d'Albaida.**





## *Anexo 3. Estado del MUP V074 –“Navalón”*

---

### **3.1. Estado legal**

#### **3.1.1. Ubicación y límites**

Los límites administrativos del MUP V074 Navalón son los los que se muestran en la tabla 14.

**Tabla 14. Límites administrativos del MUP V074.**

<b>Punto cardinal</b>	<b>Límites</b>
Norte	MUP V-072 y Monte gestionado por GVA V-1005 y T.M. de Ayora
Sur	MUP V-077 y T.M. de la Font de la Figuera
Este	MUP V-3002V072
Oeste	T.M. de Almansa

**Tabla 15. Parajes limítrofes del MUP V074.**

<b>Punto cardinal</b>	<b>Paraje existente en el linde</b>
Norte	El Espino; Lomas de Úbeda y Loma de la Cornicabra
Sur	Lloret; El Teiraico; Els Prats; Pla de l'Organista, Lloma de la Figuera; l'Escudero; Alt de la Simeta; Los Brunales
Este	Provincia de Albacete; La Cañada de Juncán, Umbría Negra, Altos de Salamon; Alto de las Muelas; Alto de la Rosa y El Espinet
Oeste	Loma de la Capona; Loma de la Capitania; Umbría de Pepe Tono; Solana de las Perdices

#### **3.1.2. Derechos de propiedad. Pertenencia**

El MUP V074 “Navalón” pertenece al Ayuntamiento de Enguera. Dispone de una superficie pública de 2.870,73 ha de una superficie total de 5.015 Ha.

### 3.1.3. Uso, disfrute y costumbres vecinales

#### a) Caza y espacios cinegéticos

El MUP donde se encuentran enclavadas nuestras parcelas pertenece al coto de caza V-10110 perteneciente al Término Municipal de Enguera, con una superficie total de 21.981 ha. En dicho coto de caza destaca la caza menor fundamentalmente, y el jabalí dentro de las especies de caza mayor.

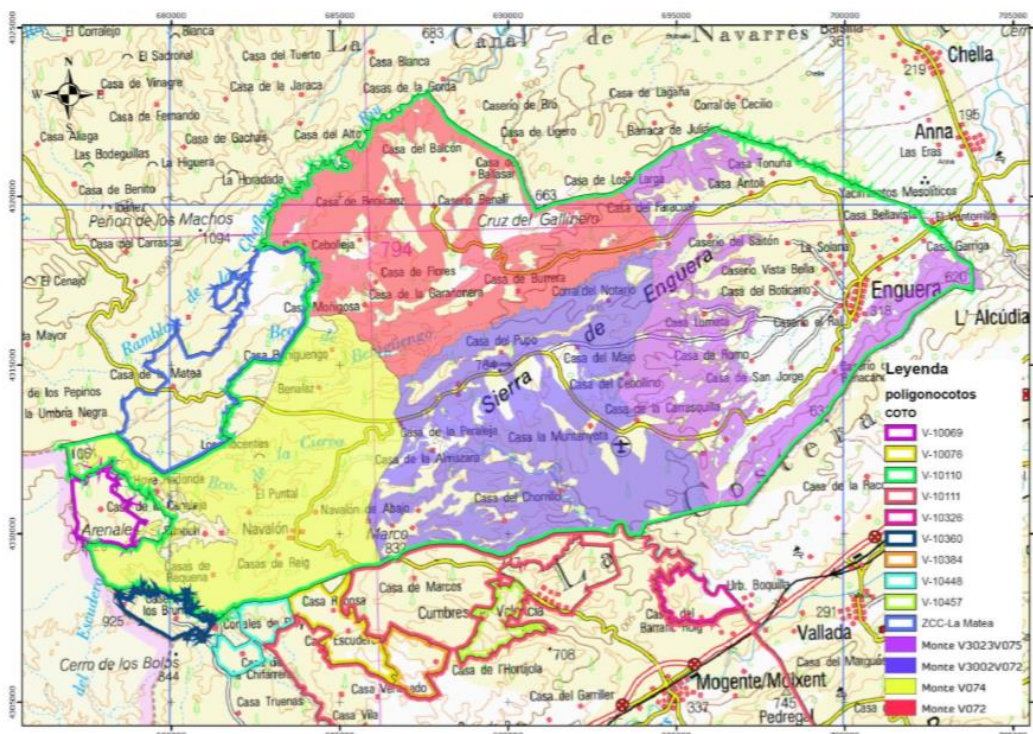


Figura 9. Cotos de caza en el TM de Enguera. Fuente: Ingeniería y consultoría ambiental RADINGANORUM

#### b) Senderos y áreas recreativas

No existen senderos que discurran por el monte objeto de estudio. Sin embargo, existe una área recreativa y zona de acampada llamada "Las Arenas" en el MUP V074 "Navalón".

### c) Costumbres vecinales

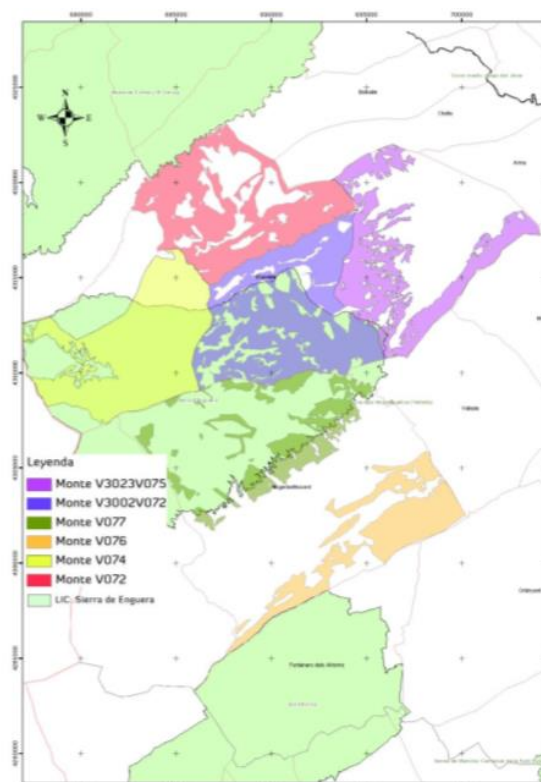
Dentro de las costumbres vecinales se encuentra la caza, como se ha visto anteriormente, tanto en la zona de estudio como los territorios adyacentes se encuentran dentro de distintos cotos de caza.

Otra de las costumbres a destacar es la recogida de setas en otoño, hecho que se ha podido comprobar en las distintas visitas que se han hecho a las parcelas. Actualmente Enguera cuenta con un aprovechamiento de setas controlado en alguno de sus montes, con el fin de conservar el medio y la sostenibilidad del recurso.

### 3.1.4. Limitaciones y servidumbres

#### a) Espacios naturales protegidos

Afectando al MUP V074 existe un Lugar de Interés Comunitario (LIC) denominado "Sierra de Enguera". Este LIC, de código ES5233045, presenta una superficie de 17.323,77 Ha y se encuentra a 38º 53' 52" de latitud y 0º 50' 14" de longitud (W/E Greenwich).



**Figura 10. LIC Sierra de Enguera. Fuente: Ingeniería y consultoría ambiental RADINGANORUM.**

**b) Vías pecuarias**

El MUP V074 se encuentra atravesado por una cañada y una colada tal y como muestra figura 11.

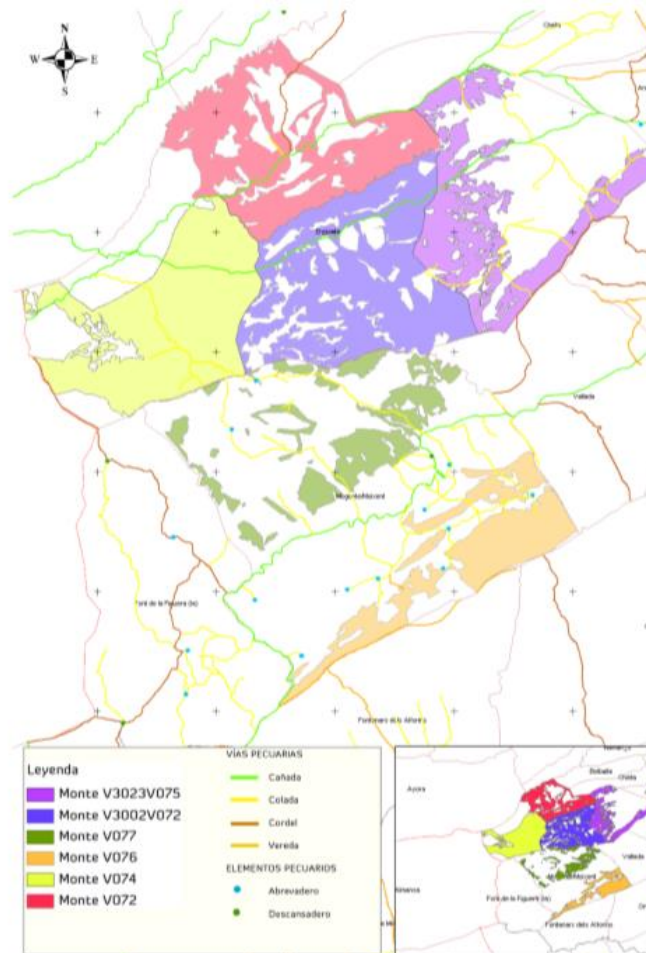


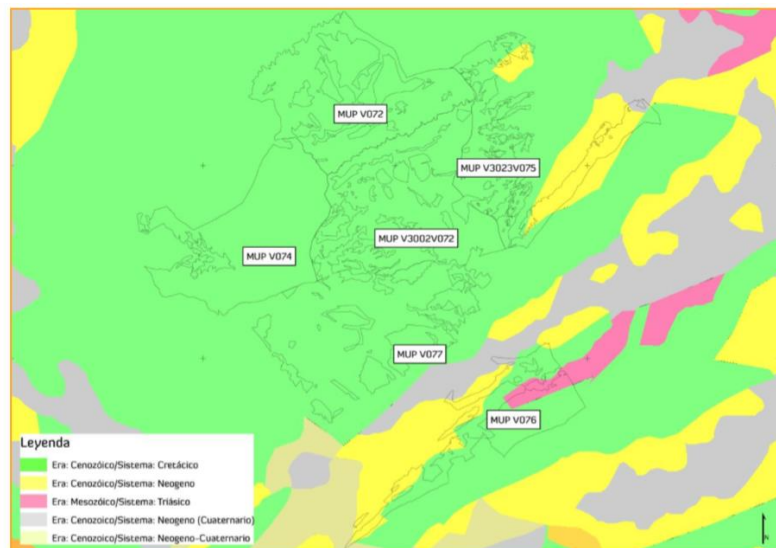
Figura nº15. Vías pecuarias en los MUP objeto de estudio  
Fuente. Ingeniería y consultoría ambiental RADINGANORUM.

**Figura 11. Vías pecuarias en el MUP V074 . Fuente: Ingeniería y consultoría ambiental RADINGANORUM.**

## 3.2. Estado natural

### 3.2.1. Geología

Todos los MUPs pertenecientes a Enguera están encuadrados dentro de la Era Cenozoica donde predomina el Sistema Cretácico.

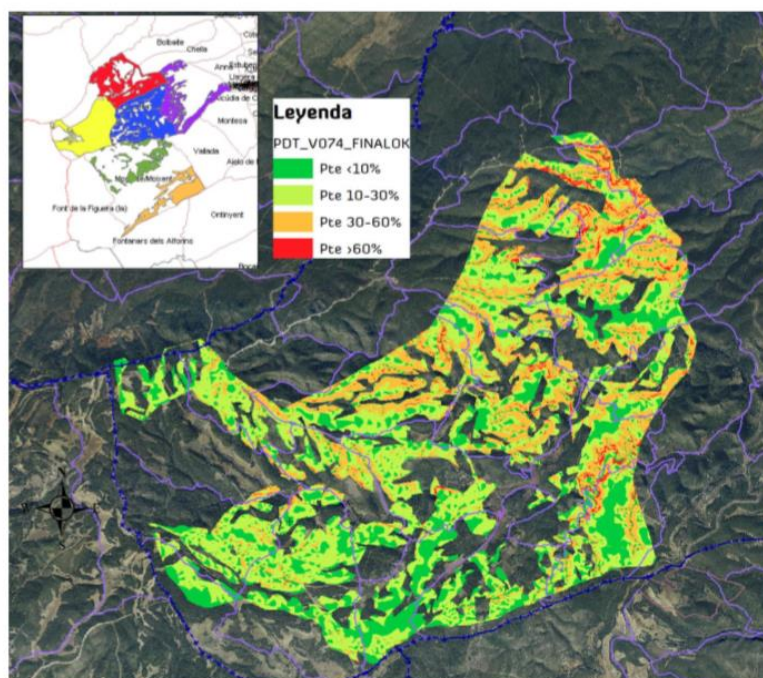


**Figura 12. Distribución de las eras y sistemas geológicos en la zona de estudio. Fuente: WMS Geology del Instituto Geológico y Minero de España.**

### 3.2.2. Geomorfología

Desde el punto de vista de las pendientes existentes, el MUP V074 Navalón constituye un monte muy heterogéneo en que las zonas de igual pendiente son relativamente pequeñas, existiendo mucha dispersión. La mayor parte de su superficie se encuentra entre 10-30% de pendiente, distribuyéndose la altura entre los 750-1050 m sobre el nivel del mar.

En la siguiente imagen se muestra la distribución de las pendientes en este monte,



**Figura 13. Pendientes del MUP V074. Fuente: Ingeniería y consultoría ambiental RADINGANORUM.**

### **3.2.3. Litología**

En la zona al igual que más del 95% del territorio de la Comunidad Valenciana, está formada por rocas sedimentarias.

La cartografía empleada clasifica a las rocas sedimentarias en función de si son rocas consolidadas o no lo son (rocas no consolidadas). A partir de aquí la identificación de las diferentes litologías se ajusta a la naturaleza de las rocas y su expresión cartográfica contempla la representación individual de los términos litológicos o bien de forma asociada, ya se trate de una alternancia o de una mezcla homogénea.

Concretamente, en el MUP V074 predominan las dolomías, seguidas por calcáreas y margas así como algunas arenas y arcillas.

La distribución de las unidades litológicas en la zona de estudio es la que muestra la figura 14.

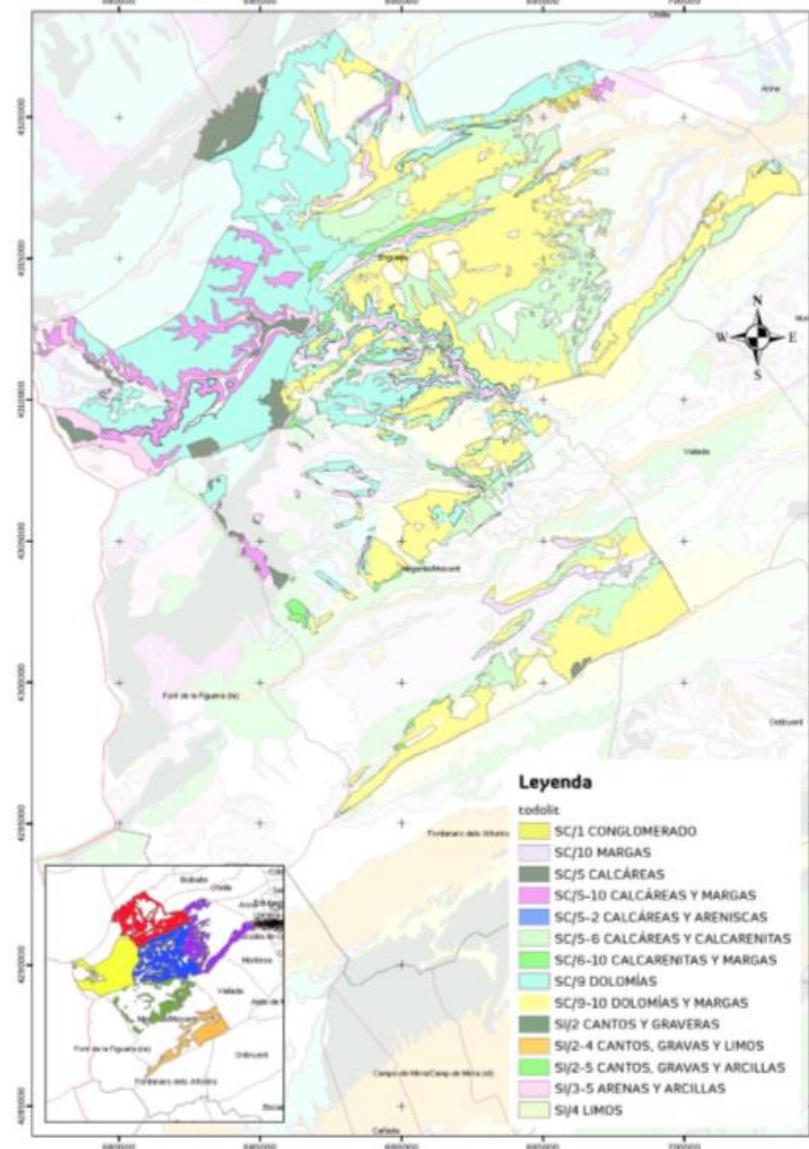


Figura 14. Unidades litológicas.

Figura 14. Unidades litológicas. Fuente: Cartografía Temática de la Comunidad Valenciana (1/50.000).

### 3.2.4. Climatología

Para el estudio de los datos climáticos se ha utilizado la estación termopluiométrica de Enguera- La Matea, pues es la más cercana a la zona de estudio, además, su carácter forestal hace que los datos de los que dispone sean razonablemente representativos de la zona de estudio.

Los datos disponibles corresponden a un muestreo de 22 años ( 1948-1969). La estación está situada a 826 metros de altitud sobre el nivel del mar, altitud que corresponde de forma aproximada con la que nos encontramos en la zona de estudio.

**Tabla 16. Características climáticas. Fuente: [www.globalbioclimatics.org](http://www.globalbioclimatics.org)**

Mes	E	F	M	A	M	J	JL	Ag	S	O	N	D	Año
Tm	7,6	8,3	10,2	12	16,2	19,7	23,1	23,4	20	15,1	11,1	8,5	14,6
TmMax	10,9	12,1	14,4	16,4	21,2	24,7	29	29,3	24,9	19,1	14,7	11,8	19
TmMin	4,4	4,6	6,1	7,6	11,2	14,7	17,3	17,6	15,2	11,2	7,6	5,2	10,2
TMax	17,6	18,2	20	21,2	23,8	29,8	33	32	29,3	22,8	19,1	17,1	23,7
TMin	-0,3	-1,1	1,5	3,6	6,7	9,6	13,6	13,9	11,4	6,5	3,4	0,9	5,8
P	47	47	47	59	53	23	5	19	24	88	47	57	516

siendo,

Tm, temperatura media (°C)

TmMax, media de las máximas (°C)

TmMin= media de las mínimas (°C)

Tmax, temperatura diaria máxima(°C)

Tmin, temperatura diaria mínima (°C)

P, precipitaciones medias (mm)

La temperatura media anual de la zona de estudio es de 14'6°C, la media de las máximas tiene un valor de 19' 6°C y y 10'2°C es el valor de la media de las mínimas. La media de las precipitaciones anuales asciende a 516 mm.

Hasta mediados de abril las precipitaciones superan a la evapotranspiración. Desde este momento hasta el mes de octubre la evapotranspiración supera a las precipitaciones. Los tres meses más secos son julio, agosto y septiembre, coincidiendo julio con el mes de menor precipitación.

Las máximas precipitaciones se alcanzan en otoño, en los meses de octubre y noviembre. Existe otro pico primaveral de menor envergadura pero también importante.



### a) Índices ombroclimáticos

#### Índice de Aridez de Martonne

Para la medición de la aridez se usan distintos índices, uno de los más comúnmente usado es el Índice de Aridez de Martonne, dicho índice utiliza la precipitación media anual en milímetros y la temperatura media anual en grados centígrados para caracterizar el tipo de clima según la aridez.

$$I_A = \frac{P}{(T+10)}$$

donde,

IA, índice de aridez  
P, precipitación media anual (mm)  
T, temperatura media anual (°C)

**Tabla 17. Tipos de clima según el índice de aridez de Martonne.**

Índice de Martonne	Tipo de clima
<5	Clima hiperárido o desértico
5-10	Árido o subdesértico
10-20	Semiárido, estepa o mediterráneo
20-40	Intermedio o subhúmedo
40-60	Húmedo u oceánico

Así pues, aplicando los datos correspondientes a nuestra zona de estudio, el resultado del Índice de Aridez de Martonne es el siguiente:

$$I_A = \frac{516}{14,6+10} = 20,97$$

Por lo que el clima de la zona de estudio es un clima intermedio o subhúmedo.

### Índice de Lang

Su propia definición implica la consideración conjunta de los dos parámetros medios más importantes en la definición de la climatología de un lugar, esto es, la precipitación total anual media y la temperatura anual media. Su fórmula es la siguiente:

$$I_L = \frac{P}{T}$$

donde,

IL, índice de Lang

T, temperatura media anual (°C)

P, precipitación media anual en (mm)

La clasificación establecida para este índice estima un clima más árido en la zona de estudio cuanto más bajo es el valor adoptado por el mismo. Así, valores menores de 20 corresponden a climas desérticos y mayores de 160 a zonas perhúmedas. En la siguiente tabla se expone dicha clasificación.

**Tabla 18. Tipos de clima según el índice de Lang.**

Índice de Lang	Tipo de clima
0-20	Zonas desérticas
20-40	Zonas áridas
40-60	Zonas húmedas de estepa y sabana
60-100	Zonas húmedas de bosques claros
100-160	Zonas húmedas de grandes bosques
>160	Perhúmedas con prados y tundras

Así pues, aplicando los datos correspondientes a nuestra zona de estudio, el resultado del Índice de Aridez de Lang es el siguiente:

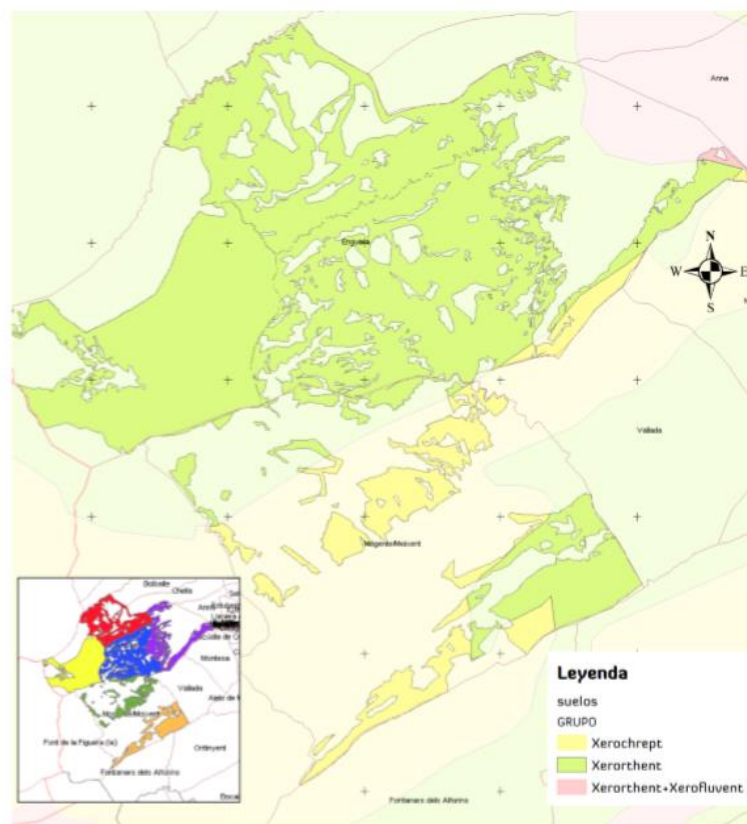
$$I_L = \frac{516}{14,6} = 35,34$$

Por lo que el clima en la zona de estudio corresponde con un clima de zona árida, existiendo cierta continentalidad.

Siguiendo la clasificación de Rivas-Martínez la zona de estudio se encuadra dentro del piso mesomediterráneo. Las temperaturas son relativamente suaves, siendo altas en el periodo estival y suaves en invierno, aunque pueden darse heladas invernales estas son poco acusadas y se dan en mayor medida en la zona de Enguera.

### 3.2.5. Edafología

El suelo predominante en el MUP V074 pertenece al orden entisoles, concretamente a los xerorthents.



**Figura 16. Edafología de la zona de estudio. Fuente: Cartografía Temática de la Comunidad Valenciana (ICV, 1/50.000).**

Según la Soil Taxonomy (USDA 2010) un Entisol se define como los suelos que no muestran ningún desarrollo definido de perfiles. Un Entisol no tiene "horizontes diagnósticos", y la mayoría están constituidos básicamente por su material parental regolítico inalterado. Los Entisoles se caracterizan por ser suelos muy recientes, poco desarrollados que emergen sobre material original no consolidados. Los Xerorthent son entisoles cuyo suborden pertenece a los orthents en régimen de humedad xérico.

El suborden Orthents hace referencia a la formación sobre superficies erosionadas recientemente, es decir, el suelo que nos ocupa, o son muy recientes o se han formado con ayuda de las transformaciones ejercidas por el hombre al romper pendientes pronunciadas mediante la instauración de terrazas. Por último mencionar que el régimen de humedad Xérico es el característico de muchos puntos del clima mediterráneo.

### **3.2.6. Hidrología**

El MUP V074 Navalón está recorrido por el Barranco de las Cuevas, aunque no representa un cauce de gran tamaño.

El total de la zona de estudio queda enmarcada en la unidad hidrogeológica 8.28 Caroché Sur, esta unidad pertenece a la cuenca hidrográfica del Júcar. El MUP objeto de estudio se asienta sobre el acuífero Caroché Sur.

### **3.2.7. Flora**

#### **a) Vegetación potencial**

Siguiendo las series de vegetación potencial de la zona de estudio pertenece a la serie 22B de Rivas Martínez (1987). Se trata de la serie mesomediterránea manchega y aragonesa basófila de la encina, *Quercus rotundifolia* (*Bupleurum rigidi* – *Querceto rotundifoliae* s.). Esta serie culmina en un bosque denso e impenetrable con un estrato arbolado dominado por la carrasca (*Quercus ilex* subsp. *rotundifolia*), acompañada por madroño (*Arbutus unedo*), labiérnago (*Phillyrea angustifolia*), aladierno (*Rhamnus alaternus*), espino negro (*Rhamnus lycioides*) y el lentisco (*Pistacea lentiscus*). En zonas de suelos frescos con hidromorfía aparecen especies como el mirto (*Myrtus communis*), *Genista patens*, *Bupleurum fruticosum*, boj (*Buxus sempervirens*) y en zonas de umbría con suelos más profundos aparecen especies como el labiérnago (*Phillyrea latifolia*), cornicabra (*Pistacea terebinthus*), durillo (*Viburnum tinus*), morrionera (*Viburnum lantana*) y el quejigo (*Quercus faginea*). Como etapa de degradación aparecen coscojares y posteriormente romerales y tomillares dominados por aliagas, romeros, cepell, etc.

## b) Vegetación actual

Existe una notable diferencia entre la vegetación potencial y actual en la zona de estudio. Esto se debe, entre una serie de diversos factores, a la incidencia de los incendios forestales sobre la zona. En general, domina el pinar adulto de *Pinus halepensis*, zonas de regenerado de *Pinus halepensis*, áreas con predominio de matorral heliófilo (coscojales, romerales, etc.), áreas incendiadas con regenerado muy bajo y cultivos de secano y pastizales.

### 3.3. Estado forestal

No existe ninguna ordenación previa en la zona, aunque sí existen tratamientos selvícolas, principalmente repoblaciones y podas. En la actualidad se está desarrollando la ordenación de estos montes a través del proyecto Life +09 Bioenergy and Fire Prevention.

La cubierta vegetal se encuentra en términos generales muy afectada por los incendios forestales. Existen grandes masas de regenerado post-incendio con una alta densidad de *Pinus halepensis* y extensas zonas de coscojar muy denso, dando como resultado una elevada carga de biomasa que debe reducirse para disminuir el riesgo potencial de incendio y para permitir la evolución de estas masas.



## *Anexo 4. Sistemas optimizados de aprovechamiento y logística*

---

### 4.1. Formas de cubicación

**Tabla 19. Valor de los parámetros de la función (p,q,r) según la forma de cubicación. Fuente: Inventario Forestal Nacional para la provincia de Valencia (IFN3 2008).**

Forma de cubicación	p	q	r
2	0,0010409	1,990943	0,72076
3	0,0007449	2,10045	0,2803
5	0,002453	1,8128	0,43771

**Tabla 20. Valor de los parámetros de la función (a, b, c) según la forma de cubicación. Fuente: Inventario Forestal Nacional para la provincia de Valencia (IFN3 2008).**

Forma de cubicación	a	b	c
2	-6,8	0,777372	0,0000391
3	1,43	0,6499377	0,0004087
5	-2,09	0,7429072	0,0001605

### 4.2. Homogeneidad de las parcelas. Análisis estadístico.

#### 4.2.1. Homogeneidad dasométrica de la masa

##### 4.2.1.1. *Diámetro medio de los pies por parcela*

**Tabla 21. Estadística descriptiva del diámetro (DAP, cm) medio de los pies.**

	P1	P3	P6	P7	P2	P4	P5	P8
Numero de obs.	205	178	164	109	119	183	191	163
Mínimo	5	5	5	10	5	5	5	5
Percentil 25%	10	15	15	20	15	15	15	15
Mediana	20	20	20	25	20	20	20	20
Percentil 75%	25,00	25,00	25,00	30,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Máximo	40,00	35,00	30,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00
Percentil 10%	5,00	10,00	15,00	15,00	15,00	10,00	10,00	10,00
Percentil 90%	30,00	25,00	30,00	30,00	25,00	25,00	30,00	30,00
Media (m)	18,15	19,13	20,09	23,94	19,66	19,32	20,42	20,55
Desv. estandar	9,14	6,72	6,00	5,66	6,03	5,97	6,77	6,36
Error estándar	0,64	0,50	0,47	0,54	0,55	0,44	0,49	0,50
95% inf. IC m	16,89	18,14	19,17	22,87	18,57	18,45	19,45	19,57
95% sup. del IC m	19,41	20,12	21,02	25,02	20,76	20,19	21,39	21,54
CV	50,37%	35,12%	29,88%	23,62%	30,65%	30,91%	33,17%	30,94%
Media geométrica	15,25	17,56	18,89	23,19	18,66	18,22	18,94	19,28
Sesgo	-0,01	-0,41	-0,49	-0,24	0,31	-0,09	-0,45	-0,39

**Tabla 22. ANOVA y test no paramétrico para la variable “DAP”.**

**ANOVA summary**

F	8,368
P value	< 0,0001
P value summary	****
Are differences among means statistically significant? (P < 0.05)	Yes
R square	0,04299

<b>ANOVA table</b>	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value
Treatment (between columns)	2714	7	387,7	F (7, 1304) = 8,368	P < 0,0001
Residual (within columns)	60406	1304	46,32		
Total	63119	1311			

**Data summary**

Number of treatments (columns)	8
Number of values (total)	1312

**Tabla 23. Test no paramétricos para la variable “DAP”.**

**Kruskal-Wallis test**

P value	< 0,0001
Exact or approximate P value?	Approximate
P value summary	****
Do the medians vary signif. (P < 0.05)	<b>Yes</b>
Kruskal-Wallis statistic	48,35



Dunn's multiple comparisons test	Mean rank diff,	Significant?	Summary
P1 vs. P3	-33,25	No	ns
P1 vs. P6	-75,1	No	ns
P1 vs. P7	-287,9	Yes	****
P1 vs. P2	-32,35	No	ns
P1 vs. P4	-25,83	No	ns
P1 vs. P5	-103,6	No	ns
P1 vs. P8	-104	No	ns
P3 vs. P6	-41,85	No	ns
P3 vs. P7	-254,7	Yes	****
P3 vs. P2	0,9017	No	ns
P3 vs. P4	7,418	No	ns
P3 vs. P5	-70,36	No	ns
P3 vs. P8	-70,71	No	ns
P6 vs. P7	-212,8	Yes	****
P6 vs. P2	42,76	No	ns
P6 vs. P4	49,27	No	ns
P6 vs. P5	-28,51	No	ns
P6 vs. P8	-28,85	No	ns
P7 vs. P2	255,6	Yes	****
P7 vs. P4	262,1	Yes	****
P7 vs. P5	184,3	Yes	***
P7 vs. P8	184	Yes	**
P2 vs. P4	6,516	No	ns
P2 vs. P5	-71,26	No	ns
P2 vs. P8	-71,61	No	ns
P4 vs. P5	-77,78	No	ns
P4 vs. P8	-78,13	No	ns
P5 vs. P8	-0,3447	No	ns

### 4.2.1.2. Volumen medio de los pies por parcela

**Tabla 24. Estadística descriptiva del volumen (m<sup>3</sup>) medio de los pies.**

	P1	P3	P6	P7	P2	P4	P5	P8
Numero de obs.	205	178	164	109	119	183	191	163
Mínimo	0,0172	0,0172	0,0172	0,06112	0,0172	0,0172	0,0172	0,0172
Percentil 25%	0,06112	0,1827	0,1827	0,384	0,1827	0,1827	0,1827	0,1827
Mediana	0,384	0,384	0,384	0,6799	0,384	0,384	0,384	0,384
Percentil 75%	0,68	0,68	0,68	0,98	0,68	0,68	0,68	0,68
Máximo	1,60	1,30	0,98	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30
Percentil 10%	0,02	0,06	0,18	0,18	0,18	0,06	0,06	0,06
Percentil 90%	0,98	0,68	0,98	0,98	0,68	0,68	0,98	0,98
Media (m)	0,42	0,41	0,44	0,64	0,42	0,41	0,47	0,47
Desv. estandar	0,38	0,28	0,27	0,31	0,29	0,27	0,30	0,29
Error estándar	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
95% inf. IC m	0,37	0,37	0,40	0,58	0,37	0,37	0,43	0,43
95% sup. del IC m	0,47	0,46	0,49	0,69	0,47	0,45	0,52	0,52
CV	90,05%	68,36%	60,62%	48,43%	69,78%	66,68%	64,17%	62,07%
Media geométrica	0,20	0,28	0,33	0,54	0,32	0,30	0,33	0,35
Sesgo	0,75	0,49	0,54	0,25	1,16	0,84	0,35	0,49

**Tabla 25. ANOVA para la variable “volumen medio”**

**ANOVA summary**

F	7,417
P value	< 0,0001
P value summary	****
Are differences among means statistically significant? (P < 0.05)	Yes
R square	0,03829

**ANOVA table**

	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value
Treatment (between columns)	4,799	7	0,6856	F (7, 1304) = 7,417	P < 0,0001
Residual (within columns)	120,5	1304	0,09244		
Total	125,3	1311			

**Data summary**

Number of treatments (columns)	8
Number of values (total)	1312

**Tabla 26. Test no paramétricos para la variable “volumen medio”.**

**Kruskal-Wallis test**

P value	< 0,0001
Exact or approximate P value?	Approximate
P value summary	****
Do the medians vary signif. (P < 0.05)	<b>Yes</b>
Number of groups	8
Kruskal-Wallis statistic	48,35

<b>Tukey's multiple comparisons test</b>	Mean Diff,	95% CI of diff,	Significant?	Summary
P1 vs. P3	0,006672	-0,08789 to 0,1012	No	ns
P1 vs. P6	-0,02265	-0,1193 to 0,07405	No	ns
P1 vs. P7	-0,2151	-0,3245 to -0,1057	Yes	****
P1 vs. P2	0,001023	-0,1053 to 0,1074	No	ns
P1 vs. P4	0,01375	-0,08012 to 0,1076	No	ns
P1 vs. P5	-0,05296	-0,1458 to 0,03986	No	ns
P1 vs. P8	-0,05066	-0,1475 to 0,04621	No	ns
P3 vs. P6	-0,02932	-0,1292 to 0,07058	No	ns
P3 vs. P7	-0,2218	-0,3341 to -0,1095	Yes	****
P3 vs. P2	-0,00565	-0,1149 to 0,1036	No	ns
P3 vs. P4	0,007077	-0,09009 to 0,1042	No	ns
P3 vs. P5	-0,05963	-0,1558 to 0,03652	No	ns
P3 vs. P8	-0,05733	-0,1574 to 0,04273	No	ns
P6 vs. P7	-0,1925	-0,3065 to -0,07841	Yes	****
P6 vs. P2	0,02367	-0,08747 to 0,1348	No	ns
P6 vs. P4	0,0364	-0,06285 to 0,1356	No	ns
P6 vs. P5	-0,03031	-0,1286 to 0,06795	No	ns
P6 vs. P8	-0,028	-0,1301 to 0,07408	No	ns
P7 vs. P2	0,2161	0,09378 to 0,3385	Yes	****
P7 vs. P4	0,2289	0,1172 to 0,3405	Yes	****
P7 vs. P5	0,1622	0,05137 to 0,2730	Yes	***
P7 vs. P8	0,1645	0,05027 to 0,2787	Yes	***
P2 vs. P4	0,01273	-0,09597 to 0,1214	No	ns
P2 vs. P5	-0,05398	-0,1618 to 0,05381	No	ns
P2 vs. P8	-0,05168	-0,1630 to 0,05961	No	ns
P4 vs. P5	-0,06671	-0,1622 to 0,02876	No	ns
P4 vs. P8	-0,06441	-0,1638 to 0,03500	No	ns
P5 vs. P8	0,002305	-0,09612 to 0,1007	No	ns

### 4.2.1.3. Distribución del número de pies por clase diamétrica por parcela

**Tabla 27. Estadística descriptiva de la distribución del número de pies por clase diamétrica (CD).**

	P1	P3	P6	P7	P2	P4	P5	P8
Numero de obs.	7	7	7	7	7	7	7	7
Mínimo	8	1	0	0	2	3	2	2
Percentil 25%	17	13	7	4	4	5	9	6
Mediana	34	17	18	7	9	18	24	19
Percentil 75%	39,00	46,00	34,00	32,00	32,00	44,00	53,00	41,00
Máximo	42,00	55,00	68,00	37,00	43,00	62,00	58,00	59,00
Percentil 10%	8,00	1,00	0,00	0,00	2,00	3,00	2,00	2,00
Percentil 90%	42,00	55,00	68,00	37,00	43,00	62,00	58,00	59,00
Media (m)	29,14	25,43	23,43	15,57	17,00	26,14	27,29	23,29
Desv. estandar	12,71	19,71	23,15	14,86	15,73	23,33	21,05	20,27
Error estándar	4,80	7,45	8,75	5,62	5,94	8,82	7,96	7,66
95% inf. IC m	17,39	7,20	2,02	1,82	2,46	4,56	7,82	4,54
95% sup. del IC m	40,90	43,66	44,84	29,32	31,55	47,72	46,76	42,03
CV	43,60%	77,52%	98,81%	95,46%	92,51%	89,26%	77,16%	87,05%
Media geométrica	25,74	15,74			10,62	15,87	18,18	14,92
Sesgo	-0,84	0,49	1,29	0,56	0,84	0,52	0,58	0,98

**Tabla 28. ANOVA (de datos pareados) para la variable “número de pies por CD”**

**Repeated measures ANOVA summary**

Assume sphericity?	No
F	2,117
P value	0,1392
P value summary	ns
Statistically significant (P < 0.05)?	No
Geisser-Greenhouse's epsilon	0,3994
R square	0,2609

**Was the matching effective?**

F	31,6
P value	< 0,0001
P value summary	****
Is there significant matching (P < 0.05)?	Yes
R square	0,7694

<b>ANOVA table</b>	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value
Treatment (between columns)	1134	7	162	F (2,796, 16,77) = 2,117	P = 0,1392
Individual (between rows)	14505	6	2417	F (6, 42) = 31,60	P < 0,0001
Residual (random)	3213	42	76,49		
Total	18852	55			

**Data summary**

Number of treatments (columns)	8
Number of values (total)	7

**Tabla 29. Test de normalidad para la variable “número de pies por CD”.**

<b>Shapiro-Wilk normality test</b>	P1	P3	P6	P7	P2	P4	P5	P8
W	0,901	0,9261	0,8906	0,8688	0,88	0,8768	0,9108	0,9165
P value	0,3371	0,5184	0,278	0,1813	0,23	0,2127	0,4011	0,4425
Passed normality test (alpha=0.05)?	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
P value summary	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

**4.2.1.4. Distribución del volumen de los pies por clase diamétrica por parcela**

**Tabla 30. Estadística descriptiva de la distribución del volumen de los pies (m<sup>3</sup>) por clase diamétrica (CD).**

	P1	P3	P6	P7	P2	P4	P5	P8
Numero de obs.	7	7	7	7	7	7	7	7
Mínimo	0,721	0,034	0,223	0,085	0,154	0	0	0,103
Percentil 25%	1,039	0,5501	1,039	1,1	1,161	0,137	0,244	0,794
Mediana	10,41	5,203	6,029	7,847	4,75	5,298	7,804	4,202
Percentil 75%	25,50	12,67	21,12	23,81	23,54	23,12	22,56	22,66
Máximo	25,83	14,96	31,27	29,91	36,03	26,11	25,16	27,88
Percentil 10%	0,72	0,03	0,22	0,09	0,15	0,00	0,00	0,10
Percentil 90%	25,83	14,96	31,27	29,91	36,03	26,11	25,16	27,88
Media	12,10	6,33	10,53	10,64	12,93	10,39	9,90	10,98
Desv.estandar	10,53	5,70	11,90	11,61	14,19	11,55	10,56	11,68
Error estándar	3,98	2,15	4,50	4,39	5,37	4,37	3,99	4,42
95% inf. IC de m	2,36	1,06	-0,47	-0,09	-0,20	-0,29	0,14	0,18
95% sup. IC de m	21,84	11,60	21,54	21,38	26,06	21,07	19,67	21,78
CV	87,07%	89,98%	112,93%	109,04%	109,78%	111,12%	106,58%	106,37%
Media geométrica	6,48	2,44	3,96	3,99	4,58			3,76
Sesgo	0,40	0,56	1,01	1,05	0,73	0,46	0,61	0,53

**Tabla 31. ANOVA (de datos pareados) para la variable “volumen por CD”.**

**Repeated measures ANOVA summary**

Assume sphericity?	No
F	1,474
P value	0,2615
P value summary	ns
Statistically significant (P < 0.05)?	No
Geisser-Gronhouse's epsilon	0,3614
R square	0,1972

**Was the matching effective?**

F	48,79
P value	< 0,0001
P value summary	****
Is there significant matching (P < 0.05)?	Yes
R square	0,8484

<b>ANOVA table</b>	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value
Treatment (between columns)	185,3	7	26,48	F (2,530, 15,18) = 1,474	P = 0,2615
Individual (between rows)	5260	6	876,6	F (6, 42) = 48,79	P < 0,0001
Residual (random)	754,7	42	17,97		
Total	6200	55			

**Data summary**

Number of treatments (columns)	8
Number of values (total)	7

**Tabla 32. Test de normalidad para la variable “volumen por CD”.**

<b>Shapiro-Wilk normality test</b>	P1	P3	P6	P7	P2	P4	P5	P8
W	0,8866	0,9191	0,8616	0,838	0,84	0,8232	0,8607	0,8381
P value	0,2575	0,4623	0,1565	0,0951	0,10	0,0689	0,1537	0,0953
Passed normality test (alpha=0.05)?	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
P value summary	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

## 4.2.2. Homogeneidad en la intensidad de los tratamientos

### 4.2.2.1. Diámetro medio de los pies extraídos por parcela

Tabla 33. ANOVA y test no paramétrico para la variable “DAP extraído” sin la parcela 7.

ANOVA summary	
F	5,055
P value	< 0,0001
P value summary	****
Are differences among means statistically significant? (P < 0.05)	<b>Yes</b>
R square	0,04538

ANOVA table	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value
Treatment (between columns)	1033	6	172,1	F (6, 638) = 5,055	P < 0,0001
Residual (within columns)	21727	638	34,06		
Total	22760	644			

Data summary	
Number of treatments (columns)	7
Number of values (total)	645

Tabla 34. Test no paramétrico para la variable “diámetro medio” de los pies extraídos sin la parcela 7.

Tukey's multiple comparisons test	Mean Diff,	95% CI of diff,	Significant?	Summary
P1 vs. P3	-1,186	-3,613 to 1,242	No	ns
P1 vs. P6	-2,998	-5,458 to -0,5385	Yes	**
P1 vs. P2	-3,974	-6,497 to -1,451	Yes	****
P1 vs. P4	-2,42	-4,777 to -0,06327	Yes	*
P1 vs. P5	-2,421	-4,812 to -0,03009	Yes	*
P1 vs. P8	-3,097	-5,574 to -0,6199	Yes	**
P3 vs. P6	-1,813	-4,431 to 0,8048	No	ns
P3 vs. P2	-2,789	-5,466 to -0,1117	Yes	*
P3 vs. P4	-1,235	-3,756 to 1,286	No	ns
P3 vs. P5	-1,235	-3,788 to 1,317	No	ns
P3 vs. P8	-1,911	-4,545 to 0,7224	No	ns
P6 vs. P2	-0,9759	-3,682 to 1,731	No	ns
P6 vs. P4	0,5781	-1,974 to 3,130	No	ns
P6 vs. P5	0,5776	-2,006 to 3,161	No	ns
P6 vs. P8	-0,09851	-2,762 to 2,565	No	ns
P2 vs. P4	1,554	-1,059 to 4,167	No	ns

P2 vs. P5	1,553	-1,090 to 4,197	No	ns
P2 vs. P8	0,8774	-1,845 to 3,599	No	ns
P4 vs. P5	-0,0005373	-2,486 to 2,485	No	ns
P4 vs. P8	-0,6766	-3,245 to 1,892	No	ns
P5 vs. P8	-0,6761	-3,276 to 1,924	No	ns

#### 4.2.2.2. Volumen medio de los pies extraídos por parcela

Tabla 35. Estadística descriptiva del volumen (m<sup>3</sup>) medio de los pie extraídos.

	P1	P3	P6	P7	P2	P4	P5	P8
Numero de obs.	117	89	85	42	78	99	94	83
Mínimo	0,0043	0,0043	0,0043	0,01528	0,0043	0,0043	0,0043	0,0043
Percentil 25%	0,0043	0,01528	0,04657	0,08365	0,04657	0,04657	0,01528	0,04657
Mediana	0,04657	0,04657	0,04657	0,09601	0,09601	0,04657	0,04657	0,09601
Percentil 75%	0,10	0,10	0,10	0,17	0,10	0,10	0,10	0,10
Máximo	0,33	0,17	0,25	0,33	0,17	0,17	0,33	0,25
Percentil 10%	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02
Percentil 90%	0,17	0,10	0,10	0,22	0,17	0,10	0,17	0,14
Media	0,05	0,06	0,07	0,12	0,08	0,06	0,07	0,07
Desv. estandar	0,06	0,04	0,05	0,07	0,05	0,04	0,06	0,05
Error estándar	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
95% inf. IC de m	0,04	0,05	0,06	0,10	0,07	0,06	0,06	0,06
95% sup. IC de m	0,07	0,07	0,08	0,14	0,09	0,07	0,08	0,08
CV	107,66%	77,90%	67,69%	59,00%	62,68%	67,34%	84,85%	67,81%
Media geométrica	0,03	0,04	0,05	0,10	0,06	0,05	0,04	0,05
Sesgo	1,67	0,72	1,16	0,63	0,59	0,75	1,43	0,75
Curtosis	3,49	-0,01	2,64	0,38	-0,58	0,19	3,08	0,85

Tabla 36. ANOVA para la variable “volumen medio” de los pies extraídos sin la parcela 7.

##### ANOVA summary

F	2,711
P value	0,0132
P value summary	*
Are differences among means statistically significant? (P < 0.05)	<b>Yes</b>
R square	0,02487

##### ANOVA table

	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value
Treatment (between columns)	0,6855	6	0,1143	F (6, 638) = 2,711	P = 0,0132
Residual (within columns)	26,88	638	0,04214		
Total	27,57	644			

##### Data summary



Number of treatments (columns)	7
Number of values (total)	645

**Tabla 37. Test no paramétrico para la variable “volumen medio” de los pies extraídos sin la parcela 7.**

<b>Tukey's multiple comparisons test</b>	Mean Diff,	95% CI of diff,	Significant?	Summary
P1 vs. P3	-0,009907	-0,09531 to 0,07549	No	ns
P1 vs. P6	-0,0658	-0,1523 to 0,02073	No	ns
P1 vs. P2	-0,09829	-0,1870 to -0,009534	Yes	*
P1 vs. P4	-0,03786	-0,1208 to 0,04505	No	ns
P1 vs. P5	-0,05868	-0,1428 to 0,02541	No	ns
P1 vs. P8	-0,07149	-0,1586 to 0,01564	No	ns
P3 vs. P6	-0,05589	-0,1480 to 0,03619	No	ns
P3 vs. P2	-0,08838	-0,1826 to 0,005792	No	ns
P3 vs. P4	-0,02796	-0,1166 to 0,06073	No	ns
P3 vs. P5	-0,04878	-0,1386 to 0,04102	No	ns
P3 vs. P8	-0,06159	-0,1542 to 0,03106	No	ns
P6 vs. P2	-0,03249	-0,1277 to 0,06272	No	ns
P6 vs. P4	0,02794	-0,06184 to 0,1177	No	ns
P6 vs. P5	0,007116	-0,08376 to 0,09799	No	ns
P6 vs. P8	-0,005693	-0,09939 to 0,08800	No	ns
P2 vs. P4	0,06042	-0,03150 to 0,1523	No	ns
P2 vs. P5	0,0396	-0,05339 to 0,1326	No	ns
P2 vs. P8	0,02679	-0,06896 to 0,1225	No	ns
P4 vs. P5	-0,02082	-0,1083 to 0,06662	No	ns
P4 vs. P8	-0,03363	-0,1240 to 0,05673	No	ns
P5 vs. P8	-0,01281	-0,1043 to 0,07864	No	ns

### 4.2.2.3. Distribución del número de pies por clase diamétrica por parcela

**Tabla 38. Estadística descriptiva de la distribución del número de pies por clase diamétrica (CD) de los pies extraídos.**

	P1	P3	P6	P7	P2	P4	P5	P8
Numero de obs.	7	7	7	7	7	7	7	7
Mínimo	1	0	0	0	0	0	1	0
Percentil 25%	1	0	2	1	0	0	1	1
Mediana	16	13	7	4	9	7	10	7
Percentil 75%	32,00	25,00	28,00	13,00	27,00	34,00	25,00	20,00
Máximo	34,00	29,00	36,00	15,00	27,00	35,00	29,00	36,00
Percentil 10%	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
Percentil 90%	34,00	29,00	36,00	15,00	27,00	35,00	29,00	36,00
Media	16,71	12,71	12,14	6,00	11,14	14,14	13,43	11,86
Desv. estandar	13,46	11,67	14,03	5,83	11,85	15,16	11,16	12,69
Error estándar	5,09	4,41	5,30	2,20	4,48	5,73	4,22	4,80
95% inf. IC de m	4,26	1,92	-0,83	0,61	0,18	0,12	3,10	0,12
95% sup. IC de m.	29,17	23,51	25,12	11,39	22,10	28,16	23,75	23,60
CV	80,54%	91,80%	115,53%	97,18%	106,37%	107,19%	83,13%	107,06%
Media geométrica	8,84						7,42	
Sesgo	0,09	0,25	1,18	0,82	0,62	0,68	0,26	1,30

**Tabla 39. ANOVA (de datos pareados) para la variable “número de pies extraídos por CD” sin la parcela 7.**

**Repeated measures ANOVA summary**

Assume sphericity?	No
F	1,758
P value	0,1975
P value summary	ns
Statistically significant (P < 0.05)?	<b>No</b>
Geisser-Gronhouse's epsilon	0,3888
R square	0,2266

**Was the matching effective?**

F	25,29
P value	< 0,0001
P value summary	****
Is there significant matching (P < 0.05)?	<b>Yes</b>
R square	0,7364

<b>ANOVA table</b>	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value
Treatment (between columns)	459	7	65,57	F (2,721, 16,33) = 1,758	P = 0,1975
Individual (between rows)	5659	6	943,2	F (6, 42) = 25,29	P < 0,0001
Residual (random)	1567	42	37,3		
Total	7685	55			

**Data summary**

Number of treatments (columns)	8
Number of values (total)	7

**Tabla 40. Test de normalidad para la variable “número de pies extraídos por CD”.**

<b>Shapiro-Wilk normality test</b>	P1	P3	P6	P2	P4	P5	P8
W	0,913	0,9144	0,8073	0,8368	0,8357	0,9132	0,8805
P value	0,4168	0,4269	0,0483	0,0928	0,0906	0,4185	0,2286
Passed normality test (alpha=0.05)?	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes
P value summary	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns

**4.2.2.4. Distribución del volumen de los pies extraídos por clase diamétrica por parcela**

**Tabla 41. Estadística descriptiva de la distribución del volumen de los pies extraídos (m<sup>3</sup>) por clase diamétrica (CD).**

	P1	P3	P6	P7	P2	P4	P5	P8
Numero de obs.	7	7	7	7	7	7	7	7
Mínimo	0,58	0	0	0	0	0	0,1547	0
Percentil 25%	0,98	0	0,1375	0,244	0	0	0,9808	0,103
Mediana	1,3	1,039	1,962	1,301	0,5501	1,1	1,301	0,981
Percentil 75%	7,48	4,57	5,12	5,76	8,84	6,39	6,80	4,76
Máximo	8,45	11,14	13,83	8,84	10,37	13,10	11,14	13,83
Percentil 10%	0,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00
Percentil 90%	8,45	11,14	13,83	8,84	10,37	13,10	11,14	13,83
Media	3,66	2,91	3,46	2,88	3,53	3,63	3,73	3,45
Desv. estandar	3,46	4,05	4,92	3,28	4,53	4,90	4,04	4,93
Error estándar	1,31	1,53	1,86	1,24	1,71	1,85	1,53	1,86
95% inf. IC de m	0,46	-0,84	-1,09	-0,15	-0,65	-0,89	-0,01	-1,11
95% sup. de IC de m	6,86	6,66	8,00	5,92	7,72	8,16	7,46	8,00
CV	94,49%	139,16%	142,36%	113,92%	128,16%	134,73%	108,29%	143,03%
Sesgo	0,54	1,71	1,98	1,21	0,79	1,42	1,20	1,97

**Tabla 42. ANOVA (de datos pareados) para la variable “volumen extraído por CD”**

Assume sphericity?	No
F	0,3064
P value	0,7043
P value summary	ns
Statistically significant (P < 0.05)?	<b>No</b>
Geisser-Greenhouse's epsilon	0,2773
R square	0,04859

F	73,8
P value	< 0,0001
P value summary	****
Is there significant matching (P < 0.05)?	<b>Yes</b>
R square	0,9213

	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value
Treatment (between columns)	3,165	6	0,5275	F (1,664, 9,983) = 0,3064	P = 0,7043
Individual (between rows)	762,3	6	127	F (6, 36) = 73,80	P < 0,0001
Residual (random)	61,98	36	1,722		
Total	827,4	48			

Number of treatments (columns)	7
Number of values (total)	7

**Tabla 43. Test de normalidad para la variable “volumen extraído por CD”.**

	P1	P3	P6	P2	P4	P5	P8
W	0,7966	0,7833	0,7516	0,7861	0,805	0,844	0,7467
P value	0,0379	0,0279	0,0132	0,0297	0,0459	0,1083	0,0117
Passed normality test (alpha=0.05)?	No	No	No	No	No	Yes	No
P value summary	*	*	*	*	*	ns	*

**Tabla 44. Test no paramétrico para la variable “volumen extraído por CD”.**

P value	0,4069
Exact or approximate P value?	Approximate
P value summary	ns
Are means signif. different? (P < 0.05)	No
Number of groups	7
Friedman statistic	6,148

**Data summary**

Number of treatments (columns)	7
Number of subjects (rows)	7

### 4.3. Estudio de tiempos. Análisis estadístico de las variables

#### 4.3.1. Productividad

**Tabla 45. Estadística descriptiva de la variable “productividad” (t/ha).**

	SA	SB
Numero de obs.	3	3
Mínimo	23,5	22,56
Percentil 25%	23,5	22,56
Mediana	27,44	24,27
Percentil 75%	29,04	24,46
Máximo	29,04	24,46
Percentil 10%	23,50	22,56
Percentil 90%	29,04	24,46
Media	26,66	23,76
Desviación estandar	2,85	1,05
Error estándar	1,65	0,60
95% inferior IC de la media	19,58	21,17
95% superior del IC de la media	33,74	26,36
Coefficiente de variación	10,69%	4,40%
Media geométrica	26,55	23,75
Sesgo	-1,14	-1,67

**Tabla 46. T-tests para la variable “productividad”.**

<b>Unpaired t test with Welch's correction</b>	
P value	0,2136
P value summary	ns
Significantly different? (P < 0.05)	No
One- or two-tailed P value?	Two-tailed
Welch-corrected t, df	t=1,653 df=2,528

**How big is the difference?**

Mean ± SEM of column A	26,66 ± 1,646, n=3
Mean ± SEM of column B	23,76 ± 0,6032, n=3
Difference between means	-2,897 ± 1,753
95% confidence interval	-9,114 to 3,319
R squared	0,5194

**F test to compare variances**

F,DFn, Dfd	7,443, 2, 2
P value	0,2369
P value summary	ns
Significantly different? (P < 0.05)	No

### 4.3.2. Rendimiento del apeo

**Tabla 47. Estadística descriptiva de la variable “rendimiento del apeo” (t/h).**

	SA	SB
Numero de obs.	3	3
Mínimo	1,573	2,337
Percentil 25%	1,573	2,337
Mediana	1,667	2,397
Percentil 75%	1,75	3,53
Máximo	1,75	3,53
Percentil 10%	1,57	2,34
Percentil 90%	1,75	3,53
Media	1,67	2,76
Desviación estándar	0,09	0,67
Error estándar	0,05	0,39
95% inferior IC de la media	1,44	1,08
95% superior del IC de la media	1,89	4,43
Coefficiente de variación	5,44%	24,44%
Media geométrica	1,66	2,71
Sesgo	-0,11	1,72

**Tabla 48. T-tests y test no paramétrico para la variable “rendimiento del apeo”.**

<b>Unpaired t test with Welch's correction</b>	
P value	0,1045
P value summary	ns
Significantly different? (P < 0.05)	No
One- or two-tailed P value?	Two-tailed
Welch-corrected t, df	t=2,781 df=2,072

<b>How big is the difference?</b>	
Mean ± SEM of column A	1,665 ± 0,05233, n=3
Mean ± SEM of column B	2,755 ± 0,3888, n=3
Difference between means	1,091 ± 0,3923
95% confidence interval	-0,5418 to 2,724
R squared	0,7886

<b>F test to compare variances</b>	
F,DFn, Dfd	55,22, 2, 2
P value	0,0356
P value summary	*
Significantly different? (P < 0.05)	Yes

<b>Kolmogorov-Smirnov test</b>	
P value	0,1
Exact or approximate P value?	Exact
P value summary	ns
Significantly different? (P < 0.05)	No
Kolmogorov-Smirnov D	1

### 4.3.3. Rendimiento del desembosque

**Tabla 49. Estadística descriptiva de la variable “rendimiento del desembosque” (t/h).**

	SA	SB
Numero de obs.	3	3
Mínimo	1,367	1,171
Percentil 25%	1,367	1,171
Mediana	1,533	1,174
Percentil 75%	2,64	1,29
Máximo	2,64	1,29
Percentil 10%	1,37	1,17
Percentil 90%	2,64	1,29
Media	1,85	1,21
Desviación estándar	0,69	0,07

Error estándar	0,40	0,04
95% inferior IC de la media	0,13	1,04
95% superior del IC de la media	3,57	1,39
Coefficiente de variación	37,47%	5,79%
Media geométrica	1,77	1,21
Sesgo	1,62	1,73

**Tabla 50. T-tests y test no paramétricos para la variable “rendimiento del desembosque”.**

**Unpaired t test with Welch's correction**

P value	0,253
P value summary	ns
Significantly different? (P < 0.05)	No
One- or two-tailed P value?	Two-tailed
Welch-corrected t, df	t=1,577 df=2,041

**How big is the difference?**

Mean ± SEM of column A	1,847 ± 0,3995, n=3
Mean ± SEM of column B	1,213 ± 0,04057, n=3
Difference between means	-0,6333 ± 0,4016
95% confidence interval	-2,328 to 1,061
R squared	0,5493

**F test to compare variances**

F,DFn, Dfd	96,96, 2, 2
P value	0,0204
P value summary	*
Significantly different? (P < 0.05)	Yes

**Kolmogorov-Smirnov test**

P value	0,1
Exact or approximate P value?	Exact
P value summary	ns
Significantly different? (P < 0.05)	No
Kolmogorov-Smirnov D	1



### 4.3.4. Rendimiento del consumo de la motosierra

Tabla 51. Estadística descriptiva de la variable “consumo de la motosierra” (l/t).

	SA	SB
Numero de obs.	3	3
Mínimo	0,5787	0,2216
Percentil 25%	0,5787	0,2216
Mediana	0,6474	0,417
Percentil 75%	0,65	0,42
Máximo	0,65	0,42
Percentil 10%	0,58	0,22
Percentil 90%	0,65	0,42
Media	0,63	0,35
Desviación estándar	0,04	0,11
Error estándar	0,02	0,07
95% inferior IC de la media	0,52	0,07
95% superior del IC de la media	0,73	0,64
Coefficiente de variación	6,57%	32,23%
Media geométrica	0,63	0,34
Sesgo	-1,70	-1,73

Tabla 52. T-tests de la variable “consumo de la motosierra”.

#### Unpaired t test with Welch's correction

P value	0,0406
P value summary	*
Significantly different? (P < 0.05)	Yes
One- or two-tailed P value?	Two-tailed
Welch-corrected t, df	t=3,910 df=2,515

#### How big is the difference?

Mean ± SEM of column A	0,6262 ± 0,02377, n=3
Mean ± SEM of column B	0,3530 ± 0,06569, n=3
Difference between means	-0,2732 ± 0,06986
95% confidence interval	-0,5219 to -0,02450
R squared	0,8588

#### F test to compare variances

F,DFn, Dfd	7,638, 2, 2
P value	0,2315
P value summary	ns
Significantly different? (P < 0.05)	No

### 4.3.5. Rendimiento del consumo del autocargador

**Tabla 53. Estadística descriptiva de la variable “consumo del autocargador” (l/t).**

	SA	SB
Numero de obs.	3	3
Mínimo	1,672	3,409
Percentil 25%	1,672	3,409
Mediana	2,879	3,758
Percentil 75%	3,23	3,77
Máximo	3,23	3,77
Percentil 10%	1,67	3,41
Percentil 90%	3,23	3,77
Media	2,59	3,65
Desviación estándar	0,82	0,20
Error estándar	0,47	0,12
95% inferior IC de la media	0,56	3,14
95% superior del IC de la media	4,62	4,15
Coefficiente de variación	31,49%	5,60%
Media geométrica	2,50	3,64
Sesgo	-1,38	-1,73

**Tabla 54. T-tests de la variable “consumo del autocargador”.**

**Unpaired t test with Welch's correction**

P value	0,1485
P value summary	ns
Significantly different? (P < 0.05)	No
One- or two-tailed P value?	Two-tailed
Welch-corrected t, df	t=2,165 df=2,249

**How big is the difference?**

Mean ± SEM of column A	2,593 ± 0,4714, n=3
Mean ± SEM of column B	3,645 ± 0,1179, n=3
Difference between means	1,052 ± 0,4859
95% confidence interval	-0,8315 to 2,936
R squared	0,6758

**F test to compare variances**

F,DFn, Dfd	15,98, 2, 2
P value	0,1178
P value summary	ns
Significantly different? (P < 0.05)	No

## 4.4. Daños

Tabla 55. Estadística descriptiva de la variable “grado de daños sobre la masa remanente”.

	SA	SB
Numero de obs.	3	3
Mínimo	20	20
Percentil 25%	20	20
Mediana	22	31
Percentil 75%	29,00	45,00
Máximo	29,00	45,00
Percentil 10%	20,00	20,00
Percentil 90%	29,00	45,00
Media	23,67	32,00
Desviación estándar	4,73	12,53
Error estándar	2,73	7,23
95% inferior IC de la media	11,93	0,87
95% superior del IC de la media	35,41	63,13
Coefficiente de variación	19,97%	39,16%
Media geométrica	23,37	30,33
Sesgo	1,39	0,36

Tabla 56. T-tests de la variable “grado de daños sobre la masa remanente”.

### Unpaired t test with Welch's correction

P value	0,3722
P value summary	ns
Significantly different? (P < 0.05)	No
One- or two-tailed P value?	Two-tailed
Welch-corrected t, df	t=1,078 df=2,558

### How big is the difference?

Mean ± SEM of column A	23,67 ± 2,728, n=3
Mean ± SEM of column B	32,00 ± 7,234, n=3
Difference between means	8,333 ± 7,732
95% confidence interval	-18,86 to 35,53
R squared	0,3123

### F test to compare variances

F,DFn, Dfd	7,030, 2, 2
P value	0,2491
P value summary	ns
Significantly different? (P < 0.05)	No

## 4.5. Costes

**Tabla 57. Datos de base para la estimación de costes.**

Componentes	Unidades	Motosierra	Autocargador	Astilladora	Camión
Precio de compra	€	490	130.000	240.000	81.000
Vida de servicio	año	6	10	12	15
Valor de retorno	%	0%	20%	20%	20%
Coste de reparaciones y mantenimiento	%	100%	50%	50%	35%
Ratio de interés	%	5%	5%	5%	5%
Seguros e impuestos	%	4%	4%	4%	4%
Precio del carburante	l/h	1	4	20	30
Coste lubricante sobre el precio del carburante	%	30%	30%	30%	30%
Coste del operario	€/h	20	18	18	18
Número de operarios	Número	1	1	1	1
Depreciación anual	€/año	82	10.400	16.000	4.320
Horas de uso anual	h/año	1.000	1.000	1.500	1.500

## Anexo 5. Desarrollo de biocombustibles sólidos

### 5.1. Astillas

#### 5.1.1. Calidad de las astillas

Tabla 58. Especificaciones de astillas de madera para uso no industrial (EN 14961. Tabla 2)

Clase de propiedad Método de análisis	Unidades	A1	A2	B1	B2
Origen y fuente EN 14961-1		1.1.1 Árboles enteros sin raíces <sup>a</sup> 1.1.3 Fuste 1.2.1 Residuos de madera no tratada químicamente 1.1.4.3 Residuos de corta, almacenamiento de frondosas	1.1.1 Árboles enteros sin raíces <sup>a</sup> 1.1.3 Fuste 1.2.1 Residuos de madera no tratada químicamente 1.1.4.3 Residuos de corta, almacenamiento de frondosas	1.1 Biomasa leñosa procedente del monte, plantación y otra madera virgen <sup>b</sup> 1.2.1 Residuos de madera no tratada químicamente	1.2 Subproductos y residuos de la industria de procesamiento de madera 1.3 Madera usada
Tamaño de partícula, P, EN 15149-1	mm	A seleccionar de la tabla 1	A seleccionar de la tabla 1	A seleccionar de la tabla 1	
Humedad, M <sup>c</sup> EN 14774-1, EN 14474-2	% en masa	M10 ≤ 10 M25 ≤ 25	M35 ≤ 35	A especificar	
Cenizas, A, EN 14775	% en masa en base seca	A1.0 ≤ 1,0	A1.5 ≤ 1,5	A3.0 ≤ 3,0	
Poder calorífico neto, Q, EN 14918	MJ/kg o kWh/kg	Q13.0 ≥ 13,0 o Q3.6 ≥ 3,6	Q11.0 ≥ 11,0 o Q3.1 ≥ 3,1	A especificar	
Densidad a granel, BD, según se recibe <sup>d</sup> EN 15103	Kg/ m <sup>3</sup> suelto	BD150 ≥ 150 BD200 ≥ 200	BD150 ≥ 150 BD200 ≥ 200	A especificar	
Nitrógeno, N, EN 15104	% en masa en base seca	-	-	N1.0 ≤ 1,0	
Azufre, S, EN 15289	% en masa en base seca	-	-	S0.1 ≤ 0,1	
Cloro, Cl, EN 15289	% en masa en base seca	-	-	Cl0.05 ≤ 0,05	
Arsénico, As, EN 15297	mg/kg en base seca	-	-	≤ 1	
Cadmio, Cd, EN 15297	mg/kg en base seca	-	-	≤ 2,0	
Cromo, Cr, EN 15297	mg/kg en base seca	-	-	≤ 10	
Cobre, Cu, EN 15297	mg/kg en base seca	-	-	≤ 10	
Plomo, Pb, EN 15297	mg/kg en base seca	-	-	≤ 10	
Mercurio, Hg, EN 15297	mg/kg en base seca	-	-	≤ 0,1	
Níquel, Ni, EN 15297	mg/kg en base seca	-	-	≤ 10	
Zinc, Zn, EN 15297	mg/kg en base seca	-	-	≤ 100	

a Excluyendo la clase 1.1.1.3 Cultivo leñoso de turno corto, si hay razón para sospechar de contaminación de la tierra o si la plantación se ha utilizado para el secuestro de los productos químicos o la madera se ha fertilizado por lodos de depuradora (procedente del tratamiento de aguas residuales o de proceso químico).

b Con exclusión de las clases 1.1.5 tocones/raíces y la 1.1.6 corteza.

c A declarar la clase de propiedad real para el contenido de humedad. La clase de humedad M10 es para astillas de madera secadas artificialmente.

d A declarar la clase de propiedad real para la densidad a granel. La densidad a granel es menor para la madera de coníferas (BD150) que para la madera de frondosas (BD200), véase el anexo informativo A.

**Tabla 59. Tamaño de partícula de astillas de madera (EN 15149-1)**

Dimensiones EN 15149-1			
Clase P	Mínimo 75 m-% en la fracción principal, mm <sup>a</sup>	m-% de la fracción de finos (< 3,15 mm)	Fracción gruesa (m-%), longitud máxima de partículas (mm), sección transversal máxima (cm <sup>2</sup> )
P16A	$3,15 \leq P \leq 16$ mm	$\leq 12\%$	$\leq 3\% > 16$ mm y todos $< 31,5$ mm La sección transversal de partículas sobredimensionadas $< 1$ cm <sup>2</sup>
P16B	$3,15 \leq P \leq 16$ mm	$\leq 12\%$	$\leq 3\% > 45$ mm y todos $< 120$ mm La sección transversal de partículas sobredimensionadas $< 1$ cm <sup>2</sup>
P31,5	$8 \leq P \leq 31,5$ mm	$\leq 8\%$	$\leq 6\% > 45$ mm y todos $< 120$ mm La sección transversal de partículas sobredimensionadas $< 2$ cm <sup>2</sup>
P45	$8 \leq P \leq 45$ mm	$\leq 8\%$	$\leq 6\% > 63$ mm y máximo $3,5\% > 100$ mm, todos $< 120$ mm La sección transversal de partículas sobredimensionadas $< 5$ cm <sup>2</sup>

<sup>a</sup> Los valores numéricos (clase P) de dimensión se refieren a los tamaños de partículas (por lo menos 75 m-%) que pasan por el agujero redondo del tamaño de tamiz mencionado (EN 15149-1).

### 5.1.2. Clasificación del material según tamaño

**Tabla 60. Granulometría fracción principal (d50, mm) de las astillas ensayadas según EN 15149-1.**

	Muestra			Media	Desv. est.	CV(%)
	1	2	3			
Fuste	31,06	29,75	30,05	30,29	0,69	2,27
Ramas	26,7	28,3	29	28,00	1,18	4,21
Árbol completo	29,3	30,02	30,8	30,04	0,75	2,50

### 5.1.3. Contenido en humedad

**Tabla 61. Contenido en humedad (%) de las astillas ensayadas según EN 14774.**

	Muestra			Media	Desv. est.	CV(%)
	1	2	3			
Fuste	51,17	49,04	50,34	50,18	1,07	2,14
Ramas	43,02	42,78	43,6	43,13	0,42	0,98
Árbol completo	46,79	45,25	45,83	45,96	0,78	1,69

### 5.1.4. Contenido en cenizas

**Tabla 62. Contenido en cenizas (%) de las astillas ensayadas según EN 14775.**

	Muestra			Media	Desv. est.	CV(%)
	1	2	3			
Fuste	1,09	1,1	1,07	1,09	0,02	1,41
Ramas	3,22	3,24	3,26	3,24	0,02	0,62
Árbol completo	1,49	1,52	1,63	1,55	0,07	4,77

### 5.1.5. Poder calorífico

**Tabla 63. Poder calorífico bruto (PCB, MJ/kg) a volumen constante y en base húmeda de las astillas ensayadas según EN 14918.**

	Muestra			Media	Desv. est.	CV(%)
	1	2	3			
Fuste	17,1737	16,9079	17,0408	17,04	0,13	0,78
Ramas	16,7553	16,7649	16,7589	16,76	0,00	0,03
Árbol completo	17,0348	16,913	17,0219	16,99	0,07	0,39

**Tabla 64. Poder calorífico bruto (PCB) y neto (PCN) de las muestras a diferentes humedades.**

	H (%)	PCB VOL. CTE (kJ/kg; b.h.)	PCB VOL. CTE (kJ/kg; b.s.*)	PCB PRE. CTE (kJ/kg; b.s.*)	PCNPRE. CTE (kJ/kg; b.s.*)	PCN PRE. CTE (kJ/kg; b.h. 5%)	PCN PRE. CTE (kJ/kg; b.h. 10%)	PCN PRE. CTE (kJ/kg; b.h. 20%)
Fuste	10	17.041	18.934	18.931	17.585	16.584	15.583	13.580
Ramas	10	16.760	18.622	18.619	17.273	16.288	15.302	13.330
Árbol completo	10	16.989	18.877	18.873	17.528	16.529	15.531	13.534

\*b.s. base seca (0% H)

## 5.2. Pellets

### 5.2.1. Calidad de los pellets

Tabla 65. Especificaciones de pellets de madera para uso no industrial. Fuente EN 14961.

Clase de propiedad/ Método de análisis	Unidades	A1	A2	B
Origen y fuente EN 14961-1		1.1.3 Fuste 1.2.1 Residuos de madera no tratada químicamente	1.1.1 Árboles enteros sin raíces 1.1.3 Fuste 1.1.4 Restos de corta 1.2.1.5 Corteza (de operaciones industriales) 1.2.1 Residuos de madera no tratada químicamente	1.1 Bosque, plantaciones y otra madera virgen 1.2 Subproductos y residuos de la industria del procesado de la madera 1.3 Madera usada
Diámetro, D <sup>a</sup> y longitud, L <sup>b</sup> prEN 16127  Según la figura 1	mm	D06, 6 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40  D08, 8 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40	D06, 6 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40  D08, 8 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40	D06, 6 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40  D08 8 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40
Humedad, M EN 14774-1, EN 14474-2	% en masa según se recibe, base húmeda	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10
Cenizas, A, EN 14775	% en masa en base seca	A0.7 ≤ 0,7	A1.5 ≤ 1,5	A3.0 ≤ 3,0
Durabilidad mecánica, DU, EN 15210-1	% en masa según se recibe	DU97.5 ≥ 97,5	DU97.5 ≥ 97,5	DU96.5 ≥ 96,5
Los finos en la puerta de la fábrica en el transporte a granel (en el momento de la carga) y en sacos pequeños (hasta 20 kg) y grandes (en el momento del embalaje o cuando se entrega al usuario final), F, EN 15210-1	% en masa según se recibe	F1.0 ≤ 1,0	F1.0 ≤ 1,0	F1.0 ≤ 1,0
Aditivos <sup>c</sup>	% en masa en base seca	≤ 2 m-% A declarar tipo y cantidad	≤ 2 m-% A declarar tipo y cantidad	≤ 2 m-% A declarar tipo y cantidad
Poder calorífico neto, Q, EN 14918	MJ/kg o kWh/kg según se recibe	Q16.5, 16,5 ≤ Q ≤ 19 o Q4.6, 4,6 ≤ Q ≤ 5,3	Q16.3, 16,3 ≤ Q ≤ 19 o Q4.5, 4,5 ≤ Q ≤ 5,3	Q16.0, 16,0 ≤ Q ≤ 19 o Q4.4, 4,4 ≤ Q ≤ 5,3
Densidad a granel, BD, EN 15103	kg/m <sup>3</sup>	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600
Nitrógeno, N, EN 15104	% en masa en base seca	N0.3 ≤ 0,3	N0.5 ≤ 0,5	N1.0 ≤ 1,0
Azufre, S, EN 15289	% en masa en base seca	S0.03 ≤ 0,03	S0.03 ≤ 0,03	S0.04 ≤ 0,04
Cloro, Cl, EN 15289	% en masa en base seca	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.03 ≤ 0,03

Normativo



### 5.2.1.1. Dimensiones

Tabla 66. Diámetro (mm) de los pellets ensayados según EN 16127.

	Muestra			Media	Desv. est.	CV (%)
	1	2	3			
PH CC 15	6,2	5,89	6,1	6,06	0,16	2,61
PH SC 15	5,9	6,1	5,9	5,97	0,12	1,94
PH CC 20	5,7	5,9	6,1	5,90	0,20	3,39
PH SC 20	6,1	6,00	5,90	6,00	0,10	1,67
PP CC 15	5,8	6,1	6,1	6,00	0,17	2,89
PP SC 15	6	5,8	6,1	5,97	0,15	2,56
PP CC 20	6,2	5,9	6	6,03	0,15	2,53
PP SC 20	5,8	5,9	6,1	5,93	0,15	2,57
PH RAMAS	6,1	5,7	5,9	5,90	0,20	3,39
PP RAMAS	5,8	5,9	5,9	5,867	0,06	0,98

Tabla 67. Longitud (mm) de los pellets ensayados según EN 16127.

	Muestra			Media	Desv. est.	CV
	1	2	3			
PH CC 15	37,7	40,2	39,1	39,00	1,25	3,21
PH SC 15	37,9	40	39,3	39,07	1,07	2,74
PH CC 20	39,9	38,7	43	40,53	2,22	5,47
PH SC 20	41,2	42,1	38,9	40,73	1,65	4,05
PP CC 15	39,5	39,8	40	39,77	0,25	0,63
PP SC 15	40,3	41,5	43,1	41,63	1,40	3,37
PP CC 20	39,8	38,4	41,5	39,90	1,55	3,89
PP SC 20	40,9	38,7	39,8	39,80	1,10	2,76
PH RAMAS	39,6	42,1	41,8	41,17	1,37	3,32
PP RAMAS	42	39,7	40,5	40,733	1,17	2,87

### 5.2.1.2. Porcentaje en corteza

Tabla 68. Porcentaje en corteza (%) de los pellets ensayados.

	Muestra			Media	Desv. est.	CV (%)
	1	2	3			
PH CC 15	5,02	4,52	4,25	4,60	0,39	8,50
PH CC 20	12,84	13,12	12,79	12,92	0,18	1,38
PP CC 15	10,35	8,49	9,17	9,34	0,94	10,08
PP CC 20	12,86	14,09	13,63	13,53	0,62	4,59

### 5.2.1.3. Contenido en humedad

Tabla 69. Contenido en humedad (%) de los pellets ensayados según EN 14774.

	Muestra			Media	Desv. est.	CV (%)
	1	2	3			
PH CC 15	4,2	5,2	7,1	5,50	1,48	26,88
PH SC 15	4,5	5,7	4,3	4,83	0,76	15,67
PH CC 20	6,2	4,9	5,5	5,53	0,65	11,76
PH SC 20	4,3	4,9	4,8	4,67	0,32	6,89
PP CC 15	6,6	5,8	5,1	5,83	0,75	12,87
PP SC 15	5,9	4,4	5,2	5,17	0,75	14,53
PP CC 20	5,9	6,4	6,8	6,37	0,45	7,08
PP SC 20	4,1	3,9	3,5	3,83	0,31	7,97
PH RAMAS	4	2,9	3,1	3,33	0,59	17,58
PP RAMAS	6,2	5,4	5,9	5,83	0,40	6,93

### 5.2.1.4. Densidad a granel

Tabla 70. Densidad a granel (kg/m<sup>3</sup>) de los pellets ensayados según EN 15103.

	Muestra			Media	Desv. est.	CV (%)
	1	2	3			
PH CC 15	631,2	603,42	613,79	616,14	14,04	2,28
PH SC 15	625,24	567,88	572,71	588,61	31,81	5,40
PH CC 20	542,48	578,64	551,53	557,55	18,82	3,37
PH SC 20	560,15	546,57	589,27	565,33	21,82	3,86
PP CC 15	602,87	584,76	606,55	598,06	11,66	1,95
PP SC 15	621,62	604,44	624,61	616,89	10,89	1,76
PP CC 20	587,32	571,39	619,63	592,78	24,58	4,15
PP SC 20	570,96	581,27	578,77	577,00	5,38	0,93
PH RAMAS	551,18	548,64	532,87	544,23	9,92	1,82
PP RAMAS	608,47	612,52	587,02	602,67	13,70	2,27

### 5.2.1.5. Durabilidad

**Tabla 71. Durabilidad (%) de los pellets ensayados según EN 15210-1**

	Muestra			Media	Desv. est.	CV (%)
	1	2	3			
PH CC 15	98,25	93,7	88,88	93,61	4,69	5,01
PH SC 15	95,87	96,55	98,91	97,11	1,60	1,64
PH CC 20	96,05	99,83	94,52	96,80	2,73	2,82
PH SC 20	94,15	92,74	82,48	89,79	6,37	7,09
PP CC 15	96,32	91,67	96,11	94,70	2,63	2,77
PP SC 15	99,51	96,06	99,18	98,25	1,90	1,94
PP CC 20	99,98	96,28	99,54	98,60	2,02	2,05
PP SC 20	97,13	91,87	94,83	94,61	2,64	2,79
PH RAMAS	81,74	83,66	72,53	79,31	5,95	7,50
PP RAMAS	95,77	97,31	87,57	93,55	5,24	5,60

### 5.2.1.6. Cantidad de finos

**Tabla 72. Cantidad de finos (%) de los pellets ensayados según EN 15149-2**

	Muestra			Media	Desv. est.	CV (%)
	1	2	3			
PH CC 15	0,87	0,9	0,33	0,70	0,32	45,83
PH SC 15	2,97	3,21	3,93	3,37	0,50	14,82
PH CC 20	0,35	0,21	0,07	0,21	0,14	66,67
PH SC 20	0,2	0,51	0,16	0,29	0,19	66,06
PP CC 15	0,18	0,42	0,54	0,38	0,18	48,24
PP SC 15	0,29	0,19	0,03	0,17	0,13	77,15
PP CC 20	0,06	0,46	0,11	0,21	0,22	103,78
PP SC 20	0,87	0,62	0,4	0,63	0,24	37,33
PH RAMAS	0,68	0,98	0,62	0,76	0,19	25,38
PP RAMAS	0,89	0,69	0,55	0,71	0,17	24,07

### 5.2.1.7. Contenido en cenizas

Tabla 73. Contenido en cenizas (%) de los pellets ensayados según EN 14775

	Muestra			Media	Desv. est.	CV (%)
	1	2	3			
PH CC 15	0,86	0,87	0,76	0,83	0,06	7,33
PH SC 15	0,87	0,52	0,47	0,62	0,22	35,15
PH CC 20	0,84	0,69	1,29	0,94	0,31	33,22
PH SC 20	0,48	0,72	0,45	0,55	0,15	26,91
PP CC 15	0,25	0,65	0,33	0,41	0,21	51,62
PP SC 15	0,24	0,12	0,39	0,25	0,14	54,11
PP CC 20	0,53	0,4	0,45	0,46	0,07	14,26
PP SC 20	0,23	0,15	0,22	0,20	0,04	21,79
PH RAMAS	1,05	0,87	0,63	0,85	0,21	24,79
PP RAMAS	0,72	1,24	0,86	0,94	0,27	28,62

### 5.2.1.8. Contenido en cloro y azufre

Tabla 74. Contenido en cloro (%) de los pellets ensayados según EN 15289

	Muestra			Media	Desv. est.	CV (%)
	1	2	3			
PH CC 15	0,01	0,02	0,03	0,02	0,01	50,00
PH SC 15	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00
PH CC 20	0,02	0,01	0,03	0,02	0,01	50,00
PH SC 20	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
PP CC 15	0,01	0,02	0	0,01	0,01	100,00
PP SC 15	0,02	0,01	0	0,01	0,01	100,00
PP CC 20	0,01	0,02	0,03	0,02	0,01	50,00
PP SC 20	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00
PH RAMAS	0,01	0,01	0,04	0,02	0,02	86,60
PP RAMAS	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00

Tabla 75. Contenido en azufre (%) de los pellets ensayados según EN 15289

	Muestra			Media	Desv. est.	CV (%)
	1	2	3			
PH CC 15	0,01	0	0,02	0,01	0,01	100,00
PH SC 15	0,02	0,01	0	0,01	0,01	100,00
PH CC 20	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
PH SC 20	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
PP CC 15	0,01	0,02	0	0,01	0,01	100,00
PP SC 15	0,02	0	0,01	0,01	0,01	100,00
PP CC 20	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00
PP SC 20	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00
PH RAMAS	0,02	0,01	0,03	0,02	0,01	50,00
PP RAMAS	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00

### 5.2.1.9. Poder calorífico

Tabla 76. Poder calorífico bruto (PCB, MJ/kg) a volumen constante y en base húmeda de los pellets ensayados según EN 14918.

	Muestra			Media	Desv. est.	CV (%)
	1	2	3			
PH CC 15	17,32	17,58	17,29	17,40	0,16	0,92
PH SC 15	17,09	17,27	17,79	17,38	0,37	2,10
PH CC 20	17,52	17,77	18,23	17,84	0,36	2,02
PH SC 20	17,65	17,98	17,92	17,85	0,18	0,99
PP CC 15	17,54	17,21	17,24	17,33	0,18	1,06
PP SC 15	17,72	17,64	16,89	17,42	0,46	2,62
PP CC 20	17,93	17,28	18,11	17,77	0,44	2,46
PP SC 20	19,01	18,54	18,40	18,65	0,32	1,71
PH RAMAS	18,09	18,75	18,25	18,36	0,34	1,88
PP RAMAS	18,32	17,55	17,22	17,70	0,57	3,20

**Tabla 77. Poder calorífico bruto (PCB) y neto (PCN) de los pellets ensayados a diferentes humedades.**

	H (%)	PCB VOL. CTE (kJ/kg; b.h.)	PCB VOL. CTE (kJ/kg; b.s.*)	PCB PRE. CTE (kJ/kg; b.s.*)	PCNPRE. CTE (kJ/kg; b.s.*)	PCN PRE. CTE (kJ/kg; b.h. 5%)	PCN PRE. CTE (kJ/kg; b.h. 10%)	PCN PRE. CTE (kJ/kg; b.h. 20%)
PH CC 15	10	16870	18744	18741	17396	16404	15412	13428
PH SC 15	10	16860	18733	18730	17384	16393	15402	13419
PH CC 20	10	17270	19189	19185	17840	16826	15812	13783
PH SC 20	10	17280	19200	19196	17851	16836	15822	13792
PP CC 15	10	16810	18678	18674	17329	16340	15352	13375
PP SC 15	10	16890	18767	18763	17418	16425	15432	13446
PP CC 20	10	17210	19122	19119	17773	16763	15752	13730
PP SC 20	10	18000	20000	19996	18651	17596	16542	14432
PH RAMAS	10	17740	19711	19707	18362	17322	16282	14201
PP RAMAS	10	17140	19044	19041	17696	16689	15682	13668

## 5.2.2. Análisis estadístico de las variables

### a) Humedad

**Tabla 78. Two-way Anova “especie” vs. “presencia de corteza” para la variable “humedad”.**

Two-way ANOVA	Ordinary
Alpha	0,05

Source of Variation	% of total variation	P value	P value summary	Significant?
Interaction	8,279	0,3106	ns	No
Con o sin corteza	65,8	0,0308	*	Yes
Especie	1,309	0,6686	ns	No

ANOVA table	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value
Interaction	0,3444	1	0,3444	F (1, 4) = 1,346	P = 0,3106
Con o sin corteza	2,738	1	2,738	F (1, 4) = 10,70	P = 0,0308
Especie	0,05445	1	0,05445	F (1, 4) = 0,2127	P = 0,6686
Residual	1,024	4	0,256		
Number of missing values	0				

**Tabla 79. Two-way Anova “especie” vs. “fracción” para la variable “humedad”.**

Two-way ANOVA	Ordinary
Alpha	0,05

Source of Variation	% of total variation	P value	P value summary	Significant?
Interaction	28,27	0,4055	ns	No
Fraccion	9,497	0,7042	ns	No
Sp	25,39	0,2255	ns	No

ANOVA table	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value
Interaction	2,234	2	1,117	F (2, 4) = 1.141	P = 0.4055
Fraccion	0,7505	2	0,3753	F (2, 4) = 0.3833	P = 0.7042
Sp	2,006	1	2,006	F (1, 4) = 2.049	P = 0.2255
Residual	3,916	4	0,979		
Number of missing values	2				

**b) Cenizas**

**Tabla 80. Two-way Anova “especie” vs. “presencia de corteza” para la variable “cenizas”.**

Two-way ANOVA	Ordinary
Alpha	0,05

Source of Variation	% of total variation	P value	P value summary	Significant?
Interaction	0,7628	0,3184	ns	No
Con o sin corteza	27,79	0,0023	**	Yes
Especie	69,1	0,0004	***	Yes

ANOVA table	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value
Interaction	0,003613	1	0,003613	F (1, 4) = 1.297	P = 0.3184
Con o sin corteza	0,1316	1	0,1316	F (1, 4) = 47.24	P = 0.0023
Especie	0,3272	1	0,3272	F (1, 4) = 117.5	P = 0.0004
Residual	0,01114	4	0,002786		
Number of missing values	0				

**Tabla 81. Two-way Anova “especie” vs. “fracción” para la variable “cenizas”.**

Two-way ANOVA	Ordinary
Alpha	0,05

Source of Variation	% of total variation	P value	P value summary	Significant?
Interaction	14,2	0,3596	ns	No
Fraccion	30,67	0,1678	ns	No
Sp	18,73	0,1338	ns	No

ANOVA table	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value
Interaction	0,09773	2	0,04886	F (2, 4) = 1.335	P = 0.3596
Fraccion	0,211	2	0,1055	F (2, 4) = 2.882	P = 0.1678
Sp	0,1289	1	0,1289	F (1, 4) = 3.521	P = 0.1338
Residual	0,1464	4	0,0366		
Number of missing values	2				

**c) Densidad a granel**

**Tabla 82. Two-way Anova “especie” vs. “presencia de corteza” para la variable “densidad a granel”.**

Two-way ANOVA	Ordinary
Alpha	0,05

Source of Variation	% of total variation	P value	P value summary	Significant?
Interaction	1,967	0,7757	ns	No
corteza	1,055	0,8343	ns	No
Sp	12,33	0,4877	ns	No

ANOVA table	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value
Interaction	64,98	1	64,98	F (1, 4) = 0,09293	P = 0,7757
corteza	34,86	1	34,86	F (1, 4) = 0,04986	P = 0,8343
Sp	407,6	1	407,6	F (1, 4) = 0,5829	P = 0,4877
Residual	2797	4	699,2		
Number of missing values	0				



**Tabla 83. Two-way Anova “especie” vs. “fracción” para la variable “densidad a granel”.**

Two-way ANOVA	Ordinary
Alpha	0,05

Source of Variation	% of total variation	P value	P value summary	Significant?
Interaction	17,56	0,1835	ns	No
Fraccion	44,56	0,052	ns	No
Sp	35,03	0,031	*	Yes

ANOVA table	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value
Interaction	948,6	2	474,3	F (2, 4) = 2,668	P = 0,1835
Fraccion	2407	2	1203	F (2, 4) = 6,769	P = 0,0520
Sp	1892	1	1892	F (1, 4) = 10,64	P = 0,0310
Residual	711	4	177,8		
Number of missing values	2				

#### d) Durabilidad

**Tabla 84. Two-way Anova “especie” vs. “presencia de corteza” para la variable “durabilidad”.**

Two-way ANOVA	Ordinary
Alpha	0,05

Source of Variation	% of total variation	P value	P value summary	Significant?
Interaction	2,029	0,7633	ns	No
C/S Corteza	3,211	0,7058	ns	No
Especie	16,72	0,407	ns	No

ANOVA table	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value
Interaction	1,201	1	1,201	F (1, 4) = 0,1040	P = 0,7633
C/S Corteza	1,901	1	1,901	F (1, 4) = 0,1646	P = 0,7058
Especie	9,901	1	9,901	F (1, 4) = 0,8570	P = 0,4070
Residual	46,22	4	11,55		
Number of missing values	0				

**Tabla 85. Two-way Anova “especie” vs. “fracción” para la variable “durabilidad”.**

Two-way ANOVA	Ordinary
Alpha	0,05

Source of Variation	% of total variation	P value	P value summary	Significant?
Interaction	20,86	0,182	ns	No
Fraccion	45,11	0,0655	ns	No
Sp	30,23	0,0492	*	Yes

ANOVA table	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value
Interaction	60,63	2	30,32	F (2, 4) = 2,689	P = 0,1820
Fraccion	131,1	2	65,57	F (2, 4) = 5,815	P = 0,0655
Sp	87,89	1	87,89	F (1, 4) = 7,794	P = 0,0492
Residual	45,11	4	11,28		
Number of missing values	2				

**e) Finos**

**Tabla 86. Two-way Anova “especie” vs. “presencia de corteza” para la variable “finos”.**

Two-way ANOVA	Ordinary
Alpha	0,05

Source of Variation	% of total variation	P value	P value summary	Significant?
Interaction	10,63	0,5888	ns	No
C/S corteza	0,5252	0,9018	ns	No
Sp	0,3647	0,9181	ns	No

ANOVA table	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value
Interaction	0,02916	1	0,02916	F (1, 3) = 0,3640	P = 0,5888
C/S corteza	0,00144	1	0,00144	F (1, 3) = ,01798	P = 0,9018
Sp	0,001000	1	0,001000	F (1, 3) = ,01248	P = 0,9181
Residual	0,2403	3	0,0801		
Number of missing values	0				

**Tabla 87. Two-way Anova “especie” vs. “fracción” para la variable “finos”.**

Two-way ANOVA	Ordinary
Alpha	0,05

Source of Variation	% of total variation	P value	P value summary	Significant?
Interaction	29,36	0,2964	ns	No
Fraccion	44,34	0,2039	ns	No
Sp	4283	0,5133	ns	No

ANOVA table	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value
Interaction	0,1417	2	0,07087	F (2, 3) = 1,874	P = 0,2964
Fraccion	0,2140	2	0,1070	F (2, 3) = 2,830	P = 0,2039
Sp	0,02067	1	0,02067	F (1, 3) = 0,5466	P = 0,5133
Residual	0,1135	3	0,03782		
Number of missing values	3				

**f) Porcentaje de corteza**

**Tabla 88. T-test entre especies “*Pinus halepensis*” vs. “*Pinus pinaster*” para variable “corteza”.**

**Unpaired t test**

P value	0,6237
P value summary	ns
Significantly different? (P < 0.05)	No
One- or two-tailed P value?	Two-tailed
t, df	t=0,5743 df=2

**How big is the difference?**

Mean ± SEM of column A	8,760 ± 4,160, n=2
Mean ± SEM of column B	11,44 ± 2,095, n=2
Difference between means	2,675 ± 4,658
95% confidence interval	-17,37 to 22,72
R squared	0,1416

**Tabla 89. Two-way Anova “especie” vs. “fracción” para la variable “corteza”.**

Two-way ANOVA	Ordinary
Alpha	0,05

Source of Variation	% of total variation	P value	P value summary	Significant?
Fraccion	77,41	0,203	ns	No
Sp	14,16	0,4185	ns	No

ANOVA table	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value
Fraccion	39,13	1	39,13	F (1, 1) = 9.175	P = 0.2030
Sp	7,156	1	7,156	F (1, 1) = 1.678	P = 0.4185
Residual	4,264	1	4,264		
Number of missing values	0				

**g) Cloro**

**Tabla 90. Two-way Anova “especie” vs. “presencia de corteza” para la variable “cloro”.**

Two-way ANOVA	Ordinary
Alpha	0,05

Source of Variation	% of total variation	P value	P value summary	Significant?
Interaction	6,667	0,5946	ns	No
corteza	6,667	0,5946	ns	No
sp	6,667	0,5946	ns	No

ANOVA table	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value
Interaction	0,0000125	1	0,0000125	F (1, 4) = 0,3333	P = 0,5946
corteza	0,0000125	1	0,0000125	F (1, 4) = 0,3333	P = 0,5946
sp	0,0000125	1	0,0000125	F (1, 4) = 0,3333	P = 0,5946
Residual	0,00015	4	0,0000375		
Number of missing values	0				

**Tabla 91. Two-way Anova “especie” vs. “fracción” para la variable “cloro”.**

Two-way ANOVA	Ordinary
Alpha	0,05

Source of Variation	% of total variation	P value	P value summary	Significant?
Fraccion	56,25	0,073	ns	No
Origen	6,25	0,5917	ns	No
Sp	23,44	0,1012	ns	No

ANOVA table	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value
Interaction	0,000135	2	0,0000675	F (2, 4) = 5,400	P = 0,0730
Origen	0,000015	2	0,0000075	F (2, 4) = 0,6000	P = 0,5917
Sp	0,00005625	1	0,00005625	F (1, 4) = 4,500	P = 0,1012
Residual	0,00005	4	0,0000125		
Number of missing values	2				

**h) Azufre**

**Tabla 92. Two-way Anova “especie” vs. “presencia de corteza” para la variable “azufre”.**

Two-way ANOVA	Ordinary
Alpha	0,05

Source of Variation	% of total variation	P value	P value summary	Significant?
Interaction	0	> 0,9999	ns	No
corteza	0	> 0,9999	ns	No
sp	33,33	0,2302	ns	No

ANOVA table	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value
Interaction	0	1	0	F (1, 4) = 0,0	P > 0,9999
corteza	0	1	0	F (1, 4) = 0,0	P > 0,9999
sp	0,00005	1	0,00005	F (1, 4) = 2,000	P = 0,2302
Residual	0,0001	4	0,000025		
Number of missing values	0				

**Tabla 93. Two-way Anova “especie” vs. “fracción” para la variable “azufre”.**

Two-way ANOVA	Ordinary
Alpha	0,05

Source of Variation	% of total variation	P value	P value sum	Significant?
Interaction	66,67	> 0,9999	ns	No
Fraccion	28,57	> 0,9999	ns	No
Sp	-1,291E-14	0,4216	ns	No

ANOVA table	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value
Interaction	0,00014	2	0,00007	F (2, 4) = -2,066e+015	P > 0,9999
Fraccion	0,00006	2	0,00003	F (2, 4) = -8,854e+014	P > 0,9999
Sp	-2,711E-20	1	-2,711E-20	F (1, 4) = 0,8000	P = 0,4216
Residual	-1,355E-19	4	-3,388E-20		
Number of missing values	2				

**i) Poder calorífico**

**Tabla 94. Two-way Anova “especie” vs. “presencia de corteza” para la variable “poder calorífico”.**

Two-way ANOVA	Ordinary
Alpha	0,05

Source of Variation	% of total variation	P value	P value summary	Significant?
Interaction	8,577	0,5443	ns	No
corteza	8,577	0,5443	ns	No
sp	4,498	0,6568	ns	No

ANOVA table	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value
Interaction	116806	1	116806	F (1, 4) = 0,4379	P = 0,5443
corteza	116805	1	116805	F (1, 4) = 0,4379	P = 0,5443
sp	61252	1	61252	F (1, 4) = 0,2296	P = 0,6568
Residual	1067000	4	266743		
Number of missing values	0				

**Tabla 95. Two-way Anova “especie” vs. “fracción” para la variable “poder calorífico”.**

Two-way ANOVA	Ordinary
Alpha	0,05

Source of Variation	% of total variation	P value	P value summary	Significant?
Interaction	20,37	0,2722	ns	No
Fraccion	57,4	0,0779	ns	No
Sp	1,431	0,6385	ns	No

ANOVA table	SS	DF	MS	F (DFn, DFd)	P value
Interaction	356834	2	178417	F (2, 4) = 1,833	P = 0,2722
Fraccion	1005000	2	502675	F (2, 4) = 5,165	P = 0,0779
Sp	25069	1	25069	F (1, 4) = 0,2576	P = 0,6385
Residual	389322	4	97331		
Number of missing values	2				